

Міністерство освіти і науки України

*ДВНЗ «Криворізький національний університет»*

**Вісник**  
**Криворізького національного**  
**університету**

**Збірник наукових праць**

***Випуск 42***

(Присвячений ювілею кафедри  
Автоматизованих електромеханічних систем  
в промисловості та транспорті)

Кривий Ріг 2016

Редакційна колегія: **Ступнік М.І.**, д-р техн. наук, проф. (головний редактор); **Моркун В.С.**, д-р техн. наук, проф. (заступник головного редактора); **Азарян А.А.**, д-р техн. наук, проф.; **Барашиков А.Я.**, д-р техн. наук, проф.; **Бережний М.М.**, д-р техн. наук, проф.; **Вілкул Ю.Г.**, д-р техн. наук, проф.; **Гірін В.С.**, д-р техн. наук, проф.; **Голишев О.М.**, д-р техн. наук, проф.; **Губін Г.В.**, д-р техн. наук, проф.; **Гурін А.О.**, д-р техн. наук, проф.; **Давидкович А.С.**, д-р техн. наук, проф., США; **Долгоруков Ю.О.**, д-р економ. наук, проф.; **Євтехов В.Д.**, д-р геол.-мінерал. наук, проф.; **Жуков С.О.**, д-р техн. наук, проф.; **Зубов Д.А.**, д-р техн. наук, проф., США; **Pias Nicolae, Dr.h.c.**, Professor, University of Petrosani, Romani; **Кіяновський М.В.**, д-р техн. наук, проф.; **Ковальчук В.А.**, д-р техн. наук, проф.; **Коробко В.М.**, д-р техн. наук, проф.; **Лялюк В.П.**, д-р техн. наук, проф.; **Несмашний Є.О.**, д-р техн. наук, проф.; **Нусінов В.Я.**, д-р економ. наук, проф.; **Олійник Т.А.**, д-р техн. наук, проф.; **Решетілова Т.Б.**, д-р економ. наук, проф.; **Рудь Ю.С.**, д-р техн. наук, проф.; **Сінчук О.М.**, д-р техн. наук, проф.; **Сінолиций А.П.**, д-р техн. наук, проф.; **Сапиґа С.Я.**, д-р економ. наук, проф.; **Самуся В.І.**, д-р техн. наук, проф.; **Сидоренко В.Д.**, д-р техн. наук, проф.; **Стороженко Л.І.**, д-р техн. наук, проф.; **Толмачов С.Т.**, д-р техн. наук, проф.; **Турило А.М.**, д-р економ. наук, проф.; **Учитель О.Д.**, д-р техн. наук, проф.; **Федоренко П.Й.**, д-р техн. наук, проф.; **Федоркін С.І.**, д-р техн. наук, проф.; **Шишкін О.О.**, д-р техн. наук, проф.

Науково-технічний збірник внесено до Переліку фахових видань, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук (наказ Міністерства освіти і науки України № 455 від 15.04.2014 р.). Збірник надсилається до Національної бібліотеки України В.Л. Вернадського та провідних наукових бібліотек України. Збірник індексується в наукометричній базі Index Copernicus та у загальнодержавній реферативній базі даних «Україніка наукова» (реферативний журнал «Джерело»).

У збірнику викладено результати досліджень у галузі технічних та економічних наук. Розглянуто шляхи підвищення ефективності промислових виробництв, автоматизації, контролю та керування технологічними процесами. Важливе місце займають питання енергозбереження, економіки, надійності охорони праці, техніки безпеки, захисту довкілля.

Збірник розраховано на наукових й інженерно-технічних працівників, а також може бути використаний студентами вищих навчальних закладів.

Адреса редакції: 50002, Кривий Ріг, вул. Пушкіна, 44.

ДВНЗ «Криворізький національний університет». Тел. 409 61 29.

**Зміст**

**ТЕХНІЧНІ НАУКИ**

|                                                                                                                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Синчук О.Н., Гузов Э.С., Пархоменко Р.А., Харитонов А.А.</i> Оценка процессов потребления электрической энергии электроприемниками шахтных сетей в условиях неполноты информации .....                                                    | 3   |
| <i>Фащиленко В.Н., Решетняк С.Н.</i> Обоснование исследования электромеханических резонансных процессов в разрушении горного массива .....                                                                                                   | 8   |
| <i>Степаненко В.П.</i> Повышение энергоэффективности и ресурсосбережения рудничного электровозного транспорта .....                                                                                                                          | 11  |
| <i>Пироженко А.В., Пироженко Т.В., Петриченко А.А.</i> Експериментальне обґрунтування основних вимог до засобів захисного вимикання контактних мереж електровазної відкатки залізрудних шахт від пожежонебезпечних дугових замикань .....    | 16  |
| <i>Евтушенко Л.Г., Бялобжеський О.В.</i> Комбінована система керування асинхронним генератором з компенсацією реактивної потужності у вузлі електричної мережі .....                                                                         | 21  |
| <i>Берідзе Т.М.</i> Формування принципів і функцій стратегічного моніторингу в системі стратегічного управління підприємством.....                                                                                                           | 26  |
| <i>Жуйков В.Я., Осипенко К.С.</i> Особливості відбору енергії від вітрогенератора в перехідному режимі орієнтації на вектор вітрового потоку .....                                                                                           | 29  |
| <i>Синчук И.О., Гузов Э.С., Винник М.А.</i> О перспективах повышения эффективности функционирования комплекса: «электроснабжение – электропотребление» подземных железорудных предприятий .....                                              | 32  |
| <i>Розен В.П., Демчик Я.М.</i> Порівняльний аналіз методів прогнозування споживання електроенергії виробничих систем .....                                                                                                                   | 41  |
| <i>Синчук О.Н., Черная В.О., Черный В.О., Пироженко А.В.</i> Моделирование электрических переходных процессов в элементах защиты широтно-импульсных преобразователей напряжения тяговых электротехнических комплексов постоянного тока ..... | 47  |
| <i>Синчук О.М., Бойко С.М., Юрченко М.М.</i> До можливостей розбудови систем електропостачання підприємств гірничо-видобувного комплексу з включенням в їх структуру вітроенергетичних комплексів .....                                      | 52  |
| <i>Кутін В.М., Кутіна М.В.</i> Математична модель визначення роботоздатності ізоляції розподільних мереж постійного струму та її аналіз .....                                                                                                | 56  |
| <i>Омельченко О.В., Удовенко О.О., Сянко Р.В.</i> До питання використання двофазних асинхронних двигунів в тягових електроприводах шахтних контактних електровазів .....                                                                     | 60  |
| <i>Кольсун В.А., Риженков Д.В., Макодьоб В.М., Кулик О.М.</i> Аналіз та дослідження енергетичних характеристик перетворювача частоти стосовно мережі живлення фотоелектричної сонячної станції .....                                         | 63  |
| <i>Ляшенко В.П., Анісєв О.В.</i> Математична модель прокатки тонкої і надтонкої стрічки із тугоплавких і важкодеформованих металів .....                                                                                                     | 68  |
| <i>Синчук И.О., Сёмочкин А.Б., Федотов В.А.</i> О принципах минимально соударяемого и максимально точного управления перемещением вагонеток рудничных электровозосоставов .....                                                              | 73  |
| <i>Сёмочкин А.Б., Федотов В.А., Сменова Л.В.</i> Анализ математических подходов для решения задачи точности позиционирования вагонеток рудничных электровозосоставов при погрузочно разгрузочных операциях .....                             | 78  |
| <i>Кондратець В.О., Мацуй А.М.</i> Метод автоматизованого керування подрібненням руди кульовим млином з оптимізацією динаміки розрідження пульпи .....                                                                                       | 83  |
| <i>Савицький А.И., Сёмочкин А.Б., Сёмочкина С.В.</i> Моделирование системы автоматического управления энергетическими параметрами электроприводов клетей прокатных станов .....                                                              | 88  |
| <i>Осадчук Ю.Г., Козакевич І.А., Ільченко Р.А.</i> Порівняльний аналіз асинхронних, синхронних машин з постійними магнітами та вентильних реактивних двигунів для гібридних транспортних засобів .....                                       | 94  |
| <i>Козакевич І.А.</i> Система рекуперативного гальмування вентильним двигуном електромобіля .....                                                                                                                                            | 99  |
| <i>Козакевич І.А.</i> Система керування синхронним двигуном з постійними магнітами з використанням фільтру Калмана .....                                                                                                                     | 104 |
| <i>Сьомочкин А.Б., Шевчук В.В.</i> Застосування суперконденсаторів в гібридних системах .....                                                                                                                                                | 109 |
| <i>Філіпп Ю.Б., Белоус А.В.</i> Дослідження енергетичних показників тягової підстанції тролейбусів Кривого Рогу .....                                                                                                                        | 114 |
| <i>Синчук І.О., Самохіна А.С.</i> До питання підвищення енергоефективності видобутку залізної руди підземним способом .....                                                                                                                  | 118 |
| <i>Синчук И.О., Самохина А.С.</i> Применение комбинированного привода в электровозах для повышения тяговых свойств .....                                                                                                                     | 120 |
| <i>Плєшков С.П., Плєшков П.Г., Зінзура В.В.</i> Оптимальне керування параметрами режиму розподільчих електричних мереж з допомогою симетрокомпенсуючих пристроїв .....                                                                       | 125 |
| <i>Бабець Є.К., Хорольський В.П., Хорольська Т.В.</i> Моделювання режимів роботи внутрішньомлиних навантажень кульових млинів багатостадійного процесу збагачення .....                                                                      | 130 |
| <i>Синчук О.М., Філіпп Ю.Б., Максимов М.М., Ялова А.М.</i> Методологія оцінки та формування енергоефективних режимів споживання електроенергії на залізрудних підприємствах .....                                                            | 136 |
| <i>Касаткіна І.В., Сидоренко А.М.</i> Підвищення енергоефективності використання автосамоскидів у кар'єрі .....                                                                                                                              | 142 |
| <i>Синчук И.О., Касаткина И. В., Яловая А.Н., Юрченко Н.Н.</i> Оценка направлений повышения энергоэффективности добычи железорудного сырья подземным способом .....                                                                          | 145 |

|                                                                                                                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Касаткіна І.В., Гутов І.В.</i> Підвищення енергетичної ефективності тягового агрегату в кар'єрі .....                                                                                      | 152 |
| <i>Пересунько І.І.</i> Збільшення напруги дільничних мереж як спосіб підвищення якості електроенергії для самохідної техніки залізничних шахт .....                                           | 156 |
| <i>Батраков Д.В.</i> Аналіз режимів роботи вібраційної транспортуючої машини з метою підвищення ефективності випуску руди.....                                                                | 160 |
| <i>Козлов В.С., Євменов А. Ю.</i> Оцінка потенціалу енергоефективності прокатного стану .....                                                                                                 | 166 |
| <i>Онищенко В.В.</i> Дослідження впливу коливань напруги живлення на роботу електричного привода рудникового електровоза.....                                                                 | 170 |
| <i>Гузов Е.С., Сінчук І.О., Кальмус Д.О.</i> Дослідження електромагнітних процесів в тяговому двигуні постійного струму з послідовною обмоткою збудження .....                                | 174 |
| <i>Кальмус Д.О., Грачов М.М.</i> Дослідження граничних умов ефективного переходу тягового електроприводу рудникових електровозів з режиму тяги у режим гальмування .....                      | 178 |
| <i>Петриченко А.А., Зиманков Р.В., Ликаренко А.Г.</i> Оценка электрических параметров изоляции распределительных сетей железнорудных шахт Кривбасса в нынешних условиях их эксплуатации ..... | 182 |
| <i>Гузов Е.С., Сінчук І.О., Кальмус Д.О., Лагода М.І.</i> Підвищення ефективності електричного гальмування тягових електроприводів рудникових електровозів .....                              | 186 |
| <i>Кальмус Д.О., Коваленко І.І.</i> Підвищення надійності роботи тягового електричного привода рудникового контактного електровоза засобами системи керування .....                           | 190 |
| <i>Савицкий А.И., Тимошенко М.А.</i> Управление гидроциклоном второй стадии рудоизмельчения .....                                                                                             | 194 |
| <i>Моркун В.С., Моркун Н.В., Тронь В.В.</i> Идентификация нелинейных объектов управления обогатительного производства на основе ядерного преобразования Вольтерра-Лагерра .....               | 198 |
| <i>Клименко Д.О.</i> Аналіз систем автоматичного керування процесом термічної обробки обкотишів на фабриці огрудкування.....                                                                  | 203 |
| <i>Охота К.А.</i> Адаптивна система керування продуктивністю насосної станції подачі води на збагачувальну фабрику.....                                                                       | 208 |
| <i>Лобов В.Й., Нескоромна М. В.</i> Синтез модального регулятора для процесу випалу обкотишів у конвеєрній печі фабрики огрудкування.....                                                     | 212 |
| <i>Жосан А.А.</i> Непараметрический регулятор нелинейных процессов .....                                                                                                                      | 216 |
| <i>Азарян А.А., Цыбулевский Ю.Е., Кучер В.Г., Швец Д.В.</i> Исследование влияния вещественного состава железистых кварцитов гока АрселорМиттал на их прочность .....                          | 221 |
| <i>Кольсун В.А., Ивашко А.А., Иутин И.А.</i> Создание и внедрение в курс изучения преобразовательной техники модуля «автономный инвертор напряжения» .....                                    | 226 |
| <i>Сінчук О.Н., Касаткіна І.В., Сменова Л.В.</i> Моделирование переходных процессов в асинхронных двигателях тяговых электромеханических комплексов двоосных электровозов .....               | 230 |
| <i>Антоненко А.О.</i> Особенности контроля состояния качества электроэнергии промышленных систем электроснабжения .....                                                                       | 236 |
| <b>АНОТАЦІЇ</b> .....                                                                                                                                                                         |     |
| <i>А н о т а ц і ї</i> .....                                                                                                                                                                  | 241 |
| <b>ІНФОРМАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ</b> .....                                                                                                                                                           |     |
| <i>Кириленко О.В.</i> Привітання .....                                                                                                                                                        | 270 |
| <i>Сінчук О.М.</i> Кафедра автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті. Із минулого у сучасність .....                                                             | 271 |



УДК 621.311.086.5:621.3.001

О.Н. СИНЧУК, д-р техн. наук, проф., Э.С. ГУЗОВ, канд. техн. наук, доц.,  
Р.А. ПАРХОМЕНКО, ст. преподаватель, А.А. ХАРИТОНОВ, ст. преподаватель  
Криворожский национальный университет

## ОЦЕНКА ПРОЦЕССОВ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКАМИ ШАХТНЫХ СЕТЕЙ В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОТЫ ИНФОРМАЦИИ

В статье приведены результаты исследований по оценке состояний процесса электропотребления в условиях неопределенности и неполноты информации с применением методов «сжатия» информации. Описанные процедуры дают возможность в условиях неопределенности и слабой информативности наблюдаемых признаков, обуславливающих процесс электропотребления, наиболее полно использовать исходную статистическую информацию для оценок, адекватно описывающих состояния режимов электропотребления. Предложено описание режимов электрических нагрузок для электроприемников с неоднородным характером работы в виде многоуровневой аддитивной модели.

**Ключевые слова:** электроприемники, эффективность, электропотребление, неопределенность, воздействие

**Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями.** Повышение эффективности использования электроэнергии на железорудных предприятиях неразрывно связано с проблемой реальности уровня оценки режимов электропотребления, что особенно актуально в силу специфики условий ведения горных работ [1 - 3]. В этой связи целесообразно выдвинуть следующие идеи. Направления, подлежащие исследованию:

Электропотребление горных предприятий зависит от большого числа факторов. Влияние факторов на процесс электропотребления (ЭП) имеет сложный и многообразный характер, описание которого в рамках как детерминистических, так и классических статистических методов не всегда возможно в силу непредсказуемости условий, определяющих действие факторов. В этой связи можно констатировать, что потребление электрической энергии (ПЭЭ) железорудных предприятий формируется под влиянием факторов, предсказание воздействия которых является недостаточно достоверным. Большое число разнообразных факторов представляет определенные трудности в оценке их воздействия на ПЭЭ как в методологическом, так и технико-экономическом аспектах.

Информация о процессе ПЭЭ содержит разнообразные множества эмпирических данных и характеризует его многомерными случайными признаками. Значительное число признаков делает трудной задачу выявления связей между признаками. В этом случае требуется описание процесса ЭП меньшим числом обобщенных характеристик, которые отражают внутренние объективно существующие закономерности, не поддающиеся непосредственному наблюдению.

Отмеченные особенности приводят к необходимости применять при оценке состояний режимов ПЭЭ горных предприятий методы, позволяющие получать решения в условиях неполной информации при снижении размерности исходных данных («сжатие» информации) о изучаемом процессе [4]. В этом случае возникают задачи анализа данных об ЭП, решение которых основано на применении методов факторного анализа и установлении типологии изучаемых объектов.

**Анализ исследований и публикаций.** Оценка состояний процесса электропотребления в условиях неопределенности и неполноты информации с применением методов «сжатия» информации РКЛ и МГК предполагает выявление существенных признаков, определяющих природу режимов электропотребления. Сущность указанных методов [4] состоит в том, что при помощи ортогональных преобразований находится наилучшая проекция совокупности точек наблюдения в пространстве меньшей размерности. При этом вновь получаемые векторы распределяются в преобразованном пространстве: в МГК - по критерию максимума дисперсии, в РКЛ - по критерию минимума среднеквадратической ошибки. Таким образом, РКЛ дает возможность представить наиболее устойчивое состояние системы, которому соответствует минимум среднеквадратической ошибки, а МГК позволяет меньшим числом векторов, чем исходное, описать максимум дисперсии системы, т.е. дать наиболее вероятные границы изменения исходной экспериментальной матрицы.

Как показывают исследования [4-6] значительное число технологических электроприемников горных предприятий формируют энергетические режимы, имеющие неоднородный (с точки зрения распределения вероятностей) характер. В этом случае распределения вероятностей значений признаков исходной статистической информации и преобразованной («сжатой») информации в процессах ПЭЭ имеют полимодальный характер. Это обстоятельство вносит определенные трудности при моделировании процессов ПЭЭ.

**Изложение материала и результаты.** Для применения методов «сжатия» исходная информация об ЭП [7] должна представляться в виде матрицы

$$X = [X_j] = \begin{bmatrix} X_{11} \dots & X_{1j} \dots & X_{1m} \\ X_{i1} \dots & X_{ij} \dots & X_{im} \\ \dots & \dots & \dots \\ X_{n1} & X_{nj} & X_{nm} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $[X_j]$  - вектор-строка, отражающий информацию об электропотреблении при  $i$ -м значении признака;  $X_{ij}$  - значение величины электропотребления  $i$ -го признака  $j$ -го измерения (объекта);  $i = \overline{1, n}$  - число значений признака;  $j = \overline{1, m}$  - число измерений (объектов).

В этом случае электропотребление допустимо характеризовать как  $n$ -мерный вектор.

При моделировании ПЭЭ с помощью РКЛ основными преобразованиями являются следующие.

В реальном ПЭЭ выделяются характеристические ортогональные (независимые) составляющие (представительные векторы), описывающие электропотребление в пространстве меньшей размерности при извлечении из результатов наблюдения максимума информации. Указанная процедура выполняется с помощью линейного преобразования системы координат исходного  $n$ -мерного вектора электропотребления  $X$  согласно уравнению:

$$X = A \cdot Y, \quad (2)$$

где  $A$  - матрица преобразования,  $A = \{a_{ij}\}$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ ;  $Y$  - представительный  $n$ -мерный вектор, описывающий процесс ЭП в пространстве новых переменных,

$$Y = \{Y_{ij}\}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}.$$

Матрица преобразования  $A$  находится по исходной матрице  $X$  и представляет собой  $n$  собственных векторов ковариационной матрицы  $K_x$

$$K_x = \begin{bmatrix} K_{11} \dots & K_{1j} \dots & K_{1m} \\ K_{i1} \dots & K_{ij} \dots & K_{im} \\ \dots & \dots & \dots \\ K_{n1} & K_{nj} & K_{nm} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $K_{ij}$  - выборочные несмещенные оценки элементов ковариационной матрицы, которые определяются по выражению

$$K_{ij} = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (X_{ij} - \bar{X}_j)(X_{lj} - \bar{X}_l), \quad (4)$$

где  $\bar{X}_j, \bar{X}_l$  - вторичные средние  $i$ -й и  $l$ -й компонент  $n$ -мерного вектора электропотребления  $X$ .

Собственные векторы  $U_i$  матрицы  $K_x$  находятся через собственные числа  $\lambda_{Ki}$  из уравнения

$$K_x \cdot U_i = \lambda_{Ki} \cdot U_i, \quad (5)$$

Собственные числа  $\lambda_{Ki}$  получаются в результате решения уравнения

$$K_x - \lambda_{Ki} \cdot I = 0, \quad (6)$$

где  $I$  - единичная матрица.

Для соблюдения условия ортонормирования необходимо выполнить нормировку собственных векторов, после чего получается матрица преобразования

$$A = [A] = \begin{bmatrix} A_{11} \dots & A_{1r} \dots & A_{1n} \\ X_{i1} \dots & X_{ir} \dots & X_{in} \\ \dots & \dots & \dots \\ X_{n1} & X_{nr} & X_{nn} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

При выполнении ортонормированности представительный вектор в пространстве новых переменных определится матричным уравнением

$$Y = A^T X, \quad (8)$$

При этом выполняются следующие условия.

Представительные векторы  $Y_i$  некоррелированные, т.е. выполняется условие

$$M\{(Y_{ij} - \bar{Y}_i) \cdot (Y_{lj} - \bar{Y}_l)\} = \begin{cases} \lambda_i & \text{при } l = i \\ 0 & \text{при } l \neq i \end{cases}, \quad (9)$$

Среднеквадратическая ошибка при использовании для представления вектора  $X$  только  $N$  первых представительных векторов  $Y_i$  ( $N < n$ ) минимальна

$$\varepsilon^{-2}(N)_{\min} = \sum_{i=N+1}^n \lambda_{Ki}, \quad (10)$$

Таким образом, для изучаемого процесса ПЭЭ модель «сжатой» информации имеет вид

$$X_{ij} = \sum_{r=0}^n a_{ir} \cdot Y_{rj}, \quad (11)$$

При моделировании процесса ПЭЭ с помощью МГК основными преобразованиями являются следующие

Стандартизируются значения матрицы исходных данных о процессе ЭП (1) и получают стандартизованную матрицу

$$Z = \{Z_{ij}\}, \quad (12)$$

Значения стандартизованной матрицы

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_j}{\sigma_j}, \quad (13)$$

где  $\bar{X}_j$  - среднее значение по столбцу  $j$ ;  $\sigma_j$  - среднеквадратическое отклонение значений  $X$  в столбце  $j$ .

Новые переменные находятся как некоррелированные нормированные линейные комбинации исходных признаков. В матричной форме имеем

$$F = B^T \cdot Z, \quad (14)$$

где  $F$  - матрица новых переменных (главный компонент);  $F = \{f_{ij}\}$ ,  $i = \overline{1, n}$ ;  $j = \overline{1, m}$ ;  $B$  - матрица преобразования.

Матрица преобразования

$$B = A \cdot \lambda^{1/2}; \quad (15)$$

где  $A$  - ортогональная матрица в которой  $r$ -й столбец является  $r$ -м собственным вектором, соответствующим  $r$ -му, собственному числу корреляционной матрицы  $R_x$ ;  $\lambda$  - диагональная матрица, на диагонали которой находятся собственные значения  $\lambda_r$  корреляционной матрицы  $R_x$  вектора  $X$ .

Элементы в матрице  $\lambda$  расположены в порядке убывания

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \geq \lambda_n \geq 0, \quad (16)$$

Новые переменные расположены в пространстве признаков в порядке убывания их дисперсий, т.е.

$$\sigma^2(f_1) \geq \sigma^2(f_2) \geq \dots \geq \sigma^2(f_n), \quad (17)$$

где  $f_1, f_2, \dots, f_n$  - соответственно первая, вторая,  $n$ -я главные компоненты.

Для изучаемого процесса ЭП модель «сжатой» информации будет иметь вид

$$X_{ij} = \sum_{r=1}^n b_{ir} \cdot f_{rj}, \quad (18)$$

где  $n$  - число главных компонент;  $f_{rj}$  - обеспечивающих вклад в общую дисперсию с достаточной задаваемой надежностью.

При аппроксимации векторов преобразования  $(A_r, B_r)$  и представительных векторов  $Y_r$  (главных компонент  $f_r$ ) аналитическими функциями получаем адекватные модели процесса ЭП

$$F_{Xij}(\gamma_a, \varphi_Y) = \sum_{r=1}^n \gamma_a \cdot r_i(T) \cdot Y_{Y,rj}, \quad (19)$$

где  $\gamma_a, \varphi_Y$  - аналитические функции, аппроксимирующие векторы  $A_r$  и  $Y_r$ , входящие соответственно в матрицы  $A$  и  $Y$ ;  $i = \overline{1, n}$ ;  $j = \overline{1, m}$ .

Описанные процедуры дают возможность в условиях неопределенности и слабой информативности наблюдаемых признаков, обуславливающих процесс ЭП, наиболее полно использовать исходную статистическую информацию для оценок, адекватно описывающих состояния режимов ЭП.

В случае неоднородного энергетического режима работы электроприемников (при полимодальном распределении значений электрической нагрузки) моделирование процесса ПЭЭ целесообразно выполнять с выделением из всей области изменения нагрузки устойчивых уровней, около средних значений которых с определенной степенью рассеяния варьируются отдельные случайные значения нагрузки.

Для осуществления указанной процедуры целесообразно применить статистическую классификацию, основанную на выборочных наблюдениях и позволяющую привести множество наблюдаемых значений нагрузки в систему ранжированных уровней (классов).

Задача классификации электрических нагрузок на уровни распадается на две [ 5 ]: выделение числа и свойств классов в пространстве образов нагрузок; идентификация случайных значений нагрузок, т.е. отнесение их к одному из классов.

Для выделения из экспериментальных выборок классов необходимо осуществить генерацию гипотез с использованием кластерного анализа [ 6 ]. Выделение числа и свойства кластеров в пространстве изменения образов электрических нагрузок, представленных полимодальными выборками, связано с неопределенностью, так как кластеры недостаточно разнесены в пространстве. В этом случае генерацию гипотез целесообразно осуществить по следующей схеме.

По характеру распределения и числу мод выборки, характеризующей электрическую нагрузку, характеризующей электрическую нагрузку, устанавливается число кластеров. Для идентификации случайных значений нагрузок в качестве групповой меры близости принимается внутригрупповая сумма квадратов отклонений между каждым образом и средней по кластеру. Качество кластеризации обеспечивается минимизацией выбранной меры близости

$$Y = \sum_{i=1}^n \sum_{x \in P_i} \|\dot{X} - \dot{m}_i\|^2 = \min, \quad (20)$$

где  $n$  - число кластеров;  $P_i$  - множество образов, входящих в  $i$ -й кластер;  $X$  - вектор измерений электрической нагрузки;  $m_i$  - вектор выборочных средних для множества  $P_i$ .

$$\dot{m}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{x \in P_i} \dot{X}, \quad (21)$$

где  $n_i$  - количество образов, входящих в множество  $P_i$ .

Кластеризация электрических нагрузок по приведенной схеме позволяет получить множества устойчивых уровней нагрузки и времени их действия  $t_n$

$$P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}, \quad (22)$$

$$t = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}, \quad (23)$$

Определение режимов ЭП в виде выражений (22) и (23) меняет традиционное представление о характере распределения электрических нагрузок в виде нормального, положенного в основу расчетных методов определения электрических нагрузок [8,9].

В связи с нетрадиционным представлением режимов ЭП требуется рассмотреть общие выражения для определения величин, используемых в расчетах электрических нагрузок.

Для расхода электроэнергии за рассматриваемый период (например, смену) с учетом полученных множеств можно записать

$$P_C \cdot t_{CM} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i, \quad (24)$$

где  $P_C$  - средняя нагрузка за смену  $t_{CM}$ .

Выполняя почленное деление левой и правой частей (24) на  $P_{НОМ} \cdot t_{CM}$ , а также вводя обозначения:  $P_C^* = P_C / P_{НОМ}$ ;  $P_i^* = P_i / P_{НОМ}$ ;  $t_i^* = t_i / t_{CM}$ ;  $K_r = P_i^* / P_i$ , ( $r=2,3, \dots, n$ ) и принимая за максимальный уровень нагрузки  $P_1^*$ , имеем

$$P_C^* = P_1^* \cdot t_1^* + K_2 \cdot P_1^* (1 - \sum_{i=1, i \neq 2}^n t_i^*) + \dots + K_n \cdot P_1^* (1 - \sum_{i=1, i \neq n}^n t_i^*)$$

или

$$P_C^* = P_1^* \cdot \left[ t_1^* + \sum_{r=2}^n K_r \cdot (1 - \sum_{i=1, i \neq r}^n t_i^*) \right], \quad (25)$$

Полученное выражение (25) позволяет дать описание режимов ЭН для электроприемников с неоднородным характером работы в виде многоуровневой аддитивной модели.

**Выводы и направления дальнейших исследований.** Описанные процедуры позволяют реализовать основные идеи о процессе ПЭЭ, принимаемые при исследовании и оценке его состояний [10 - 11].

В указанном аспекте оценка состояния процесса ЭП при всем многообразии моделей анализа опирается на положение, заключающееся в том, что при обследовании или эксперименте, когда эмпирический материал содержит большое число параметров, многие из них объединены корреляционными связями между собой. Это объясняется тем, что наблюдаемые «внешние» параметры лишь косвенно характеризуют процесс ЭП. Наряду с большим числом «внешних» параметров (факторов) существует небольшое число «внутренних» («существенных») параметров. Эти «внутренние» параметры трудно или невозможно измерить, но они определяют поведение «внешних» параметров. Нахождение этих гипотетических существенных параметров и является целью анализа состояния процесса ПЭЭ.

Основываясь на вышеизложенных позициях, можно выделить различные множества (параметров), обуславливающих процесс ПЭЭ. К числу этих множеств относятся группы факторов горно-геологического, горно-технологического, климато-метеорологического, электроэнергетического, организационного характера.

Такие параметры (факторы) горно-технологической группы, как глубина залегания, размеры месторождений, температура горных массивов, вид технологии, параметры систем вскрытия и разработки, типы применяемых машин и оборудования и др., влияют на электроэнергоемкость продукции. На процесс ПЭЭ влияют и времена года. Электроэнергетические факторы – структурные параметры электрических схем, число, мощность, КПД электроприемников и др. – обуславливают формирование режимов электрических нагрузок. Организационные и эксплуатационные факторы обуславливают степень использования электроприемников, уровень повышенных потерь электроэнергии из-за ухудшения характеристик электрооборудования, машин и механизмов.

#### Список литературы

1. Розен В.П. Оцінювання енергоефективності електроспоживання вугільних шахт [Текст] / В.П. Розен, Л.В. Давиденко, В.І. Волинець // Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах: Матеріали IV-ої міжнародної науково-технічної конференції – Луцьк: РВВ ЛДТУ, 2012. – С. 130 – 132.
2. Пархоменко Р.А. К вопросу оценки процесса электропотребления горнорудных предприятий в условиях неопределенности и неполноты информации [Текст] / Р.А. Пархоменко, А.Н. Яловая, М.А. Баулина // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: Збірник матеріалів конференції Міжнародної 3 науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів. – Кременчук: КрНУ, 2013. – С.190-191.

3. **Messner S.** MESSAGE- MACRO: linking an energy supply model with a macroeconomic module and solving it iteratively / **S. Messner, L. Schattenholzer** // Energy. – 2000. – N 25. – P. 267 – 285.
4. **Праховник А.В.** Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий / **А.В. Праховник, В.П. Розен, В.В. Дегтярев** // М.: Недра, 1985 - 232 с.
5. **Олейников В.К.** Анализ и планирование электропотребления на горных предприятиях / **В.К. Олейников** // М.: Недра, 1983. – 192 с.
6. **Айвазян С. А.** Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности / **С. А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин** // М.: Финансы и статистика, 1989.— 607 с.
7. **Parkchomenko R.** Dynamics appraisal of electrical energy consumption process of iron ore mines in conditions of indeterminacy and insufficiency of information [Electronic source] / **R.O. Parkchomenko** // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 2. – P. 332–335. Access mode: [http://www.metaljournal.com.ua/assets/MMI\\_2014\\_6/MMI\\_2015\\_2/051-Parchomenko.pdf](http://www.metaljournal.com.ua/assets/MMI_2014_6/MMI_2015_2/051-Parchomenko.pdf)
8. **Синчук И.О.** Потенциал электроэнергоэффективности и пути его реализации на производствах с подземными способами добычи железорудного сырья. Монография / **И.О. Синчук, Э.С. Гузов, А.Н. Яловая, С.Н. Бойко** // под ред. докт. техн. наук, профессора **О.Н. Синчука**. – Кременчук: Изд. ЧП Щербатых А.В. – 2015. – 296 с.
9. **Синчук О.Н.** Оценка состояния и определения тактики повышения эффективности работы участков подстанций железорудных шахт / **О.Н. Синчук, С.Н. Лесной, Р.А. Пархоменко, А.Н. Яловая** // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. - Кіровоград, 2012. - Випуск 25, частина II. - С.248-254.
10. **Розен В.П.** Моделирование энергетических режимов энергоемких потребителей железорудных шахт / **В.П. Розен, Э.С. Гузов, Р.О. Пархоменко** // Научно-технический сборник «Гірничий вісник». Випуск №97. - Кривий Ріг: 2014. – С.176-180.
11. **Пархоменко Р.О.** Підвищення ефективності електропостачання у шахтних мережах як один із шляхів підвищення конкурентоспроможності продукції / **Р.О. Пархоменко, О.В. Аніськов** // Збірник тез доповідей II міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції «ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ: СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ - REMS'15»/ Київ: Національний технічний університет України «КПІ», 2015.- С.71-72.

Рукопись поступила в редакцию 29.03.16

УДК 622: 621.31

**В.Н. ФАЦИЛЕНКО**, д-р техн. наук, проф., НИТУ МИСиС  
**С.Н. РЕШЕТНЯК**, канд. техн. наук, доц. НИТУ МИСиС

## ОБОСНОВАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ РЕЗОНАНСНЫХ ПРОЦЕССОВ В РАЗРУШЕНИИ ГОРНОГО МАССИВА

В работе представлено обоснование исследований электромеханических резонансных процессов протекающих при процессе разрушения горного массива на примере проходческого комбайна. До недавнего времени все резонансные явления в электромеханических системах горных машин являлись крайне вредными, и разрабатывалось достаточно большое количество способов по их гашению. Идея работы заключается в использовании энергии резонансных явления на разрушение горного массива. Эта проблема актуальна как для открытых, так и для подземных горных работ. Использование резонансных явлений в электромеханической системе исполнительного органа горного оборудования позволит разработать оборудования и значительно увеличить скорость разрушения горного массива, тем самым повысить энергоэффективность оборудования, что значительно скажется на себестоимости производимой продукции.

Однако при работе горного оборудования в режиме контролируемого резонанса, необходимо достаточно жестко контролировать эти режимы ввиду того что, неконтролируемый резонансный режим приводит к разрушению электромеханической системы горного оборудования, ремонт которого является достаточно затратным.

Решение представленной задачи позволит снизить себестоимость производства продукции, за счет снижения затрат на потребление электрической энергии, и повышения срока службы отдельных элементов конструкции проходческого комбайна.

**Ключевые слова:** электропривод, резонансный режим работы, горные машины, электромеханическая система.

**Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями.** Проблемы разрушения горного массива была и остается одной из важнейших проблем добычи полезного ископаемого как открытым способом, так и подземным способом. В настоящее время существует несколько способов разрушения горного массива, таких как: взрывной способ; вибрационный способ; способ гидротолчки; электротермический способ; шарошечный способ; а также ряд комбинированных способов [1].

**Анализ исследований и публикаций.** Основные приоритетные направления научных исследований в области разрушения массива горных пород являются:

совершенствование существующих и разработка новых способов разрушения горных пород;

развитие теоретических основ для новых способов разрушения горного массива;

создание новых средств, а также модернизация средств механизации при разрушении горного массива;

мониторинг эффективности средств механизации при разрушении горного массива.

Под понятием разрушения горного массива следует понимать, как добычу полезного ископаемого, так и проходку выработок, а также бурение взрывных и разведочных скважин.

Одним из комбинированных способов является электромеханический резонансный способ разрушения горного массива. Пути снижения нагрузок рабочих органов, ряда горных машин и механизмов, является улучшение их динамических свойств за счет выбора рациональных параметров электромеханической системы и активного управления процессами таким образом, чтобы вредные явления, связанные с вибрациями, направить на разрушение горного массива. Эта проблема может быть решена средствами регулируемого электропривода, путем введения электромеханической системы основного исполнительного органа горного оборудования в управляемый резонансный режим. Решение этой научной проблемы не потеряло актуальности, ввиду постоянного совершенствования систем управления электроприводов за счет оптимизации по критерию максимальной производительности и минимального потребления электрической энергии.

**Изложение материала и результаты.** Основной задачей управляемого электромеханического резонансного режима является обеспечение таких нагрузок, которые бы не превысили допустимого предела по фактору механической прочности конкретного элемента конструкции оборудования. Кроме того, современная высокопроизводительная техника, должна иметь широкий диапазон скоростей рабочего органа при относительно узком диапазоне изменения крепости пород [3].

Одним из примеров горных машин используемых для работы в условиях шахт и рудников, и имеющих реальную возможность для модернизации его путем применения в системе управления рабочего органа электромеханического резонансного режима, является стреловый проходческий комбайн. Данный вид проходческих комбайнов получил наибольшее распространение в горной промышленности Российской Федерации и за рубежом, из-за своей универсальности и относительной простоты конструкции.

Однако, применяемые в настоящее время механизмы качания стрелы, не могут обеспечить постоянства скорости ее перемещения в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а также и усилий подачи на коронке в этих же плоскостях [2]. Стрелы проходческих комбайнов обладают достаточно большой степенью свободы (значения степеней свободы достигает 7), для получения возможности обработки забоя по всему профилю выработки. Следует отметить, что работа этого оборудования в режиме контролируемого резонанса, потребует усиления конструкции стрелы проходческого комбайна, с точки зрения определения допустимого предела по фактору механической прочности ряда элементов конструкции, и усиления этих факторов в конкретных узлах.

При проведении исследований динамических свойств системы электропривода моменты инерции, массы, жесткость реальных элементов обычно известна, а действующие в системе силы либо заданы, либо рассчитываются по исходным данным механизма и технологическим условиям. После приведения их значений к расчетной скорости представляется возможным, сопоставив приведенные значения моментов инерции и жесткостей, осуществить выбор главных масс и главных упругих связей и на этой основе составить корректную расчетную схему механической части многомассовой системы электропривода [3].

На рис. 1 представлена кинематическая схема стрелового проходческого комбайна. Это комбайн можно представить в виде трех сосредоточенных масс соединенных между собой упругими связями. В качестве первой массы можно представить шасси проходческого комбайна с конвейером, в качестве второй массы можно представить стрелу комбайна с системой электропривода рабочего органа, в качестве третьей массы можно представить рабочий орган стрелового комбайна. Следует отметить, что представленные массы в значительной мере отличаются друг от друга

На рис. 2 представлена трехмассовая кинематическая схема стрелового проходческого комбайна. Согласно задачи, необходимо введение в режим электромеханического резонанса рабочего органа (масса №3) с помощью системы электропривода рабочего органа (масса №2).

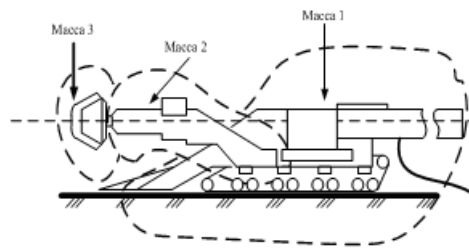


Рис.1. Кинематическая схема стрелового проходческого комбайна

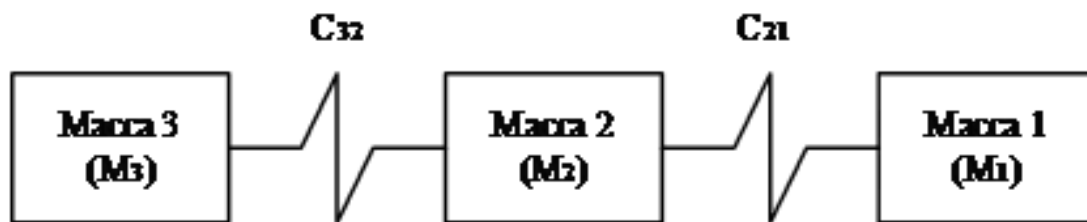


Рис. 2. Трехмассовая кинематическая схема стрелового проходческого комбайна

Кроме того, необходимо минимизировать влияние резонансных явлений между массами 2 и массами 1, где  $M_1$  - приведенная масса шасси;  $M_2$  - приведенная масса стрелы;  $M_3$  - приведенная масса рабочего органа;  $C_{21}$ ,  $C_{32}$  - упругие связи между массами.

Уравнения механических связей устанавливают соотношения между скоростями ее элементов, которые в последствии интегрируются.

Наиболее общей формой записи дифференциальных уравнений движения, являются уравнения движения в обобщенных координатах (уравнения Лагранжа) [4]

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i; \quad L = W_k - W_n,$$

где  $W_k$  - запас кинетической энергии системы, выраженный через обобщенные координаты  $q_i$  и обобщенные координаты  $\dot{q}_i$ ;  $W_n$  - запас потенциальной энергии системы, выраженный через обобщенные координаты  $q_i$  и обобщенные координаты  $\dot{q}_i$ ;  $Q_i = \delta A_i / \delta q_i$  - обобщенная сила, определяемая суммой элементарных работ  $\delta A_i$  всех действующих сил на возможное перемещение  $\delta q_i$ .  $L$  - функция Лагранжа, разность кинетической и потенциальной энергии выраженный через обобщенные координаты  $q_i$  и обобщенные координаты  $\dot{q}_i$ .

**Выводы.** Решение представленной задачи позволит снизить себестоимость производства продукции, за счет снижения затрат на потребление электрической энергии, и повышения срока службы отдельных элементов конструкции проходческого комбайна.

#### Список литературы

1. **Викторов С.Д.** Современные проблемы разрушения массивов горных пород. Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук. Постоянно действующий семинар "Физико-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых" М.: ИПКОН РАН 1999 год.
2. **Ляхомский А.В., Фашиленко В.Н.** Управление электромеханическими системами горных машин. М.: Издательство МГТУ, 2004 – 296 с.
3. **Переслегин Н.Г.** Вопросы создания электроприводов, обеспечивающих ограничение упругих деформаций в механических системах // Электротехн. пром-сть. Сер. Электропривод. – 1981. Вып. 4(84). – С. 8-11.
3. **Решетняк С.Н.** Актуальные аспекты моделирования резонансных режимов ЭМС горных машин и механизмов: Тезисы доклада «IV Міжнародної науково-практичної конференції Інформаційні технології і системи в докментознавчій сфері». Донецького національного університету. – Донецьк : ДонНУ, 2014 г. – С. 129-131.

Рукопись поступила в редакцию 29.03.16



УДК 621.311.086.5

В.П. СТЕПАНЕНКО, канд. техн. наук, доц., Московский горный институт НИТУ «МИСиС»

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ РУДНИЧНОГО ЭЛЕКТРОВОЗНОГО ТРАНСПОРТА

Рассмотрены способы повышения энергоэффективности и ресурсосбережения рудничного электровозного транспорта с использованием накопителей энергии. Определены энергоёмкость, мощность и места размещения суперконденсаторных и гибридных накопителей на рудничном электровозном транспорте. Гибридные накопители рекомендуется устанавливать на электровозах при пиковых нагрузках в 4-7 раз превышающих среднее значение. Установлено, что применение накопителей энергии позволит уменьшить расход энергии на 15-20% и снизить капитальные затраты. Большая часть, примерно 10-12%, снижения расхода энергии будет получена в системе тягового электроснабжения. Снижение капитальных затрат будет достигнуто за счет уменьшения длины контактных сетей, количества подстанций и электровозов. Потери энергии на буксование за счет увеличения жесткости характеристик рудничных электровозов можно снизить на 3-5%.

**Ключевые слова:** рудничный электровоз, коэффициент сцепления, буксование, энергоэффективность, ресурсосбережение, накопители энергии, суперконденсатор, аккумуляторная батарея.

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** В ведущих горнодобывающих странах накоплен большой опыт повышения производительности, энергоэффективности и ресурсосбережения горного локомотивного транспорта [1-14].

**Анализ исследований и публикаций.** Многочисленные исследования установили, что снижение энергоэффективности и ресурсосбережения рудничного электровозного транспорта происходит вследствие значительных потерь на буксование, неудовлетворительного состояния электровозов, вагонеток, аккумуляторных батарей, зарядных устройств, контактных сетей, рельсового пути, наличия в горных откаточных выработках завывших и волнистых профилей, а также недостаточной точности применяемых методик проектирования электровозной откатки [3,4,5,7,8,9,10].

**Изложение материала и результаты.** В настоящее время на контактной откатке средний удельный расход электрической энергии остается на уровне 120 Вт·ч/т·км, на аккумуляторной откатке - 240 Вт·ч/т·км [1,2,4,5]. Рассмотрим возможные пути повышения энергоэффективности и ресурсосбережения. В табл. 1 приведены КПД тягового электропривода и системы электроснабжения, а также потери энергии на собственные нужды и буксование.

Таблица 1

КПД и потери энергии на электровозной откатке

| КПД и потери энергии                                       | Тип электровоза |            |
|------------------------------------------------------------|-----------------|------------|
|                                                            | аккумуляторный  | контактный |
| КПД тяговых электродвигателей постоянного тока             | 82-85%          | 85-90%     |
| КПД редуктора электровоза                                  | 94%             | 95%        |
| КПД реостатной системы управления                          | 85-95%          | 70-85%     |
| КПД безреостатной системы управления                       | 93-95%          | 90-92%     |
| КПД устройств для заряда аккумуляторных батарей            | 92-97%          | -          |
| КПД тяговой подстанции (с учетом питающего трансформатора) | -               | 92-97%     |
| КПД тяговой сети                                           | -               | 80-95%     |
| КПД щелочные никель - железные                             | 13,5 %          | -          |
| КПД свинцово-кислотных батареи                             | 17%             | -          |
| ПОТЕРИ энергии на собственные нужды                        | 3%              | 4%         |
| ПОТЕРИ энергии на буксование                               | 10-21%          | 5-10%      |

В настоящее время «Основные положения по проектированию подземного транспорта новых и действующих шахт» и другие нормативные материалы в части расчетов электровозной откатки устарели и нуждаются в корректировке [11-14]. Изложенная в них методика пригодна только для прикидочных расчетов, поскольку для рудничных дизелевозов, контактных и аккумуляторных электровозов коэффициент сцепления  $\Psi$  выбирается без учета типа локомотива (см. табл. 2). Кроме типа локомотива сильное влияние на коэффициент сцепления  $\Psi$  оказыва-

ет абразивность загрязнений головок рельсов, что также не учтено в «Основные положения...». Использование в расчетах значений коэффициента сцепления  $\Psi$  из табл. 2, дает завышенное значение массы состава. При движении состава с завышенной массой на подъем потери энергии на буксование могут возрастать до 15-20 %. При выборе коэффициента сцепления из табл. 3 с учетом типа электровоза и абразивности загрязнений головок рельсов сила тяги реализуется при 1-3 % проскальзывании колес относительно рельсов и потери энергии на буксовании не превышают 2-3% [9,10].

Таблица 2

Коэффициент сцепления рудничных локомотивов, рекомендуемый для прикидочных расчетов

| Состояние рельсов                          | Коэффициент $\Psi$ |
|--------------------------------------------|--------------------|
| Покрты жидкой угольной или породной грязью | 0,07-0,08          |
| Влажные, практически чистые                | 0,09               |
| Мокрые, чистые                             | 0,12-0,13          |
| Сухие, практически чистые                  | 0,17               |
| Посыпаны песком                            | 0,18-0,24          |
| Покрты раздавленным песком                 | 0,14-0,18          |

Потенциальный коэффициент сцепления  $\Psi_0$  при максимальной силе тяги определяется из выражения:

$$\Psi_0 = F_{\max} / Q_{\text{сц}} \quad (1)$$

где  $F_{\max}$  - максимальная сила тяги на крюке локомотива, кН;  $Q_{\text{сц}}$  - сцепной вес электровоза, кН.

Рудничный локомотив передвигается по горным выработкам с поступательной скоростью  $V$  и скоростью скольжения колес относительно рельсов  $u$ . Коэффициент сцепления  $\Psi$  в этом случае вычисляется по формуле

$$\Psi = \Psi_0 (1 - \rho u), \quad (2)$$

где  $\rho$  - жесткость характеристики сцепления, с/м.

$$\rho = d\Psi / \Psi_0 du \quad (3)$$

Значения коэффициента сцепления  $\Psi_0$  в зависимости от абразивности загрязнения головок рельсов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения коэффициента сцепления  $\Psi_0$

| Загрязнения головок рельсов                           | Абразивность, Мг/км | Коэффициент $\Psi_0$ *           |                 |                        |                 |
|-------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------|-----------------|------------------------|-----------------|
|                                                       |                     | рельсы мокрые                    |                 | рельсы сухие           |                 |
|                                                       |                     | режим питания тяговых двигателей |                 |                        |                 |
|                                                       |                     | аккумуляторная батарея           | контактная сеть | аккумуляторная батарея | контактная сеть |
| Чистые рельсы                                         | -                   | 0,136                            | 0,145           | 0,191                  | 0,21            |
| Мокрая глина (туронская)                              | 10                  | 0,05                             | 0,05            | -                      | -               |
| Угли: коксующиеся Ж,ПЖ,КС,СС,КСН,К                    | 20-40               | 0,07                             | 0,07            | 0,1                    | 0,12            |
| Глинистый сланец                                      | 40-350              | 0,073                            | 0,073           | 0,091                  | 0,11            |
| Углисто-глинистый сланец, горючий сланец, бурый уголь | 800                 | 0,13                             | 0,12            | 0,17                   | 0,18            |
| Антрацит А                                            | 800-1000            | 0,145                            | 0,136           | 0,182                  | 0,191           |
| Углистые сланцы, силур С1                             | 1500                | 0,19                             | 0,2             | 0,22                   | 0,23            |
| Известняки глинистые и песчаные (силур С2)            | 2300                | 0,19                             | 0,22            | 0,19                   | 0,24            |
| Слюдисто-глинистые сланцы ОЖ (ордовик)                | 3000                | 0,24                             | 0,23            | 0,25                   | 0,26            |
| Песок из песчаницы                                    | 8000                | 0,22                             | 0,22            | 0,25                   | 0,27            |

Для электровозов, оборудованных системами плавного пуска и торможения, а также при использовании ДПТ независимого и смешанного возбуждения, значение коэффициента  $\Psi_0$  принимается на 20-25 % большим.

Уменьшения потерь на буксование можно добиться, увеличив жесткость характеристики сцепления  $\rho$ . Этого можно достичь заменой на электровозе последовательного возбуждения тяговых двигателей постоянного тока электровоза на смешанное или независимое. Необходимые для расчетов значения жесткости  $\rho$  и  $\Psi_0$  определяются опытным путем для каждого типа электровоза.

Энергоэффективность и ресурсосбережение и в значительной степени зависят от типа аккумуляторной батареи. Свинцово-кислотные аккумуляторы имеют среднее разрядное напряжение 2,1 В на элемента щелочные 1,1 В.

В табл. 4 приведены сравнительные характеристики тяговых свинцово-кислотных панцирных аккумуляторных батарей и щелочных никель-железных в пятичасовом режиме разряда.

Таблица 4

Характеристики тяговых свинцово-кислотных и щелочных никель-железных аккумуляторных батарей

| Тип аккумуляторной батареи           | Тип аккумуляторного электровоза | Среднее разрядное напряжение, В | Емкость батарей, кВтч |
|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| Свинцово-кислотная 50х7PzSL560       | АРП7                            | 101                             | 63                    |
| Никель-железная 50 ТНЖШ-550          | 4,5АРП, А5                      | 60                              | 33                    |
| Свинцово-кислотная 60 х7PzSL-805     | АМ8-600                         | 120                             | 108,6                 |
| Никель-железная 60 ТНЖШ-550          | АРП7-600                        | 72                              | 39,6                  |
| Свинцово-кислотная 72х7PzSL(430-805) | АМ8Д-900                        | 144                             | 130,32                |
| Никель-железная 72 ТНЖШ-550          | АРП7-900                        | 86,4                            | 47,5                  |
| Свинцово-кислотная 120 х7PzSL-805    | 2АМ8Д                           | 240                             | 217,2                 |
| Никель-железная 120 ТНЖШ-550         | АМ8Д-900                        | 144                             | 79,2                  |
| Свинцово-кислотная 144х7PzSL-805     | 2АМ8Д-900                       | 288                             | 260,64                |
| Никель-железная 144 ТНЖШ-550         | АРП14-900                       | 172,8                           | 95,4                  |

Анализ табл. 4 показывает, что в 5-часовом режиме разряда энергия, отдаваемая кислотными аккумуляторами, в 1,9–3,27 раза выше, чем щелочными. С учетом всех потерь приведенный к шинам переменного тока зарядных устройств КПД аккумуляторной откатки с использованием свинцово-кислотных батарей не превышает 15-17% и никель-железных - 13,5 %. Из анализа табл. 4 следует, что замена тяговых никель-железных аккумуляторных батарей свинцово-кислотными или никель-кадмиевыми повысит энергоэффективность аккумуляторной откатки не менее, чем на 3-5%. Снижение удельного расхода энергии до 110-150 Вт.ч/т.км достигается заменой двухступенчатой откатки на одноступенчатую с использованием контактно-аккумуляторных электровозов. При этом количество электровозов, аккумуляторных батарей, зарядных устройств и зарядных столов уменьшается примерно в 2 раза, срок службы аккумуляторов повышается до 7 лет [1,3,9].

У всех типов аккумуляторных батарей отдаваемая при разряде энергия зависит от температуры и величины разрядного тока.

В табл. 5 представлены характеристики аккумуляторных батарей в относительных единицах.

Таблица 5

Характеристики электрохимических накопителей энергии ЭХН

| Время разряда, ч | Отношение токов $I_p/I_{pn}$ | Отдаваемая емкость, % | Отдаваемая энергия, % | КПД процесса заряд-разряд, % |
|------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|
| 5,0              | 1,0                          | 100                   | 100                   | 42,00                        |
| 4,0              | 1,25                         | 85                    | 83,6                  | 35,1                         |
| 3,0              | 1,66                         | 70                    | 67,1                  | 28,11                        |
| 2,0              | 2,50                         | 55                    | 49,5                  | 20,7                         |
| 1,5              | 3,33                         | 47,5                  | 40,375                | 17,1                         |
| 1,0              | 5,0                          | 40                    | 28,13                 | 12,3                         |

В качестве номинального режима был выбран пятичасовой разрядный режим. Анализ табл. 5 свидетельствует, что при возрастании отношения разрядного тока аккумуляторной батареи  $I_p$

к номинальному  $I_{pn}$  от 2,5 до 5 отдаваемая энергия уменьшается от 49,5 до 28,13%, а КПД процесса заряд-разряд от 20,7 до 12,3%.

Указанные в табл. 4 и 5 значения отдаваемой при разряде энергии справедливы при температурах окружающего воздуха от +15 °С до +35 °С. Ниже температуры +15 °С отдаваемая энергия резко падает. Например, при температуре ниже минус 25 °С кпд разряда аккумуляторных батарей не превышает 5-10 %. При температуре выше плюс 55 °С аккумуляторные батареи не принимают заряд. При пиковом увеличении разрядного тока и отрицательных температурах кпд и отдаваемая энергия аккумуляторов резко уменьшаются, что является их существенным недостатком. Этого недостатка лишены конденсаторы с двойным электрическим слоем КДЭС (суперконденсаторы). В табл. 6 приведены параметры перспективного суперконденсаторного модуля МЛСК-130-57 с органическим электролитом.

Таблица 6

Параметры суперконденсаторного модуля МЛСК-130-57

| Параметр               | Величина             |
|------------------------|----------------------|
| Рабочее напряжение     | 130 В                |
| Емкость                | 57 Ф                 |
| Запасаемая энергия     | 0,5 МДж / 0,150 кВтч |
| Номинальная мощность,  | 84 кВт               |
| Максимальная мощность  | 560 кВт              |
| Масса                  | 50 кг                |
| Габаритные размеры     | 1200×450×310 мм      |
| Объем                  | 0,167 м³             |
| Рабочая температура    | - 50°С÷+65°С         |
| Степень защиты корпуса | IP65                 |
| Ресурсы, циклы         | 100 000              |
| Срок службы            | 10 лет               |
| Тип электролита        | органический         |
| Изготовитель           | ООО «ТЭЭМП», Москва  |
| Параметр               | Величина             |

Электрические схемы суперконденсаторных накопителей проще, а кпд выше, чем инерционных ИН и индуктивных накопителей энергии. Их можно использовать для поддержания на аккумуляторных батареях стабильного напряжения в течение рабочей смены электровоза. Применять гибридные накопители, состоящие из аккумуляторной батареи и суперконденсатора, рекомендуется, если пиковые значения токов нагрузки превышают средние значения не менее, чем в 5-7 раз Гибридный накопитель, предпочтительно устанавливать на аккумуляторных, контактно - аккумуляторных электровозах и на тяговых агрегатах. В системах тягового электроснабжения и на контактных электровозах использовать гибридные накопители малоэффективно. В гибридных накопителях величину энергоемкости суперконденсаторов следует выбрать не более 2-3% от общей энергоемкости накопителя [6-8]. Для приема и хранения тормозной рекуперативной энергии суперконденсаторные накопители целесообразно размещать на электровозах, в пунктах секционирования контактных сетей, на тяговых и передвижных накопительных подстанциях. В табл. 7 представлены параметры суперконденсаторов в гибридных накопителях аккумуляторных электровозов.

Таблица 7

Параметры суперконденсаторов для размещения на аккумуляторных электровозах

| Тип электровоза | Напряжение, В | Запасаемая энергия, МДж | Мощность, кВт |
|-----------------|---------------|-------------------------|---------------|
| АРП7-900        | 150-120       | 5,06                    | 280           |
| АМ8Д-600        | 150-120       | 5,06                    | 280           |
| АМ8Д-900        | 180-130       | 6,072                   | 336           |
| 2АМ8Д-600       | 300-240       | 10,12                   | 560           |
| 2×АМ8Д-900      | 360-260       | 12,144                  | 762           |
| АРП14-900       | 240-160       | 7,084                   | 393           |

Параметры суперконденсаторных накопителей энергии для размещения в системе тягового электроснабжения на накопительных и тяговых подстанциях, приведены в табл. 8.

Таблица 8

Накопители энергии для контактной электровозной откатки

| Место установки          | Диапазон рабочих напряжений, В | Запасаемая энергия, МДж | Максимальная мощность, кВт |
|--------------------------|--------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Электровозы контактные   | 540-270                        | 3,64                    | 1080                       |
| Накопительные подстанции | 540-270                        | 7,28                    | 2160                       |
| Тяговые подстанции       | 540-270                        | 14,56                   | 4320                       |

Применение накопителей энергии на контактной откатке позволит поддерживать стабильное напряжение питания на токоприемнике независимо от расстояния от тяговой подстанции, устранить броски тока, снизить искрение и износ контактных проводов и токоприемников электровозов, принимать и хранить энергию торможения, снизить капитальные затраты за счет сокращения количества тяговых подстанций и протяженности контактных сетей.

**Выводы.** Основные выводы по работе заключаются в следующем:

Применение накопителей энергии позволит уменьшить расход энергии на 15-30%.

Большая часть экономического эффекта от применения накопителей энергии будет получена в системе тягового электроснабжения за счет снижения потери электроэнергии на 10-12% в тяговых трансформаторах, преобразователях, тяговых сетях, тяговых двигателях, а также вследствие уменьшения количества подстанций и электровозов, сокращения длины контактных сетей.

Установлены способы снижения на 3-5 % потерь энергии на буксование.

Определены энергоемкость, мощность и места размещения суперконденсаторных и гибридных накопителей на рудничном электровозном транспорте.

#### Список литературы

1. Степаненко В.П., Венцлафф В., Дейнеке Р., Василенко В.И. Разработка и испытание контактно-аккумуляторных электровозов V-860. Уголь, -1986. № 12- С.32,33.
2. Синчук О.Н., Гузов Э.С., Степаненко В.П., Шахтный контактно-аккумуляторный электровоз. Горный журнал.-1988. -№6. -С.55-57.
3. Степаненко В.П., Иващенко В.В. Сравнительное исследование процессов газовой выделения из тяговых никель - железных и никель-кадмиевых батарей рудничных контактно-аккумуляторных электровозов. Научные сообщения ИГД им. Скочинского. Горная механика, рудничный транспорт, техническое обслуживание и ремонт ГШО. М. 1988, с.123-130.
4. Степаненко В.П. Особенности организации локомотивной откатки с использованием комбинированных электровозов. Научные сообщения ИГД им. Скочинского. Горная механика, рудничный транспорт, техническое обслуживание и ремонт ГШО. М. 1988, с. 130-138.
5. Степаненко В.П. Применение комбинированных (гибридных) энергосиловых установок в горной промышленности. //Горный информационно-аналитический бюллетень.- М.-. Горная книга.-2014.-№11.-С.322-328.
6. Степаненко В.П., Белозеров В.И. Применение комбинированных (гибридных) энергосиловых установок горнотранспортных машин. //Горный информационно-аналитический бюллетень.- М.-. Горная книга.-2015.-№2.-С.174-181.
7. Степаненко В.П., Сорин Л.Н. Энергоэффективность подземной локомотивной откатки с гибридными накопителями энергии//Горный информационно-аналитический бюллетень.- М.-. Горная книга.-2015.-№6.-С.135-140.
8. Степаненко В.П., Сорин Л.Н. Актуальность ресурсо- и энергосбережения на подземных рудничных локомотивах с комбинированными накопителями энергии.//Горный информационно-аналитический бюллетень.- М.-. Горная книга.-2015.-№5.-С.323-328.
9. Степаненко В.П. Электровозная откатка на урановых рудниках Советско-германского акционерного общества «Висмут».1980-1987годы. //Горный информационно-аналитический бюллетень.- 2015.- №6.-М.-С. 141-147.
10. Степаненко В. П. Исследование зависимости коэффициентов сцепления рудничных электровозов от абразивности горных пород. // Горный информационно-аналитический бюллетень.- 2015.-. №2.-М.-С.168-173.
11. Рудничный транспорт и механизация вспомогательных работ под редакцией В.М. Щадова. Каталог-справочник.М - . «Альфа Монтана».-, С.550.
12. Основные положения по проектированию подземного транспорта новых и действующих шахт. М:- ИГД им. А.А. Скочинского, 1986.- С.350.
13. Справочник по шахтному транспорту под редакцией Г.Я. Пейсаховича. И.П. Ремизова, М:-Недра, 1985.-С. 619.
14. Рудничный транспорт и механизация вспомогательных работ под редакцией Б.Ф. Братченко. М.-, Недра, 1978, С.418.

Рукопись поступила в редакцию 29.03.16

УДК 621.316.925:622.82

А.В. ПИРОЖЕНКО, канд. техн. наук, Т.В. ПИРОЖЕНКО, наук. співробітник  
НДІБПГ ДВНЗ «Криворізький національний університет»

А.А. ПЕТРИЧЕНКО, асистент, Криворізький національний університет

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ОСНОВНИХ ВИМОГ ДО ЗАСОБІВ ЗАХИСНОГО ВИМИКАННЯ КОНТАКТНИХ МЕРЕЖ ЕЛЕКТРОВОЗНОЇ ВІДКАТКИ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ ВІД ПОЖЕЖОНЕБЕЗПЕЧНИХ ДУГОВИХ ЗАМИКАНЬ**

Аналіз причин пожеж в наслідок дугових замикань в шахтних електричних мережах та електроустаткуванні показує, що біля половини з них припадає на контактну електровозну відкатку. Основною причиною критичного стану пожежної безпеки залізорудних шахт під час експлуатації електровозної відкатки слід вважати відсутність обґрунтування вимог до засобів захисного вимикання контактних мереж від пожежонебезпечних дугових замикань, що, в свою чергу, гальмує їх розробку. Відомі дослідження пожежонебезпечності контактних мереж були виконані для умов вугільних шахт і не можуть бути поширені на залізорудні шахти, де, на відміну від вугільних, контактною відкаткою транспортується велика кількість вибухових речовин і існує реальна небезпека їх займання під час аварійних ситуацій в контактній мережі. Крім того, сучасні керовані напівпровідникові тягові перетворювачі мають значно більш жорсткішу вольт-амперну характеристику, внаслідок чого збільшилось значення постійної і знизилось значення змінної складової випрямленої напруги, що призвело до зниження величин мінімального струму, здатного підтримувати горіння дуги. Для можливості проведення досліджень був розроблений спеціальний стенд, який дозволяє здійснити натурне моделювання дугових замикань. Визначені вольт-амперні характеристики електричної дуги при різних її довжинах. Встановлено, що мінімальний струм, при якому спостерігається стійке горіння дуги, складає 2-3 А при довжині дуги 5-10 мм. Досліджувались найбільш легкозаймисті матеріали, що знаходяться у відкотних виробках: промаслена бумага броньованого кабелю, дрібні дерев'яні тріски та найбільш небезпечні з точки зору займання – вибухові речовини. Отримані граничні струмочасові характеристики займання матеріалів, що випробувались. Визначена пожежонебезпечна струмочасова характеристика, сформульовані основні вимоги до засобів захисного вимикання шахтних контактних мереж від пожежонебезпечних дугових замикань.

**Ключові слова:** вимикання, захист, замикання, пожежонебезпечний, тягові перетворювачі.

**Проблема та її зв'язок з практичними завданнями.** Контактна електровозна відкатка є основним видом транспортування корисних копалин по магістральним виробкам залізорудних шахт. На гірничодобувних підприємствах чорної металургії практично 100% локомотивного парку складають контактні електровози. Протяжність шахтних контактних мереж складає всього 10...12% протяжності кабельних ліній. Однак з точки зору пожежної безпеки електровозна відкатка є найбільш небезпечною з усього підземного електроустаткування. Аналіз причин пожеж в наслідок дугових замикань в шахтних електричних мережах та електроустаткуванні показує, що біля половини з них припадає на контактну електровозну відкатку [1]. Високий рівень пожежної небезпеки відмічається і за кордоном. Так, аналіз пожеж на рудниковому транспорті в шахтах Великої Британії показав, що електровозна відкатка у два рази частіше є причиною пожеж, ніж інші види підземного транспорту [2].

Основною причиною критичного стану пожежної безпеки залізорудних шахт під час експлуатації електровозної відкатки слід вважати відсутність обґрунтування вимог до засобів захисного вимикання контактних мереж від пожежонебезпечних дугових замикань, що, в свою чергу, гальмує їх розробку.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Для виключення можливості виникнення пожеж під час дугового замикання в контактних мережах засоби захисного вимикання повинні відключати контактну мережу, що захищаються, за час, менший часу займання від теплового імпульсу дуги горючих матеріалів, що знаходяться у відкотних виробках. Цим пояснюється необхідність визначення струмочасової пожежонебезпечної характеристики, тобто залежності між величиною струму дуги і допустимого часу її існування (часу відключення дуги), протягом якого займання горючих матеріалів не відбудеться.

Крім того, для можливості розроблення засобів захисного вимикання, що виключають виникнення пожеж від контактної мережі, необхідно проведення досліджень щодо визначення достатньої їх чутливості. Для цього необхідно визначення величини мінімальних струмів, що здатні підтримувати горіння дуги від контактного проводу.

Відомі дослідження первинних критеріїв пожежонебезпечності контактних мереж, що проводились МАКНДІ [3]. Однак їх об'єм обмежувався дослідженнями тільки займанням кабелю, що

живить контактну мережу, хоча основною причиною виникнення пожеж у відкотній виробці є дугові замикання між контактним проводом, пантографом електровозу і заземленими струмовідними елементами (рейками, металевим кріпленням і т.ін.).

Найбільш повними слід вважати дослідження, які були проведені в ДПП [4]. Однак, ці дослідження були виконані для умов вугільних шахт і не можуть бути поширені на залізорудні шахти. В залізорудних шахтах, на відміну від вугільних, контактною відкоткою транспортується велика кількість вибухових речовин (ВР) і існує реальна небезпека їх займання під час аварійних ситуацій в контактній мережі. Горіння вибухових речовин супроводжується виділенням великої кількості отруйних газів, до того ж загасити вибухові речовини звичайними способами практично неможливо. Тому вибухові речовини, що транспортуються контактною відкоткою, слід розглядати як особливо небезпечні з точки зору займання.

Слід відмітити, що дослідження [4] не відповідають сучасному рівню електропостачання шахтних контактних мереж, тому що проводились при живленні контактної мережі від ртутного випрямляча типу РМ-300, які у теперішній час взагалі не використовуються. Сучасні керовані напівпровідникові тягові перетворювачі мають значно більш жорсткішу вольт-амперну характеристику, що є більш безпечним в пожежному відношенні при тих самих струмах дугового замикання. Крім того, в ртутних випрямлячах використовувалась схема трифазного випрямлення з нульовим виводом, а в сучасних перетворювачах - трифазна мостова схема. Внаслідок цього збільшилось значення постійної і знизилось значення змінної складової випрямленої напруги [5], що призвело до зниження величин мінімального струму, здатного підтримувати горіння дуги.

Отже, відомі дослідження не відповідають сучасному рівню електропостачання шахтних контактних мереж і не враховують особливості залізорудних шахт щодо транспортування електровозною відкоткою вибухових речовин.

**Постановка завдання.** Проведення експериментальних досліджень щодо визначення пожежобезпечної струмочасової характеристики дугових замикань в контактних мережах електровозної відкатки залізорудних шахт.

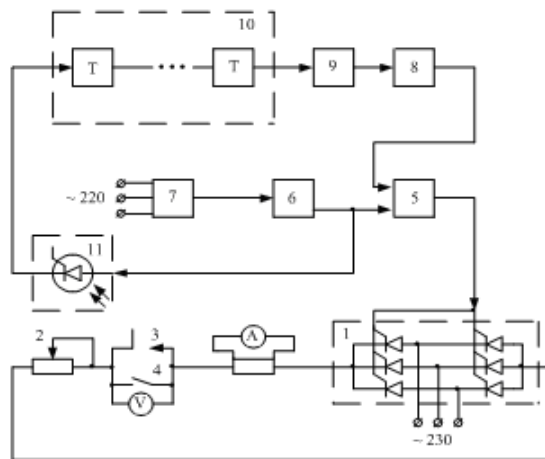
**Викладення матеріалу та результати.** Для можливості проведення досліджень був розроблений спеціальний стенд, блок-схема якого наведена на рис. 1, який дозволяє здійснити натурне моделювання дугових замикань. Живлення здійснювалось від штатного перетворювача 1 типу ВТПЕ-500-275. Струм дуги регулювався силовим змінним опором 2 при закороченому дугоутворювачі 3. Важливим моментом під час розроблення стенду був правильний вибір матеріалів дугоутворюючих електродів, тому що тільки від них залежить напруга запалювання електричної дуги [6]. Оскільки найбільш типовими дуговими замиканнями в шахтній контактній мережі є дугові замикання між контактним проводом, пантографом електровозу та заземленими струмовідними елементами (рейками, металевим кріпленням і т.ін.), моделювання дуги здійснювалось у переході мідь-сталь. Рухомий контакт дугоутворювача був виконаний з контактного проводу, а в якості нерухомого був застосований сталевий кутик, імітуючий металеве кріплення. Під час розходження контактів дугоутворювача 3 виникає дуга, що призводить до спрацювання фототиристора 11. Імпульси, що поступають від генератора імпульсів 7 через одновібратор 6 та елемент збігу 5 на електроди керування перетворювача 1, також поступають на перелічувально-імпульсний блок 10, яким задається час горіння дуги. Плавне регулювання часу горіння здійснюється блоком затримки 9.

По закінченні заданої витримки часу імпульс поступає на тригер 8, який накладає заборону на надходження імпульсів з виходу елемента збігу 5. Так здійснюється безконтактне відключення дуги по закінченні заданого часу її горіння.

Максимальний тепловий імпульс в активно-індуктивних колах має місце під час розмикання кола [7], тому моделювання дуги здійснювалось розведенням попередньо замкнутих електродів.

Отже, очікуваний струм дуги повинен визначатися величиною струму при закороченому вимикачем 4 дугоутворювачі.

Струм при закорочених контактах дугоутворювача зв'язаний зі струмом дуги наступним співвідношенням [4]



**Рис. 1.** Блок-схема випробувального стенду: 1–перетворювач ВТПЕ-500-275; 2– силовий змінний опір; 3–дугоутворювач; 4–вимикач; 5–елемент збігу; 6–одновібратор; 7–генератор імпульсів; 8–тригер; 9–блок затримки; 10–перелічувально-імпульсний блок; 11–датчик виникнення дуги

$$I_z = I_\delta \frac{U}{U - \Delta U_\delta}, \quad (1)$$

де  $I_z$  - струм при закороченому дугоутворювачі, А;  $I_\delta$  - струм дуги, А;  $U$  - напруга живлення, В;  $\Delta U_\delta$  - падіння напруги в дузі, В.

Для визначення струму дуги необхідно знати її вольт-амперні характеристики в переході мідь-сталь при різних відстанях між електродами дугоутворювача та його живленні від тягового перетворювача типу ВТПЕ-500-275, які до теперішнього часу не були визначені.

Кореляційний аналіз значень падінь напруги в дузі і відповідних струмів дуги [8] дозволив встановити регресивну вольт-амперну залежність, яка визначається виразом

$$\Delta U_\delta = \frac{A}{I_\delta^2} + \frac{B}{I_\delta} + C. \quad (2)$$

Значення постійних коефіцієнтів, обчислених методом найменших квадратів, та індекси корекції при різних довжинах дуги, наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Значення постійних коефіцієнтів

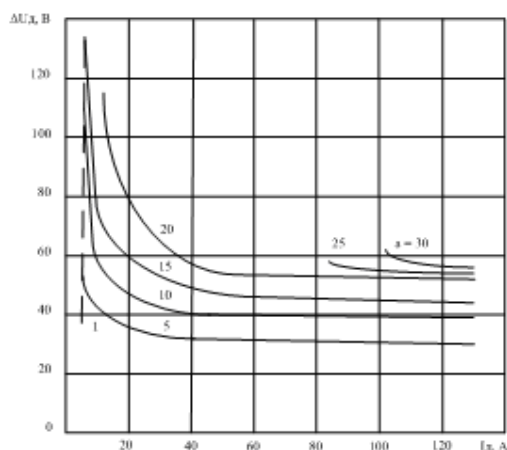
| Довжина дуги,<br>мм | Постійні коефіцієнти |         |        | Індекс<br>кореляції |
|---------------------|----------------------|---------|--------|---------------------|
|                     | A                    | B       | C      |                     |
| 5                   | -29,19               | 72,95   | 30,05  | 0,992               |
| 10                  | 22,58                | 175,05  | 37,21  | 0,998               |
| 15                  | 1366,1               | 278,62  | 38,98  | 0,998               |
| 20                  | 3947,1               | 516,9   | 43,83  | 0,990               |
| 25                  | 404610               | 6684,6  | 78,91  | 0,956               |
| 30                  | 1112530              | 16381,4 | 114,98 | 0,996               |

Індекси кореляції отриманих регресивних залежностей близькі до одиниці, що свідчить про високу ступінь щільності зв'язку між значеннями падіння напруги в дузі і відповідними струмами дуги.

На рис. 2 за виразом (2) побудовані вольт-амперні характеристики електричної дуги при різних її довжинах. Вони мають явно визначений нелінійний характер при струмах дуги менше за 60 А. По вольт-амперній характеристиці визначались падіння напруги в дузі і після цього за виразом (1) вираховувався струм при закороченому дугоутворювачі, який необхідно виставити для отримання заданого значення струму дуги.

Як видно з рис. 2, мінімальний струм, при якому спостерігається стійке горіння дуги, складає 2-3 А при відстані між електродами дугоутворювача (довжині дуги) 5-10 мм. Крива 1 являє собою залежність граничних мінімальних струмів дуги і відповідних падінь напруги, при який дуга горить стійко.





**Рис. 2.** Вольт-амперні характеристики електричної дуги: 1 - граничні мінімальні струми дуги, здатні підтримувати її горіння;  $a$  - довжина дуги, мм

При менших струмах спостерігається обрив дуги. При відстані між електродами дугоутворювача 25 та 30 мм дуга займається при значно більших струмах (85 А та 110 А відповідно) і характеризується значною нестійкістю, а при відстані більш за 30 мм має місце обрив дуги в усьому діапазоні струмів. Тому дослідження проводились при довжині дуги 20 мм. При малих струмах дуги, коли при відстані між електродами дугоутворювача 20 мм відбувався обрив дуги, дослідження проводились при довжині дуги 10-15 мм.

Досліджувались найбільш легкозаймисті матеріали, що знаходяться у відкотних виробках: промаслена бумага броньованого кабелю [9], дрібні дерев'яні тріски та найбільш небезпечні з точки зору займання - ВР.3 ВР, що застосовуються в шахтах, випробувались на займання ВР, які найбільш часто застосовуються під час масових вибухів та транспортуються контактними електровозами - Україніт - АНФО, грануліт - К та граммоніт 79/21. Дослідження проводились при мінімально можливій відстані між дугою та зразками, що випробувались (1,5-2 мм), та останні розташовувались над дугою. ВР, в наслідок того, що їм властива сипучість, розташовувались на тій же відстані під дугою. Граничними вважались такі співвідношення між струмом дуги і часом її горіння, при яких не відбувається займання, але незначне збільшення одного з параметрів призводить до займання зразків матеріалів, що випробувались. Повторні включення при тих самих значеннях струму дуги і часу її горіння складали не менше 100 при струмах дуги до 800 А и не менше 50 при струмах дуги більше 800 А, що забезпечить достовірність не займання 0,99 та 0,98 відповідно [10].

Кореляційний аналіз співвідношень значень струмів дуги і відповідних їм граничних пожежобезпечних значень часу горіння дуги дозволив встановити регресивну пожежобезпечну струмочасову залежність, обчислену методом найменших квадратів, яка визначається виразом

$$I_d = \exp[A \exp(B \ln^2 t_d + C \ln t_d)], \quad (3)$$

де  $t_d$  - граничне пожежобезпечне значення часу горіння дуги, с.

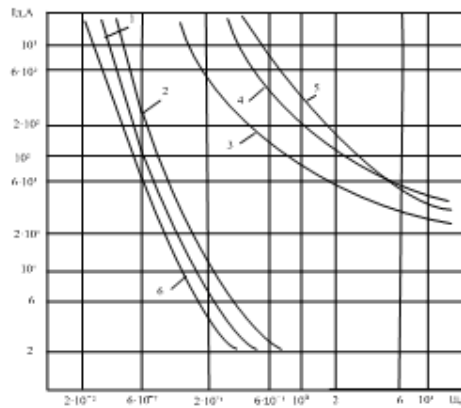
В табл. 2 наведено значення коефіцієнтів  $A, B, C$  для матеріалів, що досліджувались. При цьому індекс кореляції регресивних залежностей складає не менше 0,983.

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів  $A, B, C$

| Постійні коефіцієнти | Промаслена бумага кабелю | Дрібні дерев'яні тріски | Граммоніт 79/21 | Україніт-АНФО | Грануліт-К | Пожежобезпечна характеристика |
|----------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------|---------------|------------|-------------------------------|
| A                    | 10,40                    | 27,14                   | 36,08           | 115,41        | 21,31      | 11,41                         |
| B                    | -0,123                   | -0,058                  | 0,015           | 0,010         | 0,0007     | -1,124                        |
| C                    | -0,328                   | -0,134                  | -0,372          | -0,670        | -0,183     | -0,239                        |

На рис. 3 наведено в логарифмічних координатах граничні струмочасові характеристики займання промасленої бумаги броньованого кабелю (крива 1), дрібної дерев'яної тріски (крива 2), граммоніту 79/21, україніту - АНФО та грануліту - К (криві 3,4,5 відповідно), побудовані за виразом (3).



**Рис. 3.** Граничні струмочасові характеристики: 1 – промасленої бумаги броньованого кабелю; 2 – дерев'яної тріски; 3,4,5 – граммоніту 79/21, Україніту-АНФО, грануліту-К відповідно; 6 – пожежобезпечна

Як видно з рис. 3, при струмах дугового замикання більше 1000 А час займання промасленої бумаги броньованого кабелю складає 30 мс, дерев'яної тріски - 40 мс, ВР - не менше 100 мс.

Найбільш легкозаймистим матеріалом є промаслена бумага броньованого кабелю, тому струмочасова характеристика засобів захисного вимикання шахтних контактних мереж повинна бути не вище характеристики 1.

В якості пожежобезпечної струмочасової характеристики слід рекомендувати характеристику 6, яка отримана шляхом введення півторакратного запасу за часом існування дуги відносно характеристики 1.

Таким чином, в результаті експериментальних досліджень визначені наступні основні вимоги щодо засобів захисного вимикання шахтних контактних мереж від пожежонебезпечних дугових замикань:

струм дугового замикання, що повинен вимикатися, складає 2 А, тобто опір спрацювання при номінальній напрузі контактної мережі повинен бути не менше 140 Ом;

час відключення контактної мережі може бути залежним від величини струму дугового замикання у відповідності з отриманою пожежобезпечною струмочасовою характеристикою;

у разі незалежного часу відключення засобів захисного вимикання повний час відключення контактної мережі не повинен перевищувати 20 мс.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Отримана експериментальна струмочасова пожежобезпечна залежність визначає основні вимоги до засобів захисного вимикання, реалізація яких унеможливило б займання при виникненні дугових замикань в відкотних виробках залізрудних шахт.

Подальші дослідження повинні бути направлені на розроблення засобів захисного вимикання шахтних контактних мереж, які відповідають визначеним вимогам.

### Список літератури

1. Пироженко А.В. К вопросу защиты шахтных контактных сетей от пожароопасных утечек тока // Безопасность и надежность электроснабжения горнорудных предприятий: Тез. докл. и сообщ. III Всесоюзной научн. – техн. конф., 13-15 окт. 1982г. – Днепропетровск, 1982.- С.68-70.
2. Alcook K. Safe high speed underground transport.// The Mining Engineer. - 1985. v. 144, № 284.- P. 638- 643.
3. Сумин И.Ф. Повышение пожарной безопасности рудничных тяговых сетей.- В кн.: Техника безопасности в угольной промышленности.- М.: Госгортехиздат, 1963, С.214-217.
4. Сидоренко И.Г. Токовременные характеристики защиты рудничных тяговых сетей от токов короткого замыкания и утечки, опасных в пожарном отношении. – Горная электромеханика и автоматика. 1967, С.19-27.
5. Славик И. Конструирование силовых полупроводниковых преобразователей: Пер. с чешск. - М.: Энергоатомиздат, 1989.-222с.
6. Ерыгин А.Т., Трембицкий А.Л., Яковлев В.П. Методы оценки искробезопасности электрических цепей. - М.- Наука, 1984.-222с.
7. Буткевич Г.В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей.- М.: Высшая школа: 1967.- 195с.
8. Езекиэл М., Фокс К.А. Методы анализа корреляций и регрессий: Пер. с англ.- М.: Статистика, 1966.- 342с.
9. Смелков Г.И. Пожарная опасность электропроводок при аварийных режимах.- М.: Энергоатомиздат, 1984.- 184 с.
10. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных: Пер. с англ. - М.: Мир, 1980. - 610с.

Рукопис подано до редакції 22.03.16

УДК 621.316.728

Л.Г. ЕВТУШЕНКО., магістрант, О.В. БЯЛОБРЖЕСЬКИЙ, канд. техн. наук, доц.  
Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського

## КОМБІНОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ З КОМПЕНСАЦІЄЮ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У ВУЗЛІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

В роботі на підставі аналізу теоретичних підходів і технічних рішень, викладених у відомих публікаціях, поставлена задача розробки схеми управління асинхронним генератором. Генератор входить до складу комплексу з автономним інверторним перетворювачем, що забезпечує підтримку реактивного струму генератора (збудження), конденсаторним накопичувачем, інвертором веденим мережею для управління віддачею активної потужності. Обґрунтовано використання мережевого перетворювача (інвертора веденого мережею) комплексу генерації енергії для управління потоком активної і неактивної складових потужності, що призводить до зниження рівня неактивної потужності у вузлі мережі. Відзначено, що отримана структура системи має певну симетрію щодо конденсаторного накопичувача, як з графічної позиції, так і з позиції напрямки перетворення енергії реактивного характеру.

**Ключові слова:** асинхронний генератор, інверторний перетворювач, регулювання активної та реактивної потужностей, р-q теорія

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами.** Асинхронні генератори є одним з різновидів механічного та електромеханічного пристрою, що перетворює енергію двигуна автономної електростанції в електричну енергію. Робота асинхронного генератора побудована на принципі обертання ротора в одному напрямку з магнітним полем, але з більшою швидкістю. В результаті на валу генератора утворюється гальмуючий момент через негативне ковзання ротора, завдяки чому і відбувається вироблення електроенергії [1].

До основних переваг асинхронних генераторів відносять низький коефіцієнт гармонік, який є одним з показників нерівномірності обертання і, як наслідок, марного нагріву машини. Так, зокрема, якщо у синхронних генераторів коефіцієнт гармонік може досягати 15 %, то у асинхронних аналогів даний показник дуже рідко перевищує 2 %. Крім цього дані рішення практично не мають обертових обмоток і електронних деталей, які, як правило, завжди першими виходять з ладу. Завдяки цьому асинхронні генератори відрізняються високою надійністю і тривалим терміном служби [2].

**Аналіз досліджень та публікацій.** Для збудження автономно працюючого АГ необхідна наявність джерела реактивної потужності - батареї конденсатора або синхронного компенсатора, підключених до обмотки статора. При цьому майже природною представляється робота АГ при надсинхронному ковзанні [2], коли швидкість обертання ротора вище швидкості обертового магнітного поля. Проте практично АГ може збуджуватися при частоті обертання ротора, значно менше синхронної, причому значення напруги і частоти струму виявляються пропорційними частоті обертання ротора, і крім того, залежними від схеми з'єднання конденсаторів [3].

В останні роки набули застосування електромашинні джерела енергії з АГ, збуджуваними за допомогою вентильних перетворювачів, наприклад, автономних інверторів напруги, або працюють в режимі самозбудження із застосуванням конденсаторів або з використанням акумуляторної батареї.

Це визначається величиною залишкової ЕРС, яка не повинна бути менше порогових напруг елементів перетворювача [4,5]. Обов'язковою умовою сталого самозбудження АГ є певна швидкість зниження частоти імпульсів управління, що подаються на транзистори, при входженні в область самозбудження.

Слід зазначити, що використання інверторної схеми дозволяє підтримувати режим збудження асинхронного генератора та певний рівень віддачі активної потужності. Для віддачі енергії до мережі використовуються інвертори які веде мережа [6-8].

Наявність в структурі генеруючої установки напівпровідникових трифазних перетворювачів для організації та підтримки режиму генерації енергії до мережі я підґрунтям для вирішення задачі підвищення якості електричної енергії у вузлі до якого підключена генеруюча установка [7].

**Постановка задачі.** Розробка структури електроенергетичного комплексу з асинхронним генератором для забезпечення компенсації неактивних складових потужності вузла електричної мережі.

**Матеріали та результати дослідження.** На рис. 1 наведено блок-схему електротехнічного комплексу. Первинний двигун 1 розкручує ротор асинхронного генератора 4, швидкість обертання ротора контролюється датчиком швидкості 2, причому максимальна величина швидкості

обмежується за допомогою системи керування швидкістю 3, на входи якої поступають сигнали з датчика швидкості 2,  $\omega$  і заданої кутової швидкості  $\omega^{ref}$ . Електричну енергію асинхронного генератора 4 передають на генераторний перетворювач 7.

Контролюють датчиками 5 струми фаз генератора  $i_{abc,gn}$ . Координатним перетворювачем струму 17 виконують перетворення Парка

$$i_x = \frac{2}{3} \left[ i_a \cos \theta + i_b \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right]; i_y = \frac{2}{3} \left[ i_a \sin \theta + i_b \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right].$$

Передають струм  $i_{xy,gn}$  з координатного перетворювача струму 17 на блок керування вектором поля 22. Розраховують в системі керування швидкістю 6 електромагнітний момент асинхронного генератора  $\hat{I}_{\bar{A}}$ .

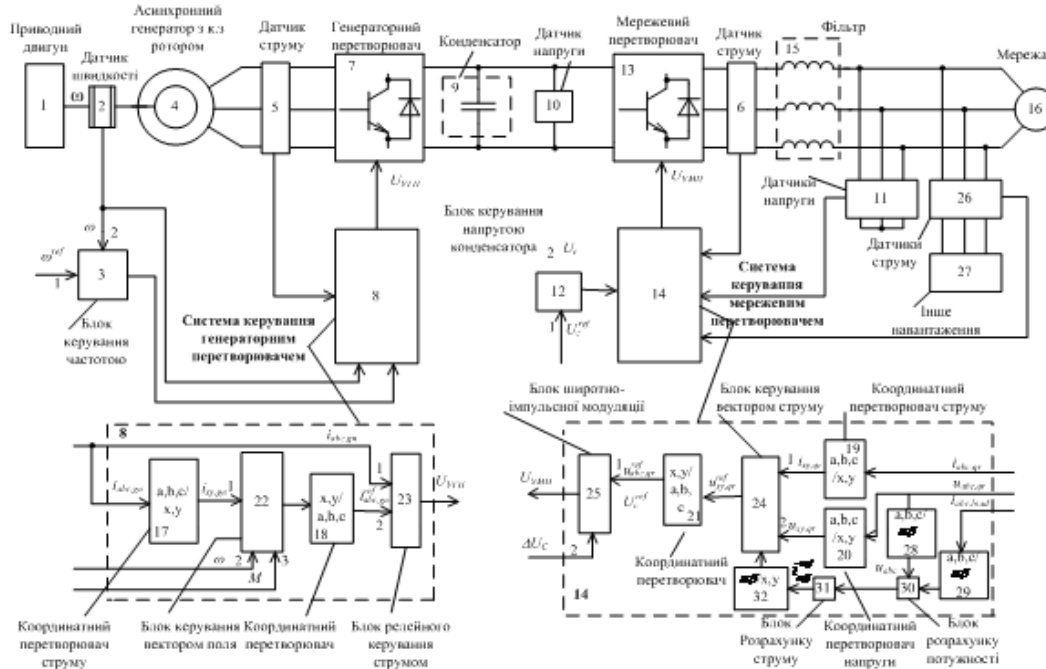


Рис. 1. Блок-схема генеруючої установки з автоматичною системою

В системі керування швидкістю розраховують різницю заданої кутової швидкості  $\omega^{ref}$  та поточної кутової швидкості  $\omega$  -  $\Delta\omega = \omega^{ref} - \omega$ . Електромагнітний момент асинхронного генератора

$$\hat{I}_{\bar{A}} = k_{op} \cdot \Delta\omega,$$

де  $k_{op} = (J L_r k_{an}) / (3 z_p L_m k_{ao} \dot{O}_{en})$ ;  $J$  - момент інерції приведений до валу асинхронного генератора;  $L_r$  - індуктивність ротора;  $L_m$  - індуктивність намагнічування генератора;  $k_{an}$  - коефіцієнт передачі датчика струму;  $\dot{O}_{en}$  - мала некомпенсована постійна часу контуру швидкості;  $z_p$  - число пар полюсів двигуна;  $k_{ao}$  - коефіцієнт передачі датчика швидкості.

Розраховують задану пряму проекцію вектора струму генератора за віссю  $x$  в блоці 21 покладаючи потокозчеплення ротора,  $\psi_r = const$ ,  $i_{x,gn}^{ref} = \psi_r / L_m$ . Розраховують струм намагнічування в блоці 22 за реактивною складовою струму  $i_y$ ,  $i_\mu = i_y \cdot L_m$ , ортогональну проекцію вектора струму генератора за віссю  $y$  в блоці 22

$$i_{y,gn}^{ref} = \frac{2 M_{\bar{A}} L_r}{3 \psi_r \cdot z_p \cdot k_r L_m}$$

Розраховують поточне положення ротору в блоці 22

$$\theta = \int (\omega_r \cdot k + L_m \cdot i_x / T_r \cdot \psi_r) dt$$

де  $\omega_r$  - частота обертання вектору потокозчеплення ротора;  $i_x$  - активна складова струму;  $k$  - коефіцієнт зв'язку струму потокозчеплення;  $T_r = L_r / R_r$  - постійна часу роторного кола.

Координатним перетворювачем 18 виконують зворотне перетворення поточних струмів  $i_{x,gn}^{ref}$ ,  $i_{y,gn}^{ref}$

$$i_{a,gn}^{ref} = i_{x,gn}^{ref} \cos(\theta) - i_{y,gn}^{ref} \sin(\theta); i_{b,gn}^{ref} = i_{x,gn}^{ref} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) - i_{y,gn}^{ref} \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}); i_{c,gn}^{ref} = -(i_{a,gn}^{ref} + i_{b,gn}^{ref}).$$

У блоці релейного керування струмом 23 розраховують різницю поточного струму  $i_{abc,gn}$  та заданого струму  $i_{abc,gn}^{ref}$  для відповідних фаз  $\Delta i = i_{abc,gn}^{ref} - i_{abc,gn}$ .

Визначають рівень вихідної напруги керування транзисторами верхнього та нижнього плеча генераторного перетворювача 7 по фазі  $a$ -

$$U_{VT,a}^{HI} = \begin{cases} 1 & \text{якщо } \Delta i > i_{band}; \\ 0 & \text{якщо } \Delta i < i_{band}, \end{cases} \quad U_{VT,a}^{LO} = \begin{cases} 1 & \text{якщо } \Delta i < -i_{band}; \\ 0 & \text{якщо } \Delta i > i_{band}. \end{cases}$$

Аналогічно визначають рівні напруги керування транзисторами верхнього та нижнього плеча генераторного перетворювача за фазами  $b$ , і  $c$ .

На генераторний перетворювач 7 від системи керування генераторним перетворювачем 8 передають напруги управління генераторним перетворювачем ( $U_{VT,a}^{HI}$ ,  $U_{VT,a}^{LO}$ ,  $U_{VT,b}^{HI}$ ,  $U_{VT,b}^{LO}$ ,  $U_{VT,c}^{HI}$ ,  $U_{VT,c}^{LO}$ ) забезпечуючи рівень реактивної потужності в генераторі, та передачу активної потужності до конденсатора 9.

Контролюють датчиком 10 напругу конденсатора 9. В системі керування напругою конденсатора 12 розраховують різницю поточної напруги конденсатора  $u_c$  і заданої напруги конденсатора  $u_c^{ref}$   $\Delta u = u_c^{ref} - u_c$ . Корегують сигнал помилки та визначають струм  $i_y^{ref} = \Delta u \cdot k$ .

Контролюють датчиком 6 струми фаз мережі  $i_{abc,gr}$ , датчиком 11 контролюють напругу фаз мережі  $u_{abc,gr}$ . Координатним перетворювачем струму 19 виконують перетворення Парка, аналогічно формулам (1)-(2). Координатним перетворювачем напруги 20 здійснюють перетворення напруги

$$e_{x,gr} = \frac{2}{3} \left[ u_a \cos \theta_{gr} + u_b \cos(\theta_{gr} - \frac{2\pi}{3}) + u_c \cos(\theta_{gr} + \frac{2\pi}{3}) \right]; e_{y,gr} = \frac{2}{3} \left[ u_a \sin \theta_{gr} + u_b \sin(\theta_{gr} - \frac{2\pi}{3}) + u_c \sin(\theta_{gr} + \frac{2\pi}{3}) \right].$$

На підставі вимірних значень струмів та напруг мережі над якими виконано перетворення Парка, з урахуванням заданих проекцій вектора струму мережі  $i_{xy,gr}^{ref}$  та поточних проекцій вектора напруги  $e_{xy,gr}$  визначають задані проекції вектора напруги мережевого перетворювача в блоці керування вектором струму 24

$$u_{x,gr}^{ref} = e_{x,gr} + ((i_{x,gr}^{ref} - i_{x,gr}) \cdot k_{ep} - i_{y,gr}^{ref} \cdot j\omega L_{ly}); u_{y,gr}^{ref} = e_{y,gr} + ((i_{y,gr}^{ref} - i_{y,gr}) \cdot k_{ep} + i_{x,gr}^{ref} \cdot j\omega L_{lx}),$$

де  $k_{ep} = \frac{k_{\dot{a}\dot{o}} T_r}{2T_{\dot{a}\dot{o}} L_m \omega_{\psi \max}}$ ;  $T_r$  - постійна часу фільтра мережі 15;  $L_m$  - індуктивність фільтра 15 мережі;  $\omega_{\psi \max}$  - граничне значення частоти мережі;  $k_{\dot{a}\dot{o}}$  - коефіцієнт передачі датчика струму 6 мережі;  $T_{\dot{a}\dot{o}}$  - мала некомпенсована постійна часу контуру.

Виконують зворотне перетворення координат в блоці 21 заданої напруги  $u_{xy,gr}^{ref}$  з  $(x,y)$  координат в  $(a,b,c)$

$$u_{a,gr}^{ref} = u_x \cos \theta_{gr} - u_y \sin \theta_{gr}; u_{b,gr}^{ref} = u_x \cos(\theta_{gr} - \frac{2\pi}{3}) - u_y \sin(\theta_{gr} - \frac{2\pi}{3}); u_{c,gr}^{ref} = -(u_a + u_b).$$

Передають напругу мережі  $u_{abc,gr}^{ref}$  на перший вхід блоку широтно-імпульсної модуляції 25, на другий вхід передають задану напругу конденсатора  $u_c^{ref}$ . В блоці широтно-імпульсної модуляції 25 формують опорну напругу

$$U_{carr} = -\frac{2}{\pi} \arctg \left[ \operatorname{tg} \left( t_{\text{mod}} \cdot 2\pi \cdot t - \frac{\pi}{2} \right) \right]$$

Визначають рівень вихідної напруги керування транзисторами мережевого перетворювача 13 по фазі  $a$

$$U_{out.a} = \begin{cases} 1 & \text{і} \text{ } \delta \text{ } U_{carr} > U^{ref} \\ 0 & \text{і} \text{ } \delta \text{ } U_{carr} < U^{ref} \end{cases}$$

Аналогічно визначають рівні напруги керування транзисторами мережевого перетворювача за фазами  $b$ , і  $c$ . На мережевий перетворювач 13 від системи керування мережевим перетворювачем 14 передають напруги управління мережевим перетворювачем, забезпечуючи передачу активної потужності до мережі та здійснюючи компенсацію реактивної потужності мережі. Фільтр 15 знижує вплив вищих гармонік струму і напруги які віддаються в мережу 16.

Датчики струму 26 і датчик напруги 11 знімають показання навантаження 22 та передають на координатний перетворювач 28, 29. Реалізують пряме перетворення у векторно-матричний формі запису

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}.$$

В блоці 31 розраховують потужність. Стратегія управління мережевим перетворювачем заснована на теорії  $p$ - $q$  [7]. Компоненти активної  $p$  та неактивної  $q$  потужностей отримують

$$p = u_\alpha \cdot i_\alpha + u_\beta \cdot i_\beta, \quad q = u_\beta \cdot i_\alpha - u_\alpha \cdot i_\beta,$$

Регулювання коефіцієнта потужності перетворювача здійснюють шляхом формування певного співвідношення між заданими значеннями активної і реактивної складових вхідного струму  $(i_x^{ref}, i_y^{ref})$ . При  $i_y^{ref} = 0$  випрямляч обмінюється з мережею тільки активною енергією.

Блок орієнтації виконує обчислення параметрів мережевої напруги  $U_g, \omega_u, \varphi_u$  за результатами вимірювання миттєвих значень напруг у фазах мережі, а також здійснює перетворення вхідних струмів в координатну систему  $x, y$ , орієнтовану по вектору мережевої напруги.

Компоненти потужності згенеровані мережевим перетворювачем  $p_x$  і  $q_x$ , включають складові необхідні для компенсації гармонік, несиметрії і реактивної потужності, а також енергію доступну від первинного двигуна

$$p_x = p_{res} - p_{reg} + \tilde{p}; \quad q_x = \bar{q}_{res} + q$$

В блоці 31 з урахуванням параметрів обчислюється струм в  $\alpha$ - $\beta$  координатах

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ -u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_x \\ q_x \end{bmatrix},$$

де  $u^2 = u_\alpha^2 + u_\beta^2$  – діюче значення напруги.

$$i_{c\alpha} = \frac{1}{u^2} (u_\alpha \cdot p + u_\beta \cdot q); \quad i_{c\beta} = \frac{1}{u^2} (-u_\alpha \cdot q + u_\beta \cdot p).$$

Узагальнений вектор можна представити в обертовій системі координат 32. Якщо вектор струму представлений в нерухомій системі координат  $\alpha - \beta$ , то перехід до нової системи координат  $x - y$ , розгорнутої щодо вихідної на деякий кут  $\theta$ , здійснюється з співвідношення аргументів комплексних чисел у вигляді

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix}.$$

Роботу комплексу досліджено (рис. 2) при наступних параметрах силової частини:

Асинхронний генератор з короткозамкненим ротором: активний опір статора - 0,087 Ом; індуктивний опір статора - 0,8 мГн; активний опір ротора - 0,228 Ом; індуктивний опір ротора - 0,8 мГн; індуктивність намагнічування - 34,7 мГн; число полюсів - 4; момент інерції - 0,1 кг·м<sup>2</sup>. Конденсатор: ємність - 1 мФ; первісна напруга конденсатора - 750 В; Вихідний струм (1-

вихідний струм; 0 - немає струму на виході) - 0. Трифазний фільтр: опір на фазу - 3,87 мОм; індуктивність на фазу - 2 мГн. Мережа: напруга мережі - 250 В; частота мережі - 50 Гц.

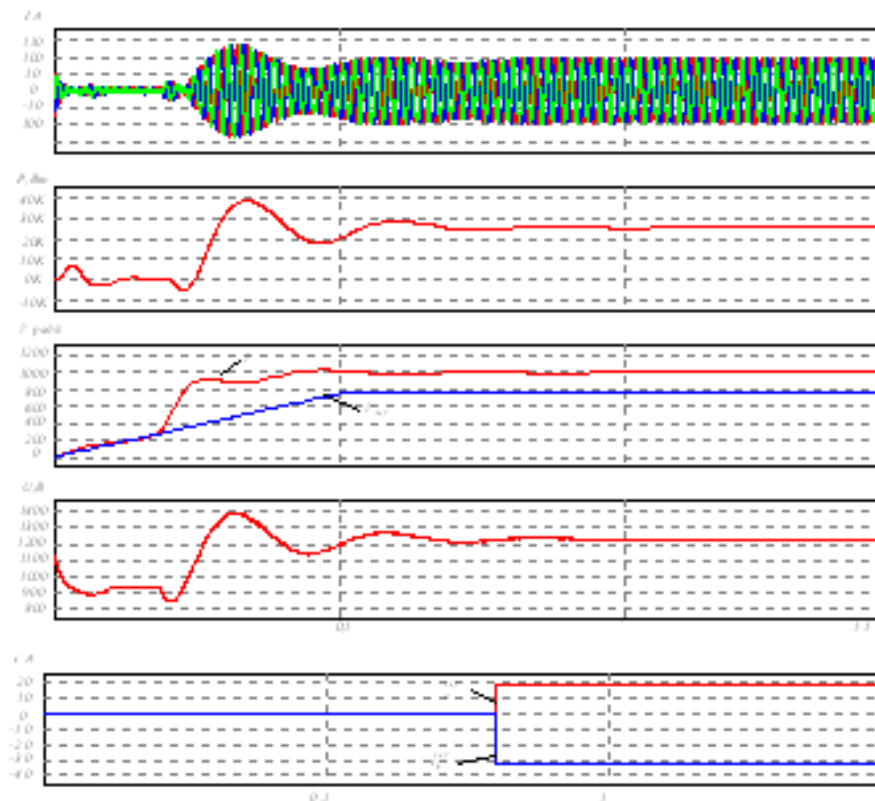


Рис. 2. Результати моделювання режиму електротехнічного комплексу

**Висновки та напрям подальших досліджень.** Обґрунтовано використання мережевого перетворювача комплексу генерації енергії на базі асинхронного генератора для керування потоком активної та неактивної складових потужності для зниження рівня неактивної потужності у вузлі мережі. Отримана структура системи має певну симетрію відносно конденсаторного накопичувача, як з графічної позиції, так і з позиції напрямку перетворення енергії реактивного характеру.

Розроблена структура системи керування мережевим перетворювачем відповідно до основних положень  $p$ - $q$  теорії, яка, шляхом формування складової реактивного струму у каналі управління, забезпечує режим мережевого перетворювача, який додатково забезпечує компенсацію неактивних складових потужності вузла мережі.

#### Список літератури

1. Асинхронные генераторы [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.allgen.ru/press/articles/show/63>
2. **Середа Д.С.** Порівняння робочих характеристик генератора постійного струму та асинхронного генератора та узгодження їх з характеристиками вітротурбін лабораторної установки / **Д.С. Середа, О.В. Бялобжеський** // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Науково-виробничий журнал XIV Міжнародної науково-технічної конференції "Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика". 14-16 травня 2013 р. – Кременчук, КрНУ, 2013. – С. 123-127.
3. **Кривцов В.С.** Неисчерпаемая энергия, Книга 1 «Ветроэлектрогенераторы» / **В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев.** – Харьков : «ХАИ», 2003. – 400 с.
4. **Марков. А. М.** Система статорного возбуждения асинхронного генератора / **А. М. Марков, В. В. Замаруев, В. В. Ивахно. К.:** Технічна електродинаміка, 2000. – 230 с.
5. **Торопцев Н. Д.** Асинхронные генераторы для автономных электрических установок / **Н. Д. Торопцев.** – М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2004. – 86 с.
6. **Твайделл Дж.** Возобновляемые источники энергии: Пер. с англ. / **Дж. Твайделл.** – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.
7. **Akagi H.** Instantaneous power theory and applications to power conditioning / **H. Akagi, E.H. Watanabe, M. Aredes.** – Hoboken, New Jersey, USA: IEEE press, 2007. – 379 p.
7. **Виноградов А.Б.** Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. Ленина. - Иваново, 2008. - 298 с.

Рукопис подано до редакції 21.03.16



УДК 311.1

Т.М. БЕРІДЗЕ, канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «Запорізький національний університет»

**ФОРМУВАННЯ ПРИНЦИПІВ І ФУНКЦІЙ СТРАТЕГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ В СИСТЕМІ СТРАТЕГІЧНОГО УПРАВЛІННЯ ПІДПРИЄМСТВОМ**

В статті наведені основні засади формування принципів і функцій стратегічного моніторингу в системі стратегічного управління підприємством. Зазначені функції та принципи, яким повинен відповідати стратегічний моніторинг, дозволяють окреслити основні завдання щодо формування стратегічного моніторингу в системі стратегічного управління підприємством.

**Ключові слова:** стратегічний моніторинг, управління, принципи, функції, стратегія

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Перехід українських гірничорудних підприємств до стратегічних інструментів планування і контролю передбачає удосконалення інформаційно-аналітичного забезпечення управлінського процесу. Управління як домінуюча стратегія розвитку українського промислового бізнесу на теперішній час поступово відходить на другий план, і все більше підприємств розглядає стійкий розвиток в якості стратегічної мети конкурентної поведінки.

Існуючі методи фінансового, управлінського та техніко-економічного аналізу і контролю не завжди адекватно вбудовані в механізм стратегічного управління, а саме планування та контролю, що істотно звужує сферу їх застосування, а також не дає можливості максимально оперативного реагування на зміни факторів внутрішнього та зовнішнього середовища бізнесу. Занадто велика кількість спостережень обернеться для підприємства необґрунтованими витратами, оскільки дані для ухвалення управлінського рішення за результатами моніторингу будуть надлишковими. Недостатня область спостережень призведе до інформаційного дефіциту і неповного обліку всіх чинників в ході генерації управлінських рішень. Отже, для проведення ефективного моніторингу необхідно оптимізувати поле спостереження. Використання інтегрованих показників дозволить визначити економічний стан підприємства, його конкурентний статус, що забезпечить використання дієвих управлінських рішень.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Стратегічний аналіз та статистичний моніторинг дають спільні цільові установки, але не вирішують ряд питань, що не дозволяє використовувати їх в роботі ефективного механізму проведення стратегічних досліджень. Спроби поєднання стратегічного аналізу з динамікою процесу спостережень, що забезпечується моніторингом, можна зустріти у роботах зарубіжних та вітчизняних теоретиків управління І. Ансоффа, Е.І. Велеско, В.А. Вінокурова, Дж. Гелбрейта, П. Друкера, К. Ендрюса, В. С. Єфремова, Б. Карлофа, Е. Мюррея, А. Томпсона, Д. Натансона, Дж. Сейнера, Ч. Хоффера, В. Д. Маркової, К. І. Редченко та інших [1-7].

Дослідники, які займаються проблемами економічних вимірювань називають велике число найрізноманітніших вимог: загальних і конкретних, формальних і змістовних, до моделі побудови статистичних показників в цілому і до її окремих параметрів. Відсутність єдиного підходу до конструювання показників призводить до того, що кожен дослідник формує свій набір вимог.

Питання побудови організаційно-економічних та організаційно-управлінських механізмів формування та реалізації стратегії залишаються малодослідженими. У структурі таких механізмів формування та реалізації стратегії розвитку підприємства чільне місце належить концепції стратегічного моніторингу (СМ). Тобто поєднання складових статистичного моніторингу, управлінських механізмів, методів, моделей засобів прийняття ефективних управлінських рішень дають підґрунтя для формування нового напрямку - системи стратегічного моніторингу в системі стратегічного управління підприємством.

**Постановка завдання.** Складність внутрішньої організації, а також управління економічною системою підприємства обумовлюють додаткові вимоги до моніторингу, а саме: достовірність моніторингу - використання інформаційних даних і системи моніторингових показників (індикаторів), що характеризують досліджуване явище, найбільш повно і достовірно; оперативність - орієнтація на скорочення збору і обробки інформації з метою прийняття екстрених управлінських рішень, якщо того вимагає складна економічна ситуація на підприємстві; систематичність - здійснення моніторингу протягом більш або менш тривалого терміну з певними інтервалами збору інформації. Перелічені вимоги зумовлюють необхідність визначення основ-



них принципів і функцій стратегічного моніторингу в системі стратегічного управління підприємством.

**Викладення матеріалу та результати.** Як свідчить практика, широке використання системи моніторингу на багатьох підприємствах різних галузей в значній мірі стримується відсутністю точного переліку послідовних дій з боку керівництва по його реалізації, тобто відсутністю алгоритму проведення економічного моніторингу [8, с. 111]. Тому, при формуванні системи показників стратегічного моніторингу необхідно засновуватись на знаннях критичних факторів успіху головних задач на кожному етапі управління. Ця система припускає виділення деяких ключових економічних показників.

Для всеохоплюючій дії негативних факторів, необхідно розглядати підприємство з точки зору широкого спектру показників, які характеризують різні сторони діяльності підприємства. Завдяки правильному використанню системи показників стратегічного моніторингу на підприємствах гірничорудного комплексу (ГРК), керівництво підприємства може не тільки відслідковувати найважливіші тенденції розвитку економічних процесів, а й оперативно відслідковувати вплив основних факторів, що визначають можливі зміни цих процесів. Таким чином, система моніторингу підприємства формує необхідну основу для вчасного реагування керівництвом на виникаючі в діяльності підприємства диспропорції, що дозволяє підвищити ефективність стратегій, які реалізуються.

Об'єктами спостереження моніторингу виступають економічні відносини на підприємстві, їх взаємозв'язок і взаємодія із зовнішнім середовищем. Суб'єктами можуть виступати фахівці і керівники, здатні судити про внутрішні механізми виробництва, пріоритети розвитку, про стан об'єкта дослідження.

Як будь-яка система, моніторинг має свої функції. В основі побудови моніторингу знаходиться певний набір принципів, які допомагають досягати необхідних цілей.

Вважається доцільним виділити наступні функції комплексного моніторингу підприємства: оціночна (аналізуюча) полягає в оцінці та аналізі рівня сталого розвитку промислового підприємства, визначення класу стійкості. Ця функція відповідає за визначення конкретного набору показників сталого розвитку - системи показників (проводиться їх нормування, визначається узагальнений показник стійкого розвитку) [9]. Для підприємств гірничорудного комплексу, доцільно врахувати показники фінансового та виробничого станів; цільова. Формування основ управління стійким розвитком підприємства (стратегії сталого розвитку) має цільовий характер, тобто передбачає постановку і досягнення певних цілей. Тому, на першому етапі проведення моніторингу підприємства необхідно сформулювати стратегію, цілі, функції, принципи та методи управління підприємством, а також конкретизувати суб'єкт й об'єкт управління у рамках концепції сталого розвитку підприємства, що забезпечить економічний розвиток [9]; інформаційна функція полягає у забезпеченні керівництва підприємства повною, оперативною і достовірною інформацією про процеси розвитку, що протікають на певному промисловому підприємстві; контролююча функція полягає у вивченні економічної інформації суб'єкта на всіх стадіях розширеного виробництва з метою контролю за реалізацією стратегії, яку приймають за допомогою попередньої функції; управлінська функція стратегічного моніторингу полягає у сприянні прийняттю ефективних управлінських рішень.

Для найбільш повного відображення суті економічних процесів необхідно об'єднати як кількісні, так і якісні їх характеристики. С цією метою, виходячи з особливостей об'єкту спостереження, в основу організації моніторингу доцільно закласти ряд основних принципів: цілеспрямованість. Моніторинг - це цілеспрямований процес оптимального вибору методів безперервного контролю, які дозволяють промислового підприємству ефективно функціонувати і стало розвиватися протягом тривалого періоду часу. Комплексність оцінки - одночасне відстеження динаміки показників, що характеризують різні сторони розвитку (при цьому можливий як моніторинг кожного окремо взятого показника, так і зведення їх у інтегральний показник, що дозволяє судити про процеси реалізації стратегії в цілому), незалежність і об'єктивність. Система моніторингу не повинна залежати від суб'єктивних факторів. Принцип системності. Системність оцінки передбачає облік взаємозв'язків базових показників і використання впорядкованої структури приватних та інтегральних характеристик розвитку підприємства. Принцип репрезентативності. При проведенні моніторингу виникає необхідність отримання інформації, репрезентативною щодо різних об'єктів. Принцип економічності полягає у тому, що методика оцінки

розвитку промислового підприємства [10] дає можливість використовувати як кількісні, так і якісні показники, Принцип максимальної інформативності результатів. Неповнота інформації ускладнює оцінку показників економічного стану промислового підприємства [11]. Згідно з перерахованими причинами, основним критерієм моніторингу є повнота інформації, що дозволяє судити про збалансованість і пропорційності розвитку підприємства. Серед інших принципів моніторингу необхідно зазначити: принцип тотожності; безперервність спостереження за об'єктами; періодичність зняття інформації про зміни, що відбуваються; порівнянність застосовуваних показників моніторингу в часі. За рівнем дослідження виділяють наступну класифікацію принципів моніторингу (табл 1).

Таблиця 1

Класифікація принципів системи моніторингу

| Рівень дослідження                      |                                 |                                  |
|-----------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| методологічний                          | методичний                      | практичний                       |
| зв'язок між елементами системи          | мінімально допустима точність   | зв'язок з діючою системою обліку |
| інтеграція показників, процедур, рішень | єдність принципів конструювання | наочність (простота)             |
| формування ідеальної нормативної моделі | поліпшення інформативності      | універсальність                  |

**Висновки та напрямки подальших досліджень** Зазначені функції та принципи, яким повинен відповідати стратегічний моніторинг, дозволяють окреслити основні завдання щодо формування стратегічного моніторингу в системі стратегічного управління підприємством. організація спостереження: отримання достовірної інформації щодо стану та змін економічних процесів; оцінка і системний аналіз отриманої інформації; виявлення причин, що викликають той або інший характер економічних процесів; виявлення факторів, що викликають економічні загрози на підприємстві в поточний період і в перспективі; забезпечення управлінського персоналу підприємств інформацією, отриманою при здійсненні економічного моніторингу; розробка прогнозів розвитку економічної ситуації на підприємствах; підготовка рекомендацій, спрямованих на подолання негативних факторів і забезпечення ефективного стратегічного управління.

Таким чином, стратегічний моніторинг економічного стану підприємства націлений на широкий клас прийняття рішень управлінського характеру.

#### Список літератури

1. Агофф, Р. О целеустремленных системах / Р. Агофф, Ф. Эмери. – М. : Советское радио, 1974. – 272 с.
2. Редченко К. І. Стратегічний аналіз: навч. посіб. / К. І Редченко – Львів: Вид-во ЛКА, 2002. – 196 с.
3. Calbrath J. R, Robert K. K. Strategy implementation. – Los Angeles: West Publishing Company, 1986. – 325 p.
4. Томпсон А. А., Стрикленд А. Дж. Стратегический менеджмент: концепции и ситуации: учеб. для вузов [пер. с 9-го англ.] изд. – М. : ИНФРА-М, 2000. – 412 с.
5. Bourgeois L. Strategy and Environment: A Conceptual Integration // Academy of Management. Revolution. – New York, 1980. – Vol. 5. – N 1. – P. 34–43.
6. Виссема Х. Стратегический менеджмент и предпринимательство: возможности для будущего процветания: [пер. с англ.] – М. : Изд-во «Фин-пресс», 2000. – 272 с.
7. Хэй Д., Моррис Д. Теория организации промышленности: в 2-х т.: пер. с англ. под ред. А. Г. Слущкого. - СПб: Экономическая школа, 1999. - Т. 1. – 384 с.
8. Масалитина Е.С. Экономический мониторинг в стратегическом управлении промышленным предприятием: дис. канд. экон. наук - Москва: РГБ, 2007. - 186с
9. Волкова, В.Н. Системный анализ и его применение в АСУ / В.Н. Волкова, А.А. Денисов. - Л. : ЛПИ, 1983. - 83с.
10. Кондратьева Е.В. Комплексная оценка экономической устойчивости промышленного предприятия [Текст] / Кондратьева Е.В. // Автореф. канд. экон. наук. - Челябинск, 2004. - 28с.
11. Баранівська Х.З. Функціональний підхід до управління економічною стійкістю підприємства / Х.З. Баранівська, С.С. Барвінські, Р.В. Фещур // Науковий вісник НЛТУ України: зб. наук.-техн. пр. - 2009. - Вип. 19.7. – С. 140-150.
12. Ареф'єва О.В. Економічна стійкість підприємства: сутність, складові та заходи її забезпечення / О.В. Ареф'єва, Д.М. Городицька // Актуальні проблеми економіки. - 2008. - № 8 (86). – С. 83-91. Рукопис подано до редакції 17.03.16

УДК 621.314

В.Я. ЖУЙКОВ, д-р техн. наук, К.С. ОСИПЕНКО, ст. викладач

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## ОСОБЛИВОСТІ ВІДБОРУ ЕНЕРГІЇ ВІД ВІТРОГЕНЕРАТОРА В ПЕРЕХІДНОМУ РЕЖИМІ ОРІЄНТАЦІЇ НА ВЕКТОР ВІТРОВОГО ПОТОКУ

В статті розглянуто забезпечення ефективної роботи Micro Grid за рахунок реалізації відбору максимальної енергії від вітрогенератора. Наведено еквівалентну схему системи електроживлення.

Показано, що в процесі повороту лопатей і гондоли вітрогенератора необхідно узгоджувати еквівалентний внутрішній опір вітрогенератора, який складається з опору втрат вітрового потоку та внутрішнього опору електричного генератора, з опором навантаження. Для уточнення рівня енергії, яка може бути відібрана від вітрогенератора в процесі повороту лопатей та гондоли, запропонована еквівалентна схема джерела, в якій напруга еквівалентного джерела представляється лінійною функцією, а реакція ланки внутрішній опір-навантаження є функцією Гауса.

При цьому величина еквівалентної напруги визначається з рівності потужності, яка може бути відібрана від вітрового потоку, та потужності джерела за умови роботи в режимі відбору максимальної енергії.

Показано, що врахування лінійної зміни рівня енергії вітрового потоку і, відповідно, напруги еквівалентного джерела вітрогенератора в процесі повороту лопатей та гондоли дозволяє підвищити рівень енергії, що може бути відібрана від вітрогенератора.

**Ключові слова:** системи електроживлення, розподілена генерація, Micro Grid, вітрогенератор, відбір максимальної енергії, закон Гауса.

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Одним з факторів зміни парадигми розвитку та керування європейської системоутворюючої мережі є масштабне впровадження електростанцій, що використовують відновлювані джерела енергії з неконтрольованими та нестабільними рівнями генерації та наявністю гармонічних спотворень [1].

На сьогодні намічені основні напрямки інтеграції відновлюваних джерел енергії та розосереджених енергоресурсів, організації активної участі споживачів та створення нових інфраструктур, одним з прикладів яких є система Micro Grid, забезпечення ефективної роботи якої передбачає відбір максимальної енергії від джерел розосередженої генерації [2].

Зокрема, при наявності в системі вітрогенератора відбір максимальної енергії забезпечується найбільш ефективним функціонуванням його конструктивних вузлів, основними з яких є вітроколесо та синхронний генератор [3].

**Аналіз досліджень і публікацій.** Залежність потужності  $P$  вітроколеса від швидкості вітрового потоку та інших параметрів описується формулою [3]

$$P = C_p \frac{\rho \pi R_{BK}^2 v^3}{2}, \quad (1)$$

де  $v$  - швидкість вітрового потоку;  $\rho$  - густина повітря;  $R_{BK}$  - радіус вітроколеса;  $C_p$  - коефіцієнт потужності.

Оскільки зі зміною швидкості вітрового потоку змінюється швидкість обертання вітроколеса, за якої потужність на валу вітроколеса є максимальною, необхідно узгодити характеристики зміни потужності вітроколеса та синхронного генератора залежно від швидкості обертання, загальний вигляд яких наведено на рис. 1, та з яких можна зробити висновок, що найсприятливіший режим роботи вітроколеса та генератора досягається для системи вітроколесо-генератор за кривою потужності  $A$ , яка відповідає максимально можливим значенням потужності для різних швидкостей вітру  $v_1 \div v_5$ .

При повороті лопатей і гондоли вітрогенератора відбувається перехідний процес зміни режиму генерації, що потребує узгодження еквівалентного внутрішнього опору вітрогенератора, який враховує втрати у вітроколесі, та опору навантаження, але для забезпечення відбору максимальної енергії від вітрового потоку необхідно здійснювати поворот лопатей та гондоли вітрогенератора так, щоб значення швидкості та тиску потоку вітру відповідали максимальному рівню енергії.

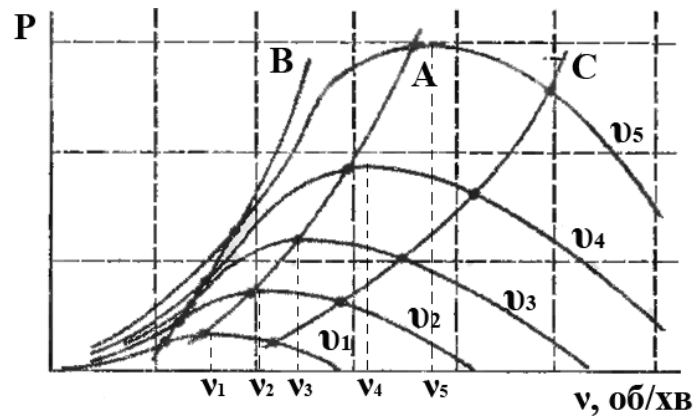


Рис. 1. Характеристики потужності вітроколеса та синхронного генератора

**Постановка завдання.** Енергія вітрового потоку  $W_{ВП}$ , яка описується рівнянням Бернуллі [4] перетворюється в енергію  $W_B$  на валу електричного генератора та відповідний момент на валу та в електричну енергію  $W_{\Sigma}$ . Розрахунок втрат енергії при її перетворенні проводиться по спрощеній еквівалентній схемі системи електроживлення з вітрогенератором (ВГ), яка представляється у вигляді  $RL$ -кола з залежним від часу опором [5], наведений на рис. 2, де ВГ<sub>ЕКВ</sub> - еквівалентна схема вітрогенератора; ВК - вітроколесо; П - перетворювач;  $E$  - еквівалентне джерело напруги;  $R_i$  - внутрішній опір вітрогенератора, який залежить від часу та враховує еквівалентний аеродинамічний опір та його зміну при зміні положення лопатей та гондоли;  $L$  - індуктивність ліній;  $R_H$  - опір навантаження. На рис. 2 стрілкою позначено перехід від системи вітроколесо-синхронний генератор до її еквівалентної схеми.

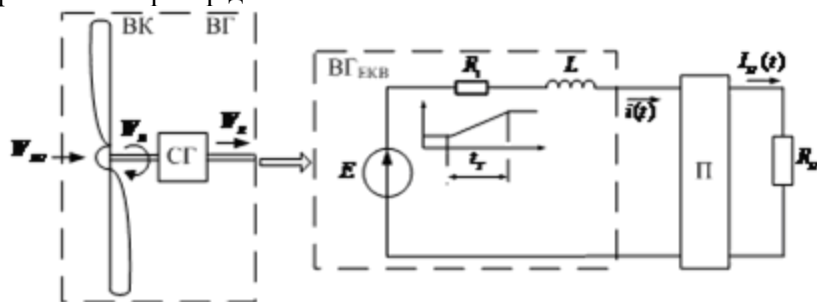


Рис. 2. Еквівалентна схема системи електроживлення з вітрогенератором

Умовою початку повороту лопаті або гондоли є розбіжність напрямку потоку вітру з віссю обертання. Як тільки напрямок потоку вітру зміниться так, що між його вектором та віссю обертання утворюється деякий кут, на систему керування надійде сигнал про необхідність повороту лопаті або гондоли. За умови, що проекція вектора швидкості вітру на вісь обертання гондоли буде дорівнювати нулю, аеродинамічний опір лопаті буде приймати мінімальне значення, а рівень енергії вітру, що надходить для перетворення в електроенергію, буде максимальним. Аналогічно й для гондоли - аеродинамічний опір буде мінімальним за умови, що проекція вектора швидкості вітру на вісь обертання лопаті буде дорівнювати нулю. При зміні кута атаки аеродинамічний опір буде зростати, а рівень енергії зменшуватися.

Потужність еквівалентного джерела напруги визначається за формулою

$$P_{ДЖ} = \frac{E^2}{R_{ЕКВ}}, \quad (2)$$

де  $R_{ЕКВ} = R_i + R_H$ , при умові роботи у режимі відбору максимальної потужності внутрішній опір еквівалентного джерела та опір навантаження рівні між собою  $R_i = R_H$ .

З рівності виразів (1) та (2) знаходиться значення напруги еквівалентного джерела

$$E = R_{ВК} v^{3/2} \sqrt{\frac{\pi}{2} \rho C_P R_{ЕКВ}}.$$

Для вітрогенератора проекція вектора швидкості вітру на вісь обертання пропорційна косинусу кута атаки, і при малих приростах кута при постійній швидкості обертання виконуючих механізмів, внутрішній опір вітрогенератора можна вважати лінійною функцією часу

$$R_i = k_R \cdot t,$$

де  $k_R$  - коефіцієнт масштабування, який має розмірність  $[Om/c]$ .

Оскільки, для роботи вітрогенератора в режимі відбору максимальної потужності необхідно, щоб виконувалася умова  $R_i = R_H$ , то опір навантаження повинен змінюватися за таким же лінійним законом, що й внутрішній опір:  $R_H = k_R \cdot t$ .

При стрибкоподібній зміні напруги еквівалентного джерела струм перехідного процесу у вихідному колі еквівалентної схеми вітрогенератора за умови, що опір змінюється за лінійним законом, описується законом Гауса

$$i(t) = A(1 - e^{-t^2/\sigma}),$$

де  $A = \frac{E}{L} \sqrt{\frac{\pi}{2}} / \sqrt{\frac{2k_R}{L}} = \text{const}$  - постійне значення струму у колі,  $\sigma = \sqrt{\frac{2k_R}{L}}$  - характеризує тривалість перехідного процесу.

Таке значення струму перехідного процесу отримане за умови, що напруга еквівалентного джерела вітрогенератора є величиною постійною.

Для уточнення рівня енергії, яка може бути відібрана від вітрогенератора в процесі повороту лопатей та гондоли, покладемо, що напруга еквівалентного джерела змінюється лінійно від 0 до  $E$  за законом  $E(t) = k_E t$ , де  $k_E$  - коефіцієнт масштабування, який має розмірність  $[B/c]$ .

**Викладення матеріалу та результати.** При зміні швидкості вітрового потоку з  $v_1$  до  $v_2$  напруга еквівалентного джерела також змінюється зі значення  $E_1 = R_{BK} v_1^{3/2} \sqrt{\frac{\pi}{2} \rho C_p R_{EKB1}}$  до значення  $E_2 = R_{BK} v_2^{3/2} \sqrt{\frac{\pi}{2} \rho C_p R_{EKB2}}$ , де  $R_{EKB1}$  та  $R_{EKB2}$  - еквівалентні опори електричного кола, що відповідають швидкостям  $v_1$  та  $v_2$ .

Знайдемо реакцію системи на вхідну дію за умови, що напруга еквівалентного джерела змінюється лінійно: 1) за умови, що внутрішній опір вітрогенератора постійний (передавальна функція перетворювача  $W_{П1} = \alpha e^{-\alpha t}$ ); 2) за умови, що внутрішній опір вітрогенератора змінюється за лінійним законом (передавальна функція перетворювача  $W_{П2} = 2\beta t e^{-\beta t^2}$ ). Для розрахунку використаємо інтеграл згортки. Тоді, для першого випадку

$$I_1 = \int_0^\infty f_1(t-\tau) f_2(\tau) d\tau = \int_0^t k_E(t-\tau) \cdot \alpha e^{-\alpha \tau} = k_E t + \frac{k_E}{\alpha} (e^{-\alpha t} - 1),$$

для другого випадку

$$I_2 = \int_0^\infty f_1(t-\tau) f_2(\tau) d\tau = \int_0^t k_E(t-\tau) \cdot 2\beta \tau e^{-\beta \tau^2} = t - \frac{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(\sqrt{\beta} t)}{2\sqrt{\beta}},$$

де  $\alpha$  - величина, обернена постійній часу,  $\beta$  - параметр, що характеризує коло з Гаусівським перехідним процесом.

На рис. 3 показані дві інтегральні криві зміни струму перехідного процесу у вихідному колі еквівалентної схеми вітрогенератора на інтервалі зміни параметрів вітрового потоку (швидкості та напрямку):  $I_1(t)$  за умови, що напруга еквівалентного джерела постійна;  $I_2(t)$  за умови, що напруга еквівалентного джерела змінюється за лінійним законом.

Рівні енергії, яку можна відібрати від вітрогенератора визначається:

за умови, що напруга еквівалентного джерела постійна на інтервалі  $0 \dots 3\tau$

$$W_1 = \int_0^{3\tau} I_1^2(t) \cdot R_H(t) dt,$$

за умови, що напруга еквівалентного джерела змінюється лінійно

$$W_2 = \int_0^{3\tau} I_2^2(t) \cdot R_H(t) dt.$$

Розрахувавши площі, обмежені інтегральними кривими  $I_1(t)$  та  $I_2(t)$  отримаємо різницю між рівнями енергії

$$\int_0^{3\tau} I_2(t) dt - \int_0^{3\tau} I_1(t) dt \Big/ \int_0^{3\tau} I_2(t) dt = 6,97\% \approx 7\%.$$

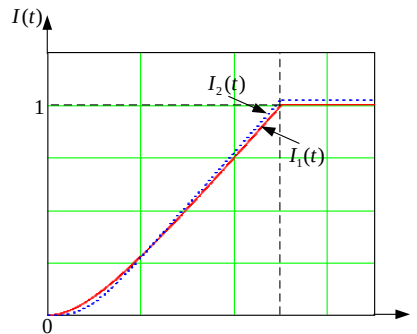


Рис. 3 - Графіки інтегральних кривих

У динамічному режимі роботи вітрогенератора при зміні кутів атаки лопатей та гондоли та врахуванні лінійної залежності еквівалентного внутрішнього опору вітрогенератора від часу врахування лінійної залежності напруги еквівалентного джерела в перехідному процесі дозволяє збільшити рівень енергії, яка може бути відібрана від вітрогенератора щонайменше на 7%.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Таким чином, врахування лінійної зміни рівня енергії вітрового потоку і, відповідно, напруги еквівалентного джерела вітрогенератора в процесі повороту лопатей та гондоли дозволяє підвищити рівень енергії, що може бути відібрана від вітрогенератора щонайменше на 7%.

#### Список літератури

1. Блинов И.В., Денисюк С.П., Жуйков В.Я., Кириленко А.В., Киселева А.Г., Лукьяненко Л.Н., Осипенко Е.С., Павловский В.В., Парус Е.В., Сопель М.Ф., Стелюк А.О., Танкевич С.Е. Интеллектуальные электроэнергетические системы: элементы и режимы: Под общ. ред. акад. НАН Украины А.В. Кириленко / Институт электродинамики НАН Украины. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2014. – 408 с.
2. D. Herman Investigation of the Technical and Economic Feasibility of Micro-Grid-Based Power Systems. Final Report, December 2001. – 107 p.
3. Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветроэлектрогенераторы. – Харьков: Национальный аэрокосмический университет «Харьковский авиационный институт», 2003. – 400 с.
4. L. J. Clancy Aerodynamics. Pitman Publishing Limited, London ISBN 0 273 01120 0. 1960.
5. Zhuikov V. Compensator currents form determination considering wind generator aerodynamic resistance / V. Zhuikov, K. Osypenko // 2014 IEEE International conference on intelligent energy and power systems (IEPS) Conference Proceedings. 2014. – P. 168-170.

Рукопис подано до редакції 30.03.16

УДК 621.311.086.5:621.3.001

И.О. СИНЧУК, Э.С. ГУЗОВ, кандидаты техн. наук, доц., М.А. ВИННИК, соискатель  
Криворожский национальный университет

### О ПЕРСПЕКТИВАХ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСА: «ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ – ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ» ПОДЗЕМНЫХ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В статье приведены результаты исследований по анализу графиков электрических нагрузок приемников горно-рудных предприятий с подземными способами добычи железорудного сырья. Показано различие и причины, порождающие разницу форм графиков для тех или иных конкретных предприятий анализируемой отрасли промышленно-

сти. Предложены конкретные направления и ожидаемые уровни эффективности от их реализации в практику работы анализируемых видов железорудных предприятий.

**Ключевые слова:** эффективность, технологические параметры, электротехнические комплексы, электроэнергия, мощность

**Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями.** Несмотря на тенденцию к уменьшению, которая наблюдается в последние годы, доля потребления электрической энергии (ЭЭ) промышленностью Украины составляет 42 % от общегосударственного объема электропотребления. Особенностью отечественной промышленности является наличие в ней 51 энергоемкого предприятия (металлургического, горнодобывающего, нефтехимического), которые потребляют около половины ЭЭ всей промышленной отрасли. В свою очередь, только на Днепропетровскую область приходится 16, что составляет почти 32 % от всех отечественных энергоемких предприятий, которые находятся на контроле «Госэнергонадзора». Такая концентрация количества данных видов предприятий существенно влияет на показатели комплексной эффективности использования транспортируемой электроэнергии как самих энергосистем в целом, так и предприятий в частности [1-3].

**Анализ исследований и публикаций.** Сам формат направлений по повышению энергоэффективности электротехнических систем и комплексов, как факта оптимального использования ЭЭ, в т.ч. оптимизации уровня ее потребления и повышения эффективности использования, известен как многовекторный и многофункциональный процесс. Вместе с тем, стержневым моментом в этом процессе является привлечение к участию в нем всех, без исключения, отечественных предприятий, а энергоемких особенно [3,4].

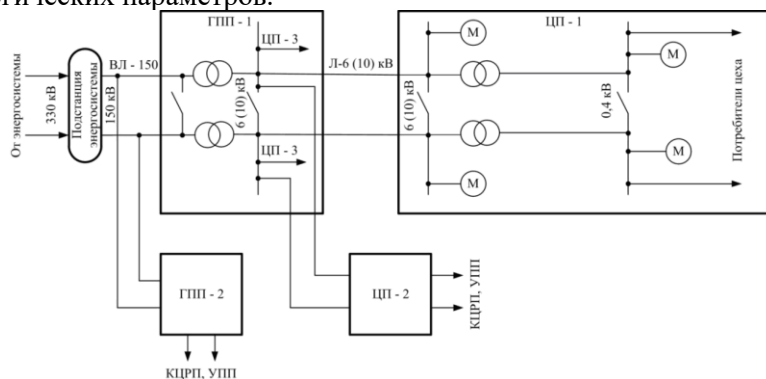
Одними из вышеотмеченных видов предприятий являются предприятия горнометаллургического комплекса страны и, в частности, - горнорудные, добывающие железорудное сырье (ЖРС) [4,5].

Исследования последних 5-10-ти лет и качественные изменения (хотя далеко не всегда положительные), происходящие в рудных шахтах за счет быстротекущих процессов концентрации горных работ, и их резкая интенсификация поставили ряд новых задач в области формирования электрических нагрузок, которые, к сожалению, пока не находят своего решения в практике работы этих предприятий.

**Изложение материала и результаты.** Для анализа, как образец, возьмем один из крупнейших, отечественных железорудных комбинатов с подземным способом добычи ЖРС – ПАО «Криворожский железорудный комбинат» (КЖРК), объединяющий в технологии своего производства ряд шахт, карьеров и обогатительных фабрик. Являясь типовым в данной отрасли, комбинат полностью отражает процессы электроснабжения - электропотребление, происходящие в остальных отечественных предприятиях горнорудной отрасли. В силу этого анализ и выводы в анализируемой проблеме по одной из шахт ПАО «КЖРК» следует считать без видимых погрешностей обобщающими для остальных предприятий-аналогов.

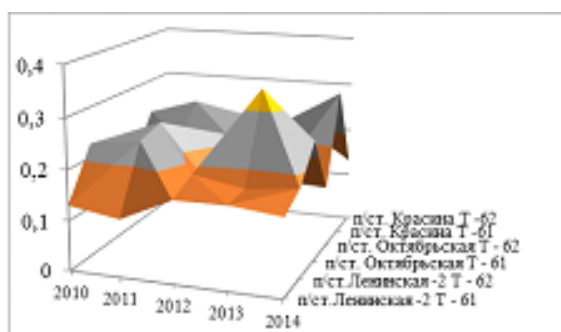
На рис. 1 представлена упрощенная типовая структурная схема электроснабжения железорудного предприятия (ГОК, шахта).

Проанализируем «рамочно» эффективность данной структуры, исходя из эффективности функционирования отдельных ее слагаемых, а точнее соответствия их фактических и номинальных технологических параметров.

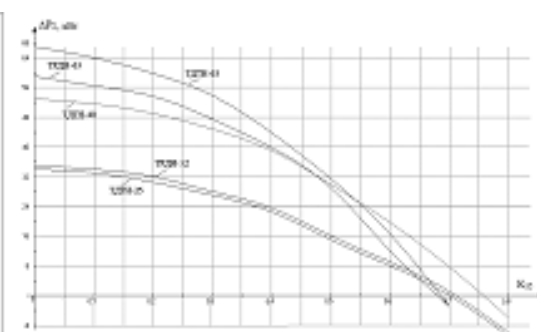


**Рис. 1.** Типовая упрощенная структура электроснабжения железорудного комбината с подземным способом добычи железорудного сырья

Прежде всего, исходя из реальных режимов функционирования, настораживает факт недогрузки по мощности силовых трансформаторов напряжения ГПП. Как правило, все ГПП железорудных шахт и комбинатов оборудованы силовыми трансформаторами мощностью 32000-63000 кВА. Сроки эксплуатации практически всех этих трансформаторов превысили границы 40 лет. Проектный выбор электрических мощностей данных трансформаторов производился с учетом перспектив проектных глубин добычи ЖРС с максимумом до 1500 м. Вместе с тем, этих установленных мощностей и в настоящее время достаточно при существующих запроектных глубинах добычи превышающих вышеприведенные - 1500 м [4]. Более того, наблюдается обратная картина. Если на время начала эксплуатации ныне эксплуатируемых трансформаторов коэффициент их загрузки составлял 70-80%, то сейчас он гораздо ниже. На рис. 2 представлены гистограммы реальных коэффициентов загрузки силовых трансформаторов ряда ГПП ответственных железорудных шахт за последние пять лет.



**Рис. 2.** Реальные коэффициенты загрузки силовых трансформаторов ГПП ряда отечественных железорудных шахт



**Рис. 3.** Диаграммы уровней потерь электрической мощности трансформаторов ГПП в функции коэффициента их загрузки

Обобщая вышеприведенные на рис. 2 данные, отметим, что только в двух анализируемых случаях коэффициент загрузки трансформаторов незначительно превышал уровень 0,3, и в 17-ти случаях не превысил значение 0,2, т.е. загрузка всех эксплуатируемых трансформаторов ГПП в среднем составляет около 20-25 % номинальной. Опережая возможные упрежденные предложения читателей по выходу из такого состояния, отметим, что замена эксплуатируемых трансформаторов на другие, с более низкой установленной мощностью, для действующих железорудных предприятий в нынешних экономических условиях, как и в ближайшие 5-10 лет, процесс не из реальных [6,7].

Меж тем, для практических выводов, в разрезе данных предложений, как исходный материал, приведем полученные авторами диаграммы уровней эффективности функционирования конкретных типов трансформаторов ГПП в функции загрузки их по электрической мощности (рис. 3). Продолжая анализ в направлении оценки «загрузки» по мощности трансформаторов ГПП, отметим, что такая важная слагаемая, определяющая уровень потребления ЭЭ того или иного предприятия, как электроэнергобаланс, за последние 5-10 лет практически не изменился на всех действующих железорудных предприятиях Украины (рис. 4).



**Рис. 4.** Структура электробаланса на подземных железорудных предприятиях Украины



В свою очередь, среди потребителей электрической энергии данных видов предприятий по-прежнему доминируют электрические двигатели горно-технологического оборудования, потребляющие в среднем до 94 % всей ЭЭ (рис. 5).

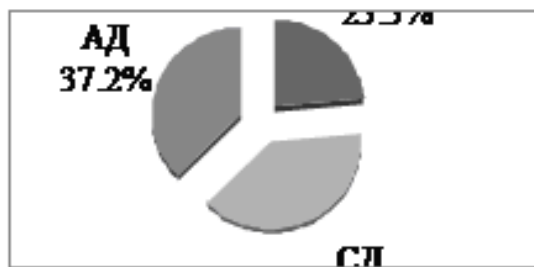


Рис. 5. Диаграмма соотношений установленных мощностей по видам электрических двигателей (ПАО «Криворожский железорудный комбинат», 2010-2014 г.):

АД - асинхронные двигатели; ДПТ - двигатели постоянного тока; СД - синхронные двигатели

В силу изложенного, логично проанализировать реальные, т.е. фактические графики электрических нагрузок данных видов предприятий, тем более что, как показывают исследования профессоров В.П. Розена, А.В. Праховника и О.Н. Синчука [2,5], отечественная горно-металлургическая отрасль промышленности вообще, а ее железорудная подотрасль, в частности, по уровню неравномерности графиков электрических нагрузок занимает последнее место среди других производственных отраслей, при этом значительно отставая даже от такой родственной отрасли, как угольная [4].

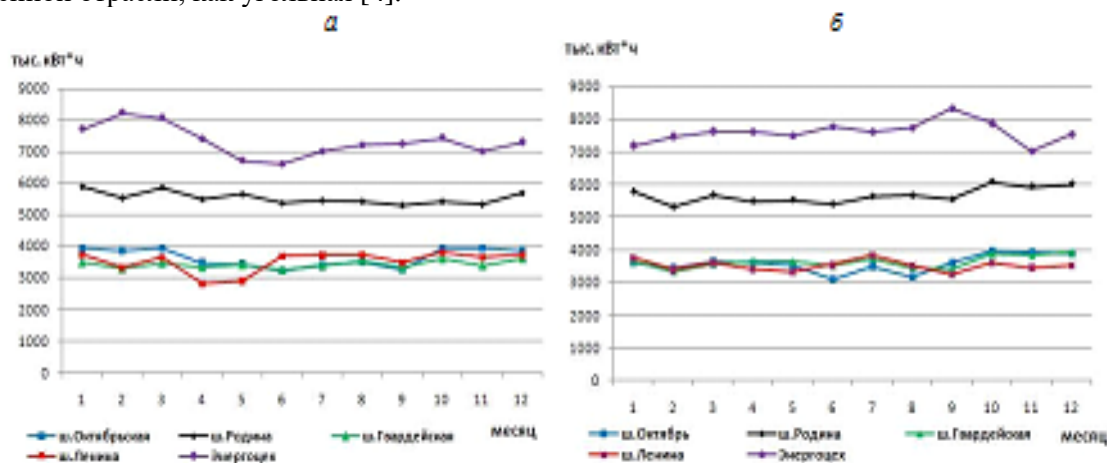
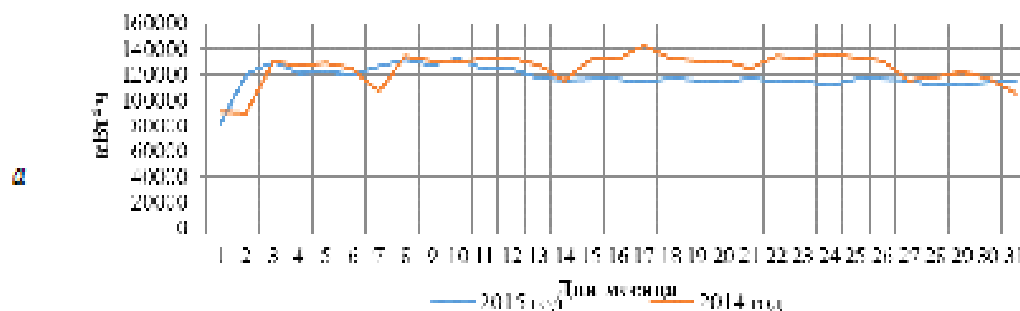


Рис.6. Годовые графики нагрузки шахт и энергоцеха ПАО «Криворожжелезрудком»: а - 2014 г.; б - 2015 г.

На рис. 6-12 для наглядности, как пример, представлены суточные, недельные, месячные и годовые графики потребления ЭЭ рядом отечественных железорудных предприятий с подземными способами ведения горных работ (шахт).



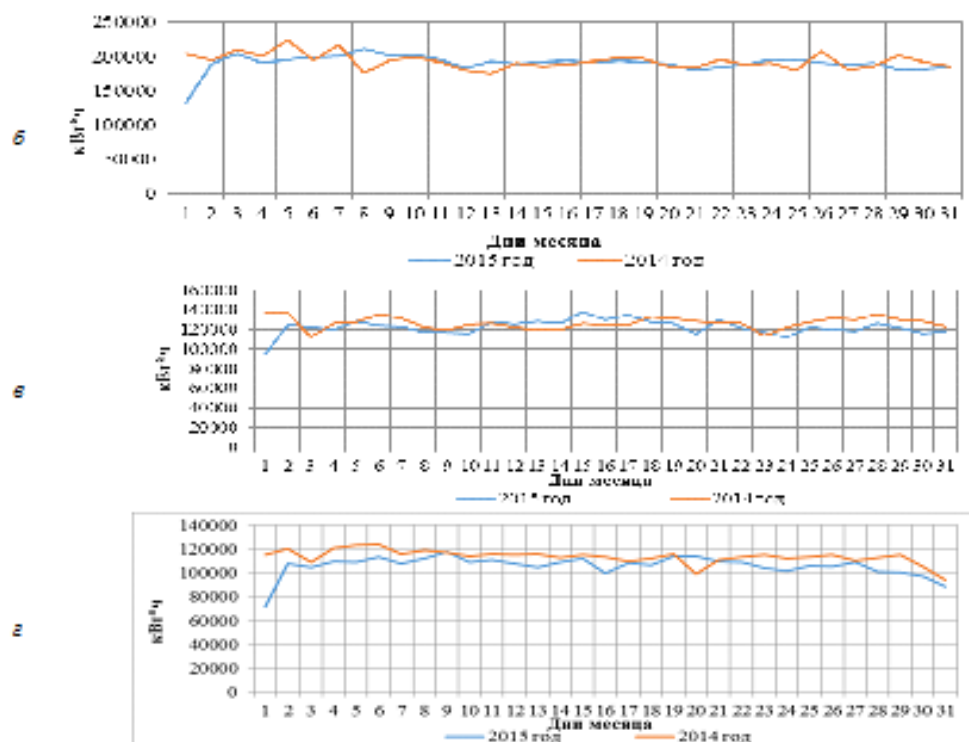


Рис. 7. Энергопотребление за месячный период декабря 2014 и января 2015 годов на шахтах ПАО «КЖРК»: а - Октябрьская; б - Родина; в - Гвардейская; г - Ленина

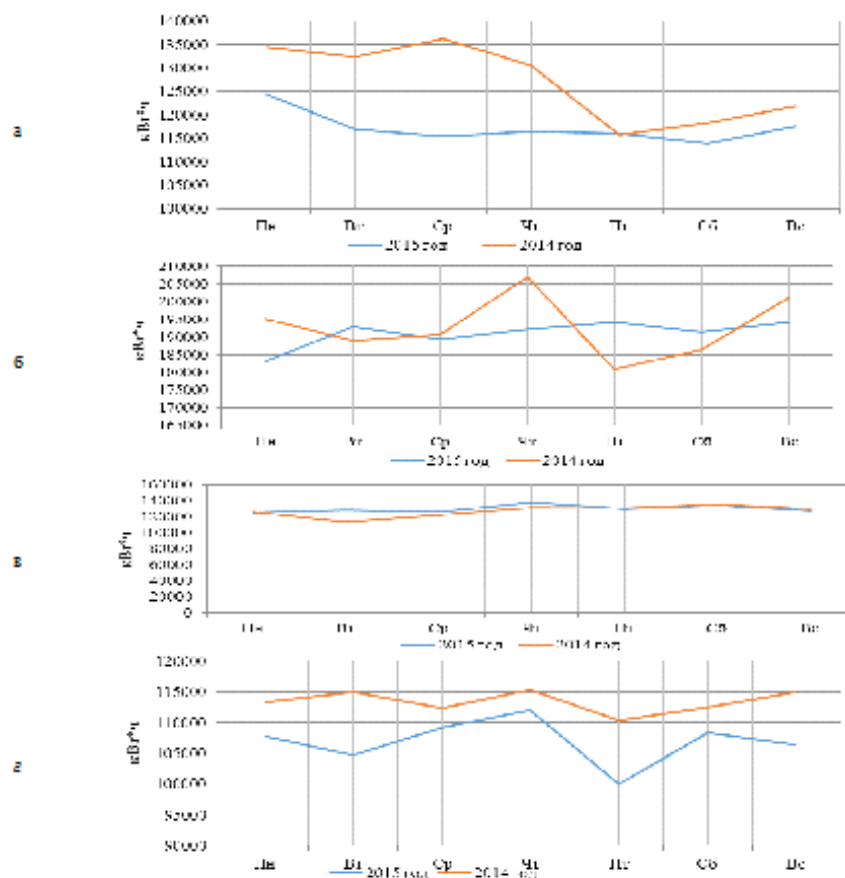


Рис. 8. Энергопотребление в 7-ми дневный период в декабре 2014 и январе 2015 годов на шахтах ПАО «КЖРК»: а - Октябрьская; б - Родина; в - Гвардейская; г - Ленина

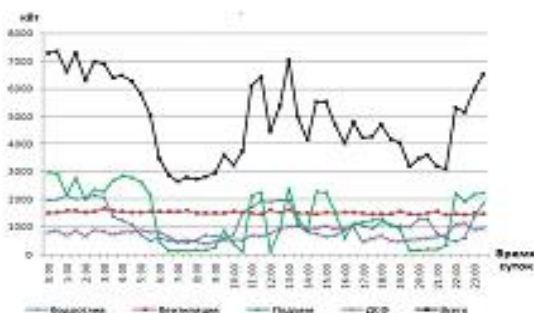


Рис. 9. Суточные графики электрических нагрузок технологических установок ш. Октябрьская



Рис. 11. Суточные графики электрических нагрузок технологических установок ш. Гвардейская

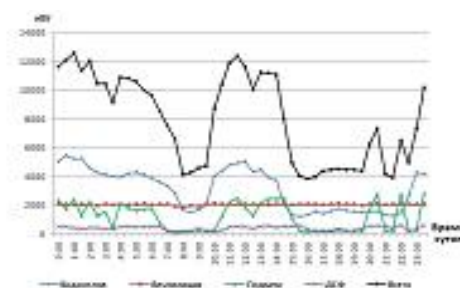


Рис. 10. Суточные графики электрических нагрузок технологических установок ш. Родина

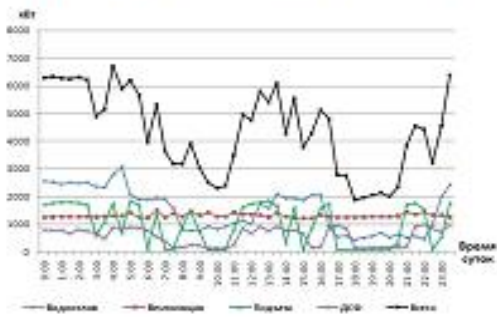


Рис. 12. Суточные графики электрических нагрузок технологических установок ш. им. Ленина

Анализ многочисленных графиков электрических нагрузок (в т.ч. тех, что приведены выше) ряда железорудных шахт, в частности, показал следующее. За 2010-2015 годы по дням месяцев колебания уровней потребления ЭЭ лежали в пределах 15,25-23,4%. Относительно дней с максимумом потребления, то сюда относятся и начало, и середина месяца, т.е. очевидной зависимости нет. По дням недели диапазон составляет 4,34-16,29 %. Здесь тоже связь сложно оценить, разве что минимумом потребления характеризуется, как правило, пятница, а максимум - «плавает» по дням. Аналогична или близка к этому ситуация колебаний характеризующая годовые (по месяцам) графики. Здесь диапазон 22,5-8,43%. Но все же, не отрицая важности для исследований этих графиков, отметим, что больший интерес, а для подземных предприятий особенно, представляют суточные графики, поскольку именно они характеризуют режим функционирования предприятия в целом, а, следовательно, режимы функционирования электротехнических систем горных машин и механизмов. Важно еще и то, что суточные графики позволяют определить энергоемкие потребители, так называемые, приемники-регуляторы электрической энергии и оценить возможность «выравнивания» с их помощью графиков электрических нагрузок в определенных временных диапазонах.

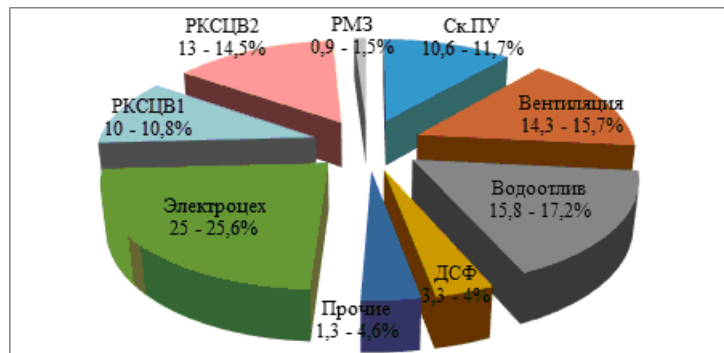
Меж тем, как известно [3,5-7], главной слагаемой формирования графиков является все же технология ведения горных работ на том, или ином горном предприятии. Но все те же исследования показывают факт идентичности технологий и большом соответствии объемов добычи ЖРС на отечественных подземных железорудных предприятиях. Поэтому важно определить остальные факторы, влияющие на процесс формирования графиков электрических нагрузок.

Как следует из рис. 9-13, особо влияющими на формы графиков электрических нагрузок следует считать электротехнические комплексы таких потребителей ЭЭ, как скиповые подъемные установки (СкПУ), водоотлив, компрессорные станции (РКСЦВ) и электроцех, потребляющие в сумме до 90 % всей ЭЭ предприятия. Следовательно, определен главный компонент, влияющий на графики электрических нагрузок – основные потребители или точнее потребите-

ли-регуляторы ЭЭ, т.е. именно путем «выравнивания» нагрузок этих приемников можно достичь соответствующего выравнивания общего графика потребления ЭЭ предприятием.

Рассмотрим характеристики графиков нагрузки именно этих основных наиболее энергоемких потребителей.

*Подъемные установки* имеют наибольшую установленную мощность приводных двигателей (до 6000 кВт) и имеют наиболее неравномерный график работы. Это обусловлено технологией работы подъемной установки. Графики нагрузки ДСФ в основном повторяют изменения нагрузки подъемных установок. Общей тенденцией является полное отключение или снижение нагрузки скипового подъема и ДСФ в часы «пик» энергосистемы, когда цена электроэнергии максимальна. Как показывают расчеты, коэффициент заполнения графиков нагрузки подъемных установок составляет 0,41-0,53, а коэффициент максимума - 1,9-2,44.



**Рис.13.** Диаграмма диапазонов колебаний уровней потребления электрической энергии по видам потребителей подземных железорудных комбинатов Украины в период 2010-2014 год

Следует отметить, что возможности повышения энергоэффективности подъемных установок и ДСФ шахт в основном исчерпаны.

*Водоотливные установки* в настоящее время работают преимущественно в ночное время для снижения платы за электроэнергию. Днем водоотливные установки включаются в тех случаях, когда за ночное время не успевают откачать всю воду - это характерно практически для половины из всех отечественных шахт. Анализ графиков нагрузки водоотливных установок показал, что  $K_{зап}=0,49-0,57$ ,  $K_m=1,75-2,04$ , что обусловлено режимом работы преимущественно в ночные часы. Для эффективной реализации возможностей такого режима требуется примерно 2-кратный запас мощности и производительности насосных установок, а также увеличения емкости водосборников.

Вследствие работы насосных установок в ночной зоне, хотя ее продолжительность составляет 7 часов, потребление электроэнергии составляет не более 40%.

*Вентиляторные установки* всех железорудных шахт работают практически с постоянной нагрузкой, это обусловлено применением нерегулируемых электроприводов. Характеристики графиков нагрузки вентиляторных установок  $K_{зап}=0,87-0,97$ ,  $K_m=1,03-1,15$  - т.е. близки к 1. Затраты на вентиляцию на различных шахтах составляют от 15 до 30% потребляемой электроэнергии и здесь имеется значительный потенциал повышения энергоэффективности.

*Центральные компрессорные станции (ЦКС)* снабжают сжатым воздухом одну или несколько шахт.

Мощность электрических двигателей турбокомпрессоров ЦКС составляет 2500-3500 кВт и потребляют до 30 % электроэнергии, того или иного подземного железорудного предприятия.

Режим работы ЦКС - непрерывный практически с постоянной нагрузкой, которая снижается в интервалах между сменами в связи с уменьшением потребления сжатого воздуха. В часы «пик» энергосистемы, когда цена на электроэнергию максимальна, компрессорные тем не менее работают с полной мощностью.

Именно в этом и имеется большой потенциал снижения энергозатрат, связанных с выработкой сжатого воздуха. Это сложная комплексная задача, требующая специального рассмотрения.

Однако «лежащим на поверхности» является способ перевода работы части приведенных приемников в ночное время суток.

В таком случае эти приемники становятся приемниками –регуляторами уровней потребления ЭЭ конкретно той или иной шахтой.

На рис. 14-15 приведена оптимизированная диаграмма потребляемой мощности и ЭЭ для шахт ПАО «Криворожжелезрудком» на ближайшие пять лет с учетом постоянства их технологических параметров.

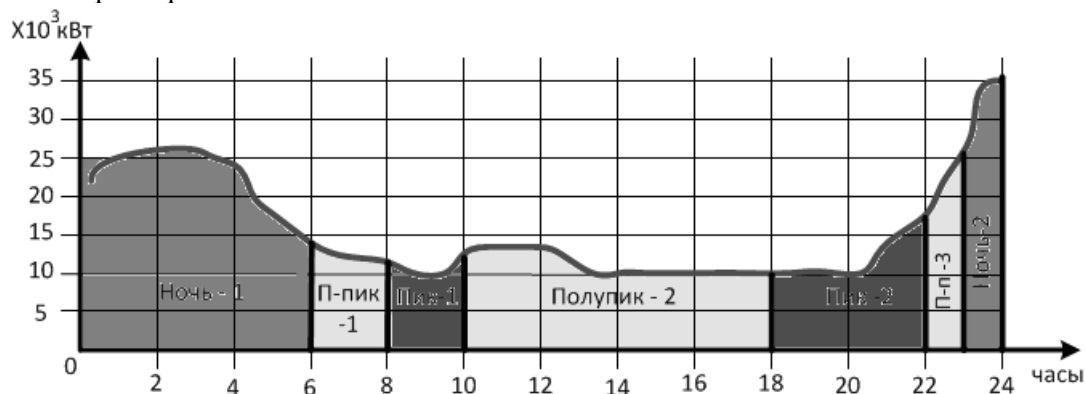


Рис. 14. Суточный график потребляемой мощности по ПАО «Криворожжелезрудком»

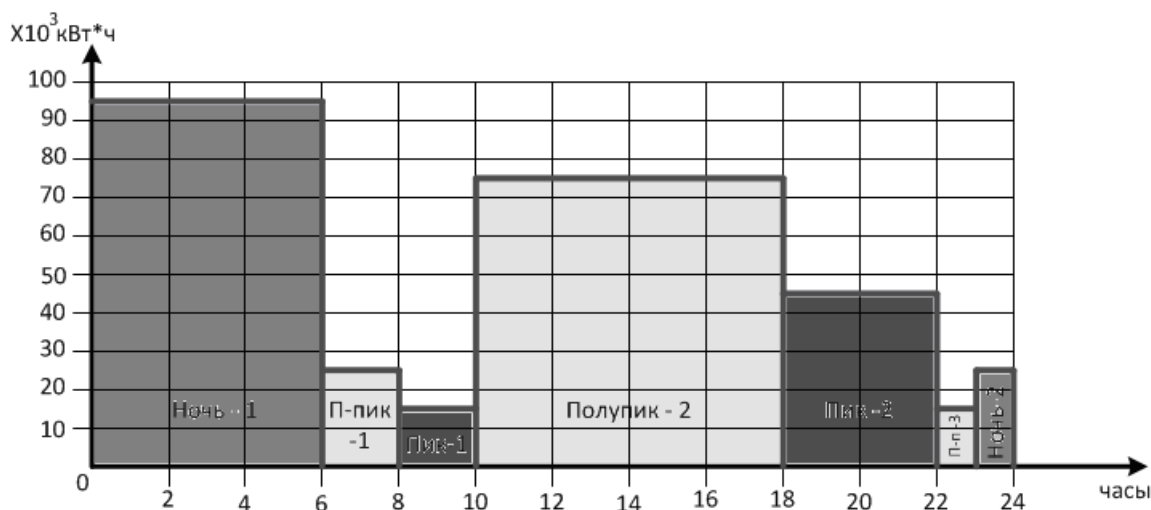


Рис. 15. Суточный график уровней потребления электрической энергии по тарифным зонам суток по ПАО «Криворожжелезрудком»

В данном случае наибольшее потребление электрической энергии в часы «пик» и «полупик» планируется на вентиляторы главного проветривания и подъемные установки, меньше всего - водоотлив. Ночью наоборот - максимум потребляет водоотлив, доля которого по отдельным шахтам достигает почти в ночные часы 90%, меньше всего - вентиляторы.

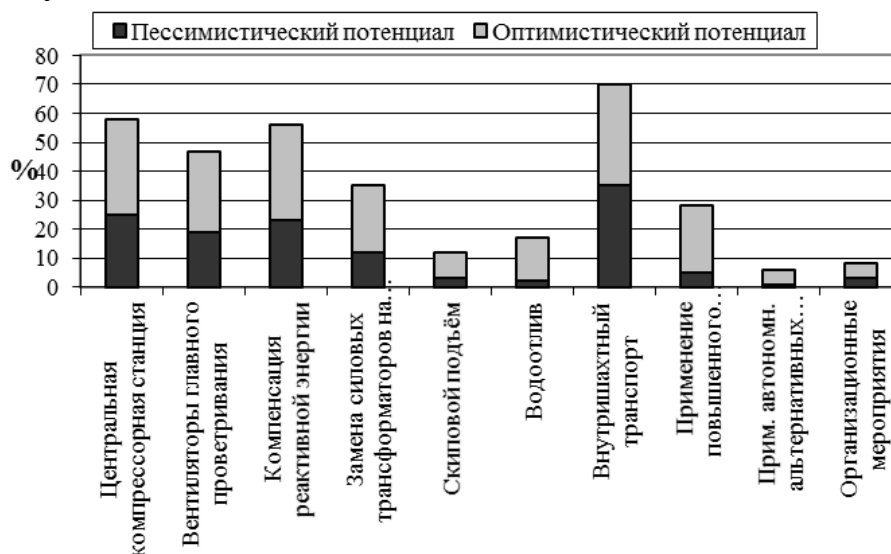
Анализируя процесс оценки и управления уровнем потребления ЭЭ на железорудных предприятиях отметим, что эти предприятия, войдя в новый экономический период, несколько изменили в положительную сторону свое отношение к электроэнергетической составляющей экономики своих производств.

Более того, как известно, форма расчетов предприятий за потребляемую ЭЭ за этот период изменилась, и существенно, перейдя от двухставочных тарифов к одноставочным с дифференцированной оплатой [7,8].

Но, к сожалению, как правило, предприятия пытаются в основном за счет организационных мероприятий строить графики электроэнергопотребления.

Однако это не решение проблемы, а лишь робкий подход к этому процессу, а решение должно носить комплексный характер, исходя из двуединой задачи: оценки реального уровня

порога достигаемости потенциала энергоэффективности и разработки многовекторных рекомендаций в направлении ее достижения.



**Рис. 16.** Сопоставление оптимистического и пессимистического потенциалов повышения электроэнергоэффективности слагаемых систем электроснабжения и электропотребления железорудных шахт

При этом должны учитываться такие влияющие факторы [5-9]: технология и условия процессов добычи железорудного сырья; режимы функционирования горных машин и механизмов.

На рис. 16 представлены диаграммы возможной досягаемости использования электроэнергетического потенциала отечественных железорудных предприятий с подземными способами добычи ЖРС.

**Выводы и направления дальнейших исследований.** Уровни потребления электрической энергии подземными железорудными предприятиями отличаются и значительно друг от друга. Особенно это очевидно по результатам анализа суточных графиков. При этом:

электробаланс их за последние 15-25 лет практически не изменился, как, впрочем, и соотношение установленных мощностей приводных электрических двигателей по их видам;

реальный диапазон колебаний коэффициентов загрузки силовых трансформаторов ГПП составляет 0,2-0,3, т.е. порядка 20%, что является неэффективным и требует своего повышения;

основными потребителями, а равно и регуляторами уровней потребления электрической энергии, которые формируют общий график электрических нагрузок, являются: ЦКС, скиповой подъем, водоотливные установки, вентиляторы главного проветривания.

Для решения задачи повышения электроэнергоэффективности добычи ЖРС необходим комплексный подход с оценкой всех влияющих факторов и конкретными предложениями по каждому из предложенных к реализации направлений.

#### Список литературы

1. Основні параметри енергозабезпечення національної економіки на період до 2020 року / Б.С. Стогній, О.В. Кириленко, А.В. Праховник, С.П. Денисюк, В.О. Негодуйко, П.П. Пертко, І.В. Блінов // К.: Вид. Ін-ту електро-динаміки НАН України, 2011. – 275 с.
2. Праховник А.В. Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий / А.В. Праховник, В.П. Розен, В.В. Дегтярев // М.: Недра, 1985 - 232 с.
3. Пархоменко Р.А. К вопросу оценки процесса электропотребления горнорудных предприятий в условиях неопределенности и неполноты информации/ Р.А. Пархоменко, А.Н. Яловая, М.А. Баулина // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Збірник матеріалів конференції Міжнародної III науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів, 09 – 11 квітня 2013 р. – Кременчук: КрНУ, 2013. – С.190-191.
4. Электрификация горного производства: Подручники для ВНЗ: у 2-х т. – Вид. 2-ге перероб. то допов./ За редакцією Л.О. Пучкова, Г.Г. Півняка. – Д.: Нац. гірн. університет, 2010, т. 1. – 503 с.



5. Синчук О.Н. Совершенствование методов расчета электрических нагрузок при проектировании и модернизации систем электроснабжения железорудных предприятий / О.Н. Синчук, Э.С. Гузов, Р.А. Пархоменко // Вісник КрНУ ім. М. Остроградського. Кременчук: КрНУ, 2013. – Вип. №1/2013 (78). С. 28-32.

6. Синчук И.О. Потенциал электроэнергоэффективности и пути его реализации на производствах с подземными способами добычи железорудного сырья. Монография / И.О. Синчук, Э.С. Гузов, А.Н. Яловая, С.Н. Бойко // под ред. докт. техн. наук, профессора О.Н. Синчука. – Кременчук: Изд. ЧП Щербатых А.В. – 2015. – 296 с.

7. Синчук О.Н. Оценка состояния и определения тактики повышения эффективности работы участковых подстанций железорудных шахт / О.Н. Синчук, С.Н. Лесной, Р.А. Пархоменко, А.Н. Яловая // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. – Кіровоград, 2012. – Випуск 25, частина II. – С.248 – 254.

8. Удовенко В.А. Переход на одноставочные тарифы, дифференцированные по зонам времени/ В.А. Удовенко // Энергетика и электрификация. – 1998. – №4. – С.42-44.

9. Синчук О.Н. «Холодный» резерв недогруженных силовых трансформаторов – путь повышения эффективности электроснабжения железорудных комбинатов / О.Н. Синчук, И.О. Синчук, Р.А. Лесной, А.Н. Яловая // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Кіровоград, 2012. – випуск 25, частина II. – С.74-79.

Рукопись поступила в редакцию 10.03.16

УДК 621.311:621.331

В.П. РОЗЕН, д-р техн.наук, проф., Я.М. ДЕМЧИК, аспірант

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ

В даній статті досліджується використання методів експоненціального згладжування прогнозування споживання електричної енергії підприємства харчової галузі. Основною метою являється дослідження впливу експоненціального згладжувань на прогнозування електроспоживання та точність при різних показниках згладжування. Використання сучасних способів збору інформації дозволяє приймати точні рішення. В цій статті представлено різні методи прогнозування з використанням статистичних даних отриманих за допомогою пристроїв збору даних. Дане дослідження дозволить використовувати методи в простому прогнозуванні при використанні статистичних інструментів. Результати можуть використовуватися в електроенергетиці при попередньому прогнозуванні споживання електроенергії. Запропоновані методи показують як правильно використовувати моделі експоненціального згладжування та які з них являються найбільш точнішими.

**Ключові слова:** електроспоживання, підприємство харчової галузі, експоненціальне згладжування, прогнозування

**Проблема та її зв'язок за науковими і практичними завданнями.** У сучасних умовах одним з важливих завдань є формування відносин між суб'єктами енергоринку, зокрема між споживачем та енергопостачальною компанією. Прогнозування електроспоживання харчових підприємств є одним моментів планування діяльності всього підприємства, а також харчової промисловості в цілому. Для виробника електричної енергії прогноз потрібний для оптимізації поставки і резервування електроенергії, проведення профілактичних робіт і забезпечення безпеки функціонування електроенергетичної системи (ЕЕС). Споживачу прогноз необхідний для мінімізації похибок, пов'язаних з платою штрафів при перевищенні лімітів по потужності і з передплатою за заявлену, але не використану потужність, а також з простим технологічним обладнанням в випадку дефіциту потужності в ЕЕС [1, 2].

Прогнозування режимних параметрів і техніко-економічних показників є одним із важливих завдань, як при прогнозуванні, так і при веденні діючих режимів енергообладнання підприємства. Складаючи плани за різними показниками на наступну добу, тиждень, місяць, квартал, рік, служба головного енергетика підприємства повинна вирішувати задачу прогнозування енергобалансу - співвідношення між потребою в електроенергії (потужності) і засобами її задоволення. Одним з показників при прогнозуванні є рівень очікуваного електро-споживання в ціло-

му по підприємству. У цьому сенсі величина прогнозу електроспоживання є опорним показником для прогнозування балансів електроенергії та потужності. Необхідність точного прогнозування споживання електроенергії обумовлена технологічними і економічними причинами підприємства.

Точність прогнозних розрахунків визначається відповідністю застосовуваних математичних моделей процесу коливань споживання електроенергії. В цілому дані коливання являють собою складний нестационарний випадковий процес, який має певні циклічності (регулярні коливання) [3]. При застосуванні математичних моделей і програмних засобах фахівці служби головного енергетика підприємства зазвичай обмежуються усередненими за минулі періоди значеннями. Таку методику розрахунків очікуваних планових величин називають зазвичай «ручним прогнозом». Спрощене, «ручне» прогнозування споживання може давати досить високі значення математичного очікування помилок, широкий довірчий інтервал і практично не застосовується для швидких оперативних розрахунків в темпі процесу [4-6].

**Постановка завдання.** Метою роботи є дослідження моделей експоненціального згладжування при прогнозуванні електроспоживання підприємства харчової промисловості для забезпечення достатньої точності середньострокового прогнозування шляхом врахування впливу виробничих, режимних та інших факторів на індивідуальні режими електроспоживання.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Питання прогнозування електроспоживання займалися такі провідні українські вчені, як Праховник А.В. [1], Розен В.П. [1,2], Дегтярев В.В. [1], Бевчая Е.А. [2], Івахненко А.Г. [3] та ін. За останні роки прогнозування електроспоживання застосовувало різні методи та моделі. Аналіз попередніх років показує, що найпростішим та найкращим способом прогнозування електроспоживання запропоновано метод згладжування. У запропонованому алгоритмі значення рівня, тенденції і сезонності згладжуються за допомогою експоненціального згладжування. При цьому параметри згладжування можуть бути різними. Головне, що завжди можна підібрати такі параметри згладжування, які дають велику точність моделі на тестовому наборі і потім використовувати ці параметри при реальному прогнозуванні [9].

**Викладення матеріалу і результати дослідження.** Під час аналізу моделей експоненціального згладжування було використано статистичні дані електроспоживання підприємства харчової промисловості. Часовий ряд включає щомісячне електроспоживання підприємства в період з березня 2012 по листопад 2015 рр., наведений на рис. 1.

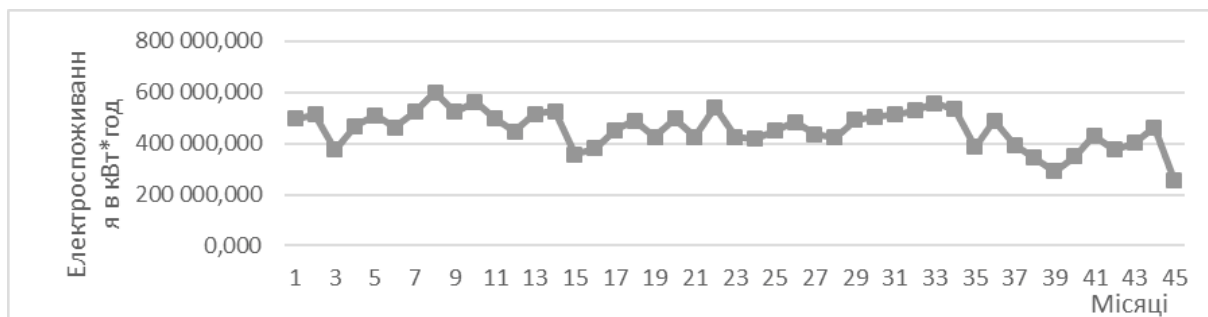


Рис. 1. Часовий ряд спостережень електроспоживання підприємства харчової промисловості

Частіше для описання часових рядів з характеристиками що варіюються найбільше часто використовують метод експоненціального згладжування [7]. Цей метод застосовується для кількісної оцінки впливу яке надає на прогнозний показник попередні члени динамічного ряду з врахуванням їх віддаленості від кінця розглянутої послідовності змінних величин.

При використанні метода експоненціального згладжування степінь дії кожного члена динамічного ряду на величину змінної у в майбутньому розподіляється в відповідності з експоненціальним законом. Це означає, що дія замикаючих впливів відбивається на прогнозних оцінках помітніше чим вплив початкових рівнів ряду [7].

Експоненціальне згладжування являється простим варіантом самонавчальної моделі. Обчислення виконуються ітеративно. Вони потребують менше арифметичних операцій, чим для моделей зі змінним середнім  $S_t = \frac{1}{\tau} \sum_{i=\tau}^1 x_{t-i}$ . Масив передісторії зменшується до одного значення



$S_{t-1}$ . Експоненціальне згладжування завжди використовують попереднє значення експоненціальної середньої

$$\bar{x}_t = \alpha x_t + (1 - \alpha) \cdot S_t, \quad (1)$$

де  $0 < \alpha < 1$  параметр згладжування.

Коли процес тільки починається, повинна бути деяка величина  $S_0$ , наприклад, середнє значення  $S_0 = \frac{1}{\tau} \sum_{i=\tau}^1 x_i$ , яке може бути використано в якості значення, попереднього  $S_1$ . Розглянемо ряд, генерований моделлю

$$x_t = a + \xi_t,$$

де  $a = \text{const}$ ;  $\xi_t$  - випадкові неавтокорельовані відхилення, або шум із середнім значенням 0 і дисперсією  $\sigma^2$ . Використаємо до нього процедуру експоненціального згладжування (1). Можна показати, що

$$S_t = \alpha \sum_{i=0}^N \omega^i x_{t-i} + S_0 \omega^N,$$

Являється зваженою сумою всіх членів ряду. Так як  $\omega < 1$  ( $\omega = 1 - \alpha$ ), то при  $N \rightarrow \infty$   $\omega^N \rightarrow 0$  і  $\alpha \sum_{i=0}^{N-1} \omega^i \rightarrow 1$ .  $S_t = \alpha \sum_{i=0}^{\infty} \omega^i x_{t-i} = \alpha + \alpha \sum_{i=0}^{\infty} \omega^i \xi_{t-i}$ .

Відповідно експоненціальне згладжування можна представити як фільтр, на вхід якого в вигляді потоку послідовно поступають члени вихідного ряду, а на виході формуються значення експоненціальної середньої.

При цьому ваги зменшують експоненціального в залежності від давності спостереження.

Чим менше  $\alpha$ , тим в більшому ступені фільтрується коливання вихідного ряду.

Найдемо математичне очікування  $M(S_t) = M(x_t) = a$  і дисперсія

$$D(S_t) = M[(S_t - a)^2] = M[(\alpha \sum_{i=0}^{\infty} \omega^i \xi_{t-i})^2] = \alpha^2 \sum_{i=0}^{\infty} \omega^{2i} \sigma^2 = \sigma^2 \frac{\alpha}{2 - \alpha}.$$

Так як  $0 < \alpha < 1$ , то  $D(S_t) = D(x_t) = \sigma^2$ . Як видно при великому значенні  $\alpha$  дисперсія експоненціального середнього незначно відрізняється від дисперсії ряду  $x_t$ . Таким чином, експоненціальна середня  $S_t$  має те, що математичне очікування, що і ряд  $x_t$  но меншу дисперсію. Чим менше  $\alpha$  тим в більшій степені зменшується дисперсія експоненціальної середньої. Експоненціальне середнє використовується для прогноз в момент  $t$  на період попередження  $l$ :  $x_t(l) = S_t = S_{t-1} + \alpha(x_t - S_{t-1})$ . Новий прогноз отримуємо коригуванням попереднього прогнозу з врахуванням його похибки. Оскільки будь-яка дискретно-безперервна функція може бути представлена у вигляді суми ступінчатих функцій виду:  $a_t = a_l l(t)$ , то передбачається, що часовий ряд генерується моделлю  $x_t = a_t + \xi_t$ , де  $a_t$  - в загальному випадку є випадкова величина. При короткостроковому прогнозуванні бажано відобразити зміну  $x_t$  в той же час найкращим чином очистити ряд від випадкових коливань  $\xi_t$ . Для цього, з одного боку, необхідно збільшити вагу більш свіжих спостережень, що можна досягти збільшенням  $\alpha$ , а з іншого боку для згладжування випадкових відхилень величину  $\alpha$  потрібно зменшити. Як видно, ці дві вимоги знаходяться в протиріччі. Пошук компромісний значення  $\alpha$  становить завдання оптимізації моделі. У [8] було показано для прогнозування стаціонарного процесу з автокореляційною функцією виду  $\rho_l = \rho_1^l$ , що мінімум середнього квадрата помилки при прогнозуванні такого ряду на 1 крок вперед ( $l = i = 1$ ) буде при

$$\alpha_{opt} = \begin{cases} \frac{3\rho_1 - 1}{2\rho_1} & 1/3 < \rho_1 \leq 1 \\ 0 & -1 \leq \rho_1 \leq 1/3 \end{cases},$$

де  $\rho_1$  - коефіцієнт автокореляції при лагу 1.

Якщо  $l > 1$ , то суттєво підвищується критична величина  $\rho_{1крит}$ , нижче за яку оптимальне значення  $\alpha_{opt}$  дорівнює 0. Якщо дані сильно корельовані  $\rho_1 \leq 1/3$  і період попередження  $l$  малий, якое згладжувати не варто. Доцільно в якості прогнозу використовувати найбільш пізніше спостереження. Якщо  $\rho_1 \leq 1/3$ , то найбільший, що може дати найпростіша модель, це оцінка середнього рівня, навколо якого варіює процес [9]. Для короткострокових прогнозів зна-

чення  $\alpha$ , як правило, потрібно брати великим, а для більш довгострокових меншим. Вибір конкретних значень параметрів  $\alpha$  багато в чому визначається досвідом розробника.

#### Метод Хольта

Метод Хольта або експоненціального згладжування з лінійним трендом родоначальник методів адаптивного прогнозування [9]

$$\begin{cases} S_t = \alpha(S_{t-1} + T_{t-1}) + (1 - \alpha)x_t \\ T_t = \nu(S_t - S_{t-1}) + (1 - \nu)T_{t-1} \end{cases}, \quad (2)$$

в якому крім константи  $\alpha$  використовуються константа  $\nu$  згладжування тренда.

#### Метод Хольта-Вінтера

Метод Хольта-Вінтера або метод Вінтера, в якому фігурує додаткова константа  $\eta$  згладжування циклів з періодом  $p$  [9]

$$S_t = \alpha(S_{t-1} + T_{t-1}) + (1 - \alpha) \frac{x_t}{Z_{t-p}}$$

$$Z_t = \eta(x_t / S_{t-1}) + (1 - \eta)Z_{t-p}$$

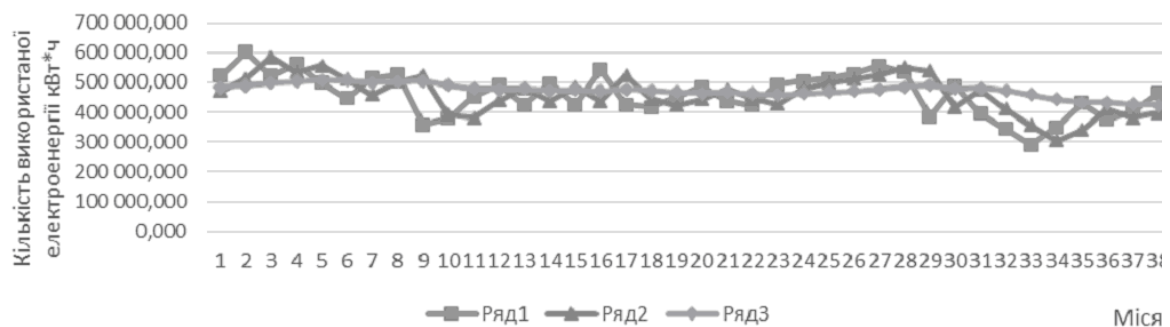
Оптимальне значення параметра  $p$  є те, яке мінімізує суму квадратів залишків.

**Результати дослідження.** Загальне формулювання задачі дослідження являється те, як впливає модель експоненціального згладжування на точність прогнозу електроспоживання.

Послідовні значення споживання електроенергії за період з березня 2012 - листопад 2015 рр.

Дані отримані зі статистики  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

Графік часового ряду електроспоживання підприємства харчової промисловості подано на рис. 1.



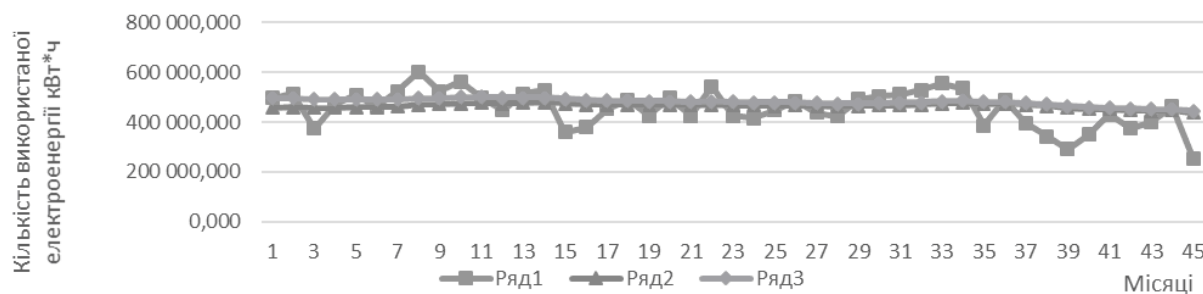
**Рис. 2.** Порівняльний графік вихідного ряду 1 та прогнозних значень електроспоживання підприємства: при  $\alpha=0,8$  – ряд 2;  $\alpha=0,1$  – ряд 3

Метод експоненціального згладжування при вибраних коефіцієнтах  $\alpha=0,8$ ;  $\alpha=0,1$ . Як видно з графіка при  $\alpha=0,8$  прогнозні дані більше мають форму фактичних даних, але похибка становить більше значення 2,39% і точність прогнозування 97,61% [табл. 1]. При  $\alpha=0,1$  прогнозні дані менше схожі на фактичні, але похибка становить менше значення 2,21% і точність прогнозування 97,79% [табл. 1].

Метод експоненціального згладжування при вибраних коефіцієнтах за формулою Брауна  $\alpha=0,04$  та вибір початкових даних двома способами: 1 спосіб  $S_0$  – середньоарифметичне значення показників за всі місяці –  $S_0=456356,1$ ; 2 спосіб  $S_0$  дорівнює початковому значенню вхідних даних дослідження –  $S_0=496490,5$ . Як видно з графіків при  $\alpha=0,04$  та початкових значеннях 1-  $S_0=456356,1$ ; 2-  $S_0=496490,5$  прогнозні дані менше схожі на фактичні, але похибка складає менше значення:

1 спосіб похибка становить 2,26% і точність прогнозування 97,74% [табл. 1];

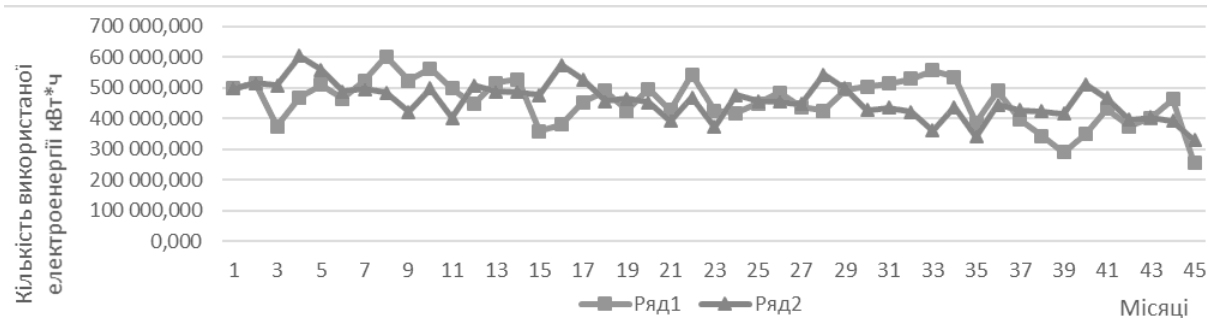
2 спосіб похибка становить 2,22% і точність прогнозування 97,78% [табл. 1].



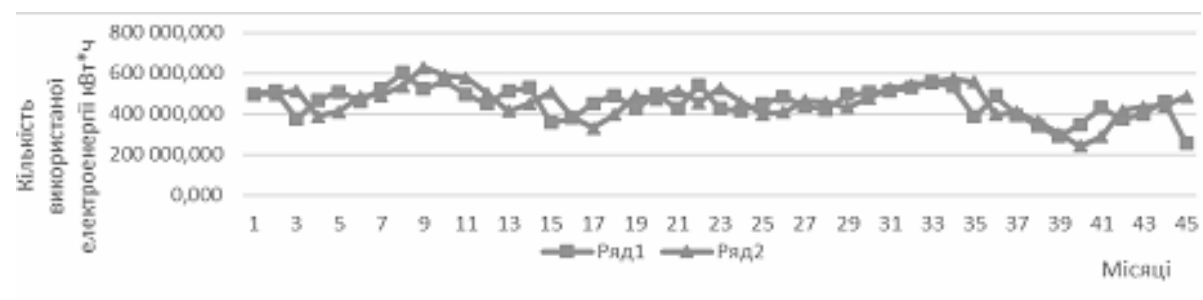
**Рис. 3.** Порівняльний графік вихідного ряду 1 та прогнозних значень електроспоживання підприємства: при  $\alpha=0,04$ ,  $S_0=456356,1$  – ряд 2;  $\alpha=0,04$ ,  $S_0=496490,5$  – ряд 3

Метод експоненціального згладжування з лінійним трендом (метод Хольта)

$y = a + bx$   $b=1531,4$ ,  $a=448484$  при вибраних коефіцієнтах та виборі початкових даних. Як видно з графіків прогнозні дані не схожі на фактичні, при цьому похибка становить 3,38%, а точність прогнозу 96,62% [табл. 1].



**Рис. 4.** Порівняльний графік вихідного ряду 1 та прогнозних значень електроспоживання підприємства: при  $b=1531,4$ ,  $a=448484$  – ряд 2



**Рис. 5.** Порівняльний графік вихідного ряду 1 та прогнозних значень електроспоживання підприємства при коефіцієнтах згладженого ряду  $k=0,5$ ; згладженого тренда  $b=0,9$ ; згладженого сезонності  $q=0,5$  – ряд 2

Метод експоненціального згладжування (метод Хольта-Вінтера) при вибраних коефіцієнтах згладженого ряду  $k=0,5$ ; згладженого тренда  $b=0,9$ ; згладженого сезонності  $q=0,5$  та виборі початкових даних

Як видно з графіків прогнозні дані схожі на фактичні, при цьому похибка становить 4,79 %, а точність прогнозу 95,21 % [табл. 1].

Результати прогнозування та графіка точності прогнозування за різними моделями експоненціального згладжування наведено в табл. 1 та рис. 6.

Таблиця 1

## Результати досліджень

| Методи експоненціального згладжування                                                   | Коефіцієнти згладжування                  | Похибка прогнозування методу | Середньоквадратична похибка |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Експоненціальне згладжування першого порядку                                            | $\alpha=0,8$                              | 2,39%                        | 97,61%                      |
|                                                                                         | $\alpha=0,1$                              | 2,21%                        | 97,79%                      |
|                                                                                         | Метод Брауна $\alpha=0,04$                | 2,26%                        | 97,74%                      |
|                                                                                         |                                           | 2,22%                        | 97,78%                      |
| Експоненціальне згладжування з лінійним трендом (метод Хольта) рівняння тренда $y=bx+a$ | $b=1531.4$                                | 3,38%                        | 96,62%                      |
|                                                                                         | $a=448484$                                |                              |                             |
| Експоненціальне згладжування (метод Хольта-Вінтера)                                     | Коефіцієнт згладженого ряду $k=0,5$       | 4,79%                        | 95,21%                      |
|                                                                                         | Коефіцієнт згладженого тренда $b=0,9$     |                              |                             |
|                                                                                         | Коефіцієнт згладженого сезонності $q=0,5$ |                              |                             |

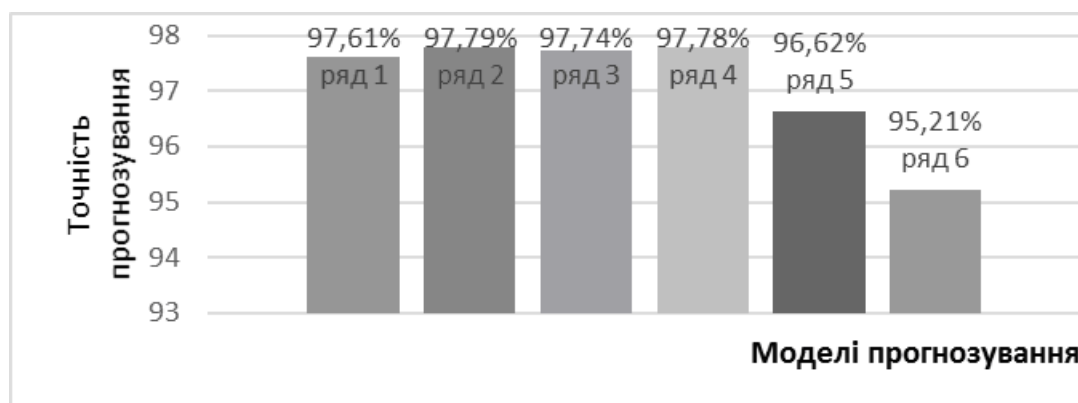


Рис. 6. Порівняльний графік точності прогнозування електроспоживання підприємства за моделями експоненціального згладжування (див. табл. 1)

**Висновки і напрямки подальших досліджень.** З аналізу моделей слідує, те, що кожна із моделей прогнозування являє собою логічне завершення, але всі вони мають як переваги так і недоліки:

дані методи мають відносно невелику похибку прогнозовної моделі та являються методами швидкого прогнозування;

результати прогнозу сильно залежить від параметрів згладжування та інтервал, в межах якого змінюється параметр згладжування, дуже великий і змінюється при прогнозуванні різних часових рядів, при цьому виробити чіткі рекомендації по вибору параметра не вдається;

в отриманих результатах також можна отримати результат, що просте експоненціальне згладжування являється найбільш точнішим при прогнозування на середньострокові та довгострокові прогнози при цьому точність складає 97,79 % і похибка моделі 2,21 %.

також можна відзначити недолік метода Хольта-Вінтера тим що він являється менш точним та більш складним в прогнозуванні при цьому точність складає 95,21 % і похибка 4,79 %

#### Список літератури

1. Праховник А.В. Энергосбережение режимов электроснабжения горнодобывающих предприятий / А.В. Праховник, В.П. Розен, В.В. Дегтярев, – М.: Недра, 1985. – 232 с.
2. Бечвая Е.А. Прогнозирование спроса: методы и модели / Е.А. Бечвая, В.П. Розен, – Под общ. ред Старостиной А.А. – К.: ООП Коммунальная экономика, 1996. – 196 с.
3. Ивахненко А.Г. Принятие решений на основе самоорганизации / А.Г. Ивахненко, Ю.П. Зайченко, В.Д. Димитров, – М.: «Сов. радио», 1976. – 280 с.

4. **Макоклюев Б.И.** Расчет и планирование режимных параметров, балансов мощности и электроэнергии АО-энерго и предприятий сетей с помощью программных комплексов «Энергостат» и «РБЭ». / **Б.И. Макоклюев**, - М.: Сборник докладов «Современные методы и средства расчета, нормирования и снижения технических и коммерческих потерь электроэнергии в электрических сетях» НЦ ЭНАС, 2000.

5. **Макоклюев Б.И.** Прогнозирование потребления электроэнергии в АО «Мосэнерго». / **Б.И. Макоклюев, А.И. Владимиров, Г.И. Фефелова**, – ТЭК N 4, 2001. - с. 56–57.

6. **Ивашенко В.А.** Модели автоматизированного прогнозирования электрических нагрузок промышленных предприятий / **В.А. Ивашенко, М.В. Колоколов, Д.А. Васильев** // Управление большими системами. Выпуск 34 с.254 – 266.

7. **Денискин В.В.** Основы экономическогно прогнозирования в пищевой промышленности / **В.В. Денискин**, – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 192с.

8. **Светульников И.С.** Методы и модели социально-экономического прогнозирования / **И.С. Светульников, С.Г. Светульников**, - М.: Издательство Юрайт, 2014. – 351 с.

9. **Лукашин Ю.П.** Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов / **Ю.П. Лукашин**, – М.: Финансы и статистика, 2003. – 416с.

Рукопис подано до редакції 25.03.16

УДК621.337.41

О.Н. СИНЧУК, д-р техн. наук, проф., А.В. ПИРОЖЕНКО, канд. техн. наук, доц.

Криворожский национальный университет

В.О. ЧЕРНАЯ, канд. техн. наук, доц., В.О. ЧЕРНЫЙ, студент

Кременчугский национальный университет им. Михаила Остроградского

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕМЕНТАХ ЗАЩИТЫ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

В статье рассмотрены способы защиты транзисторных модулей широтно-импульсных преобразователей в структурах тяговых электротехнических комплексов. Предложена схема защиты силовых модулей от превышения тока. Приведены результаты моделирования аварийных ситуаций в тяговых полупроводниковых преобразователях и схем их защиты.

**Ключевые слова:** преобразователь, ток, напряжение, электрическая защита, пробой, электровоз, тяговый двигатель

**Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями.** Вопросы защиты импульсных преобразователей (ИП) как структурных элементов тяговых электротехнических комплексов являются весьма важными и актуальными, так как связаны с надежностью функционирования тягового электропривода и комплекса в целом [1,2]. Особенно это актуально для электромеханических систем рудничных видов электровозов, где главенствующую роль играют весогабаритные показатели. Большинство современных преобразователей на основе полупроводниковых приборов имеют в своем составе встроенные элементы защиты силовых модулей, которые позволяют избежать развития аварийных ситуаций при работе ИП, однако далеко не все они учитывают специфику условий эксплуатации рельсового транспорта в подземных условиях [3–6].

**Анализ исследований и публикаций.** Среди многообразия способов защиты тягового электрического оборудования с импульсными преобразователями (ИП) напряжения от проявления различных внутренних факторов следует выделить максимальную токовую защиту (МТЗ). Данный вид быстрodeйствующей защиты призван срабатывать при превышении значений мгновенного тока в нагрузке или в силовых *IGBT* модулях преобразователя [7]. Современные виды МТЗ имеют два уровня реализации: на уровне микропроцессорной системы управления и на уровне управляющих драйверов *IGBT*. В первом случае выходной ток преобразователя относится к числу обязательно измеряемых координат электропривода (как для реализации контура регулирования тока в системе управления электроприводом, так и для реализации токовых защит). Микропроцессорная система управления в определенные дискретные моменты времени выполняет аналогово-цифровое преобразование величины выходного тока преобразователя и при превышении заданного значения блокируется управление всеми ключами преобразователя. Во втором случае в связи с ограниченными функциональными возможностями

микропроцессорной системы управления отсутствует возможность защиты преобразователя от сквозных токов, которые могут возникнуть, например, при пробое одного из *IGBT*. Поэтому управляющие драйвера транзисторов должны содержать функцию защиты ключей от превышения значений уровней тока.

Защита транзисторных ключей широтно-импульсного преобразователя является одной из важнейших функций, которая обеспечивает их высокую надежность. Ключи преобразователей в тяговых структурах тяговых электроприводов могут быть повреждены при возникновении повреждений в тяговых двигателях, соединительных кабелях, соединяющих преобразователь и двигатель, а также при ошибочных включениях двух ключей, что приводит к возникновению сквозного тока. При таких неисправностях ток через транзисторы очень быстро возрастает, что в случае отсутствия соответствующих быстродействующих защит непременно приведет к их выходу из строя. Таким образом, только превентивно своевременное определение неисправности позволит своевременно закрыть транзистор до возникновения факта пробоя, «сдержав» рост тока короткого замыкания.

Наиболее опасным типом коротких замыканий в преобразователях является сквозное замыкание одного плеча, поскольку ток короткого замыкания протекает по цепи с очень низким сопротивлением и быстро достигает значений, которые в несколько раз превышают допустимый ток ключа.

Существующие способы защиты *IGBT* базируются на измерении тока коллектора, напряжения коллектор-эмиттер и напряжения на затворе. Наиболее надежным способом является подключение датчика тока (трансформатора тока или шунта) последовательно с силовым вентилем [8,9]. Недостатком использования трансформатора тока является отсутствие возможности измерения постоянной составляющей тока, а также необходимость использования магнитного сердечника с широкой полосой пропускания в связи с быстрым нарастанием тока короткого замыкания. Недостаток использования шунта заключается в неэффективном энергопотреблении, а также потенциальной возможности увеличения паразитной емкости силовой цепи. Кроме того, дорогостоящие дополнительные датчики увеличивают габариты силовой части преобразователя, особенно при использовании плоских шин.

Один из существующих способов защиты базируется на использовании токового зеркала и реализуется за счет интеграции чувствительного транзистора в силовой модуль [10]. Токовое зеркало может индизировать наличие перегрузки по току, поскольку ток через зеркало является пропорциональным току в основном *IGBT*. Основным недостатком способа заключается в повышенной сложности производства силовых моделей, дополнительных потерях энергии, а также увеличении общей стоимости модуля.

Среди известных способов защиты транзисторных модулей следует выделить способ, основанный на использовании чувствительного диода для определения напряжения эмиттер-коллектор при превышении максимально допустимого тока. Данный способ не требует использования чувствительного токового элемента, однако с целью устранения ошибочных срабатываний необходимо введение программированной задержки (порядка 1-5 мкс), что позволяет напряжению на коллекторе уменьшиться ниже порогового уровня, завершив переходной процесс включения транзистора. Ток короткого замыкания может достичь очень большого значения за время коммутации, что может привести к повреждению устройства из-за локального перегрева.

Один из известных способов защиты позволяет анализировать изменение напряжения на затворе и скорости нарастания прямого напряжения для определения неисправностей. Эти способы требуют сложной системы защиты и являются чувствительными к паразитной индуктивности, что вызывает шум в напряжении затвора транзистора, а также к току обратного диода, и существенно усложняет практическую реализацию данного способа [11].

**Постановка задачи.** Исследование на математической модели электрических процессов в импульсных преобразователях напряжения с различными способами защиты силовых модулей импульсного преобразователя тягового электротехнического комплекса рудничных электровозов.

**Изложение материала и результаты.** Электроподвижной состав рудничных шахт Украины оснащен тяговыми двигателями постоянного тока последовательного возбуждения и эффективными преобразователями, которые обеспечивают эффективное управление электровозоставом при поддержании на высоком уровне показателей надежности при низких показателях

энергопотребления [12-13]. Однако, несмотря на комплексный подход в решении проблемы энергоэффективности электровозов ряд вопросов, в том числе защиты элементов преобразовательных устройств, до сих пор остаются нерешенными.

Один из наиболее рациональных способов защиты ключей ИП постоянного тока от к.з. заключается в использовании измерения тока с помощью индуктивного сопротивления (рис. 1). Принцип действия защиты заключается в следующем. При превышении напряжения на конденсаторе СР выше допустимого уровня срабатывает триггер, который устанавливает аварийный сигнал, блокирующий управление всеми ключами преобразователя.

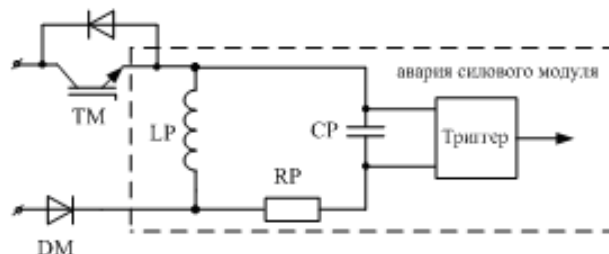


Рис. 1. Схема защиты силовых модулей тягового преобразователя от превышения значений уровня тока

Для исследования работы ИП проведено математическое моделирование, результаты которого представлены на рис. 2-3.

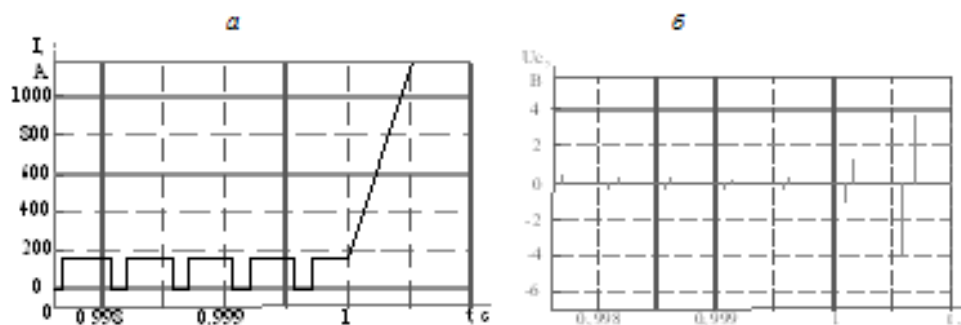


Рис. 2. Результаты моделирования электрических процессов в импульсном преобразователе при пробое ключа: а - ток через транзистор; б - напряжение на конденсаторе схемы защиты

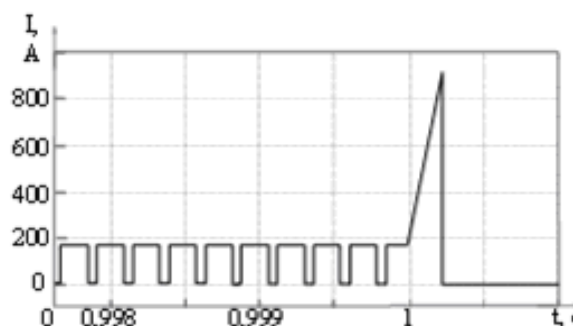


Рис. 3. Результаты моделирования электрических процессов в схеме максимально-токовой защиты транзисторов при пробое ключа

Как видно из результатов моделирования (рис. 2а), при отсутствии в структуре ИП элементов защиты величина тока увеличивается на каждом интервале времени, когда открывается второй ключ того же плеча, в котором находится пробитый транзисторный модуль. Из этого следует, что такой неконтролируемый процесс спровоцирует быстрый выход транзистора из строя. При этом входная защитная аппаратура ИП может не успеть сработать, а даже если предположить своевременное отключение ИП от сети, это не остановит сверхток через ИП из-за наличия емкостей. Таким образом, аварийный режим будет наблюдаться до полного разряда емкостей.

Увеличение тока, протекающего через транзисторы, приводит к увеличению величины импульса напряжения на конденсаторе (рис. 2б).

Задача схемы МТЗ – фиксирование момента, в который величина напряжения на конденсаторе превышает заданное значение, что свидетельствует о превышении тока в силовом модуле выше максимально допустимого кратковременного значения. В этом случае схема генерирует аварийный сигнал, блокирующий управление всеми ключами ИП.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что защита, реализованная по указанной схеме, позволит при наличии аварийных режимов, закрыть транзистор до возникновения его пробоя.

Немаловажным вопросом при функционировании ИП является их защита от кратковременного превышения и исчезновения напряжения питания.

Питание преобразователей тягового электропривода шахтных электровозов осуществляется от тяговой сети, которые относятся к сетям с ограниченной мощностью, что создает реальную возможность кратковременного повышения или исчезновения напряжения из-за наличия аномальных режимов работы контактной сети.

Это приводит к повышению или понижению напряжения на входе ИП.

Поэтому система управления должна блокировать работу ИП и информировать машиниста электровоза об отклонении напряжения ниже допустимого уровня, который задается соответствующими параметрами настройки системы.

Повышение напряжения выше допустимого уровня может вызвать повреждение изоляции конденсаторов или даже силовых модулей, понижение напряжения ниже допустимого уровня может свидетельствовать о наличии аварийных ситуаций в выпрямительной части ИП.

Поскольку при работе ИП напряжение на входе может изменяться, то это приведет к изменению уровня выходного напряжения, что может вызвать несанкционированные колебания частоты вращения тяговых электрических двигателей (ТЭД), а следовательно и скорости движения электровоза.

Для устранения указанных недостатков система управления ТЭД должна выполнять функцию стабилизации выходного напряжения, компенсируя изменение напряжения на входе ИП.

Поскольку это напряжение является измеряемым сигналом для реализации названных защит, то реализация такой функции требует лишь коррекции ширины активного импульса выходного напряжения в зависимости от соотношения между текущей величиной входного напряжения и ее номинальным значением.

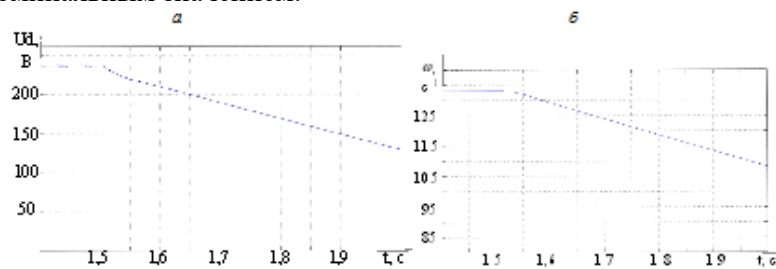


Рис. 4. Результаты моделирования электрических процессов при исчезновении напряжения питания и отсутствии компенсации изменения напряжения в импульсном преобразователе: а - график изменения напряжения на входе импульсного преобразователя; б - график изменения скорости тягового двигателя



Рис. 5. Результаты моделирования электрических процессов при пропадании напряжения питания и компенсации изменения напряжения в импульсном преобразователе: а - график изменения напряжения на входе импульсного преобразователя; б - график изменения скорости тягового двигателя; в - график изменения скважности импульсов выходного напряжения



На рис. 4 представленны результаты моделирования работы системы при отсутствии функции компенсации изменения напряжения на входе ИП.

Из графиков на рис. 4 видно, что при снижении напряжения питания наблюдается постепенный разряд конденсаторов на входе ИП, что вызывает уменьшение выходного напряжения ИП, а также падение частоты вращения ТЭД.

В случае превышения напряжения на входе ИП система управления должна отслеживать два уровня уставки защиты: уровень включения тормозного транзистора, а также аварийный уровень напряжения, при котором следует производить отключение входной контактной аппаратуры с целью защиты элементов ИП.

На рис. 5 представлены результаты моделирования работы системы при наличии компенсации «бросков» напряжения.

Из полученных графиков следует заключение - при наличии компенсации изменения напряжения несмотря на падение входного напряжения ИП за счет увеличения скважности импульсов сохраняются те же значения среднего за период выходного напряжения, а значит и частота вращения ТЭД. Т.о. система защиты позволяет сохранить установившийся режим работы электроподвижного состава несмотря на снижение напряжения сети.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Существующие виды современных электрических защит элементов полупроводниковых преобразователей позволяют предотвратить развитие аномальных режимов в силовой цепи тягового электропривода, но не обеспечивают полной защиты, поскольку не достаточно адаптированы к условиям и режимам работы на электроподвижном составе рудничных шахт.

Одними из существенных недостатков современных способов защиты силовых IGBT модулей, которые сдерживают их широкое внедрение на рудничных электровозах, являются их высокие массогабаритные и стоимостные показатели.

Предложенный на основе исследования электрических процессов вариант схемотехническое решение защиты силовых модулей от аварийных режимов позволяет при минимальных изменениях в структуре преобразователя достичь максимального эффекта от защиты в случае возникновения и развития аномальных режимов.

#### *Список литературы*

1. **Дебелый, В.Л.** Основные направления развития шахтного локомотивного транспорта [Текст] / В.Л. Дебелый, Л. Л. Дебелый, С. А. Мельников // Уголь Украины. – 2006. – №6. – С. 30–31.
2. **Синчук, О.Н.** Импульсные системы управления и защиты на рудничном электровозном транспорте [Текст] / О. Н. Синчук, В. В. Чумак, О. В. Ершов. – К. : АДЕФ–Украина, 1998. – 280 с.
3. **V. John, B. Suh, T. A.** Lipo Fast-clamped short-circuit protection of IGBT's [Text] / IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 35, №. 2, pp. 477–486, 1999.
4. **L. Chen, F. Z. Peng.** Active fault protection for high power IGBTs [Text] / IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp. 2050–2054, 2009.
5. **M. A. Rodriguez, A. Claudio, D. Theilliol, L. G. Velan** A new fault detection technique for IGBT based on gate voltage monitoring [Text] / IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 1001–1005, 2007.
6. **Синчук, О.М.** Нештатні режими і структура системи захисту від них при функціонуванні двоосних електровозів [Текст] / О. М. Синчук, В. О. Чорна // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 2. – С. 100–103.
7. Максимальная токовая защита. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинград. отд-ние, 1991. – 96 с.
8. **Макаренко, М. П.** Системний аналіз електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах електроенергії модуляційного типу [Текст] / М. П. Макаренко, В. І. Сенько, М. М. Юрченко // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – Київ. – 2005. – 241 с.
9. Мікропроцесорна техніка [Текст] / Ю. І. Якименко [та ін.] ; під ред. Т.О. Терещенко. – К. : ІВЦ Видавництво «Політехніка», «Кондор», 2004. – 440 с.
10. **Хоровиц, П.** Искусство схемотехники. В 3-х томах: Т. 1 [Текст] / П. Хоровиц, У. Хилл. – М. : Мир, 1993. – 413 с.
11. **Сенько В. І.** Електроніка і мікросхемотехніка : у 4 т. Т. 3. Цифрові пристрої / В. І. Сенько, М. В. Панасенко, Є. В. Сенько, М. М. Юрченко, Л. І. Сенько. – Х., 2008. – 400 с.
12. Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов [Текст] / О. Н. Синчук [и др.] ; под ред. О. Н. Синчука. – К. : ІЕДНАУ, 2006. – 252 с.
13. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии в структурах электроприводов. Схемотехника и принципы управления: [Текст]: учеб. пособие / И. О. Синчук, А. А. Чернышев, О. В. Пасько [и др.] ; под ред. О. Н. Синчука. – Кременчук: ИП Щербатих О. В., 2008. – 88 с.

Рукопись поступила в редакцию 29.03.16

УДК 621.311.4.031

О. М. СІНЧУК, д-р техн. наук, проф., Криворізький національний університет  
С. М. БОЙКО, канд. техн. наук, доц.,  
Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського  
М.М. ЮРЧЕНКО д-р техн. наук, проф., Інститут електродинаміки НАН України

## ДО МОЖЛИВОСТЕЙ РОЗБУДОВИ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВ ГІРНИЧО-ВИДОБУВНОГО КОМПЛЕКСУ З ВКЛЮЧЕННЯМ В ЇХ СТРУКТУРУ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

У статті розглянуто потенціал альтернативних джерел енергії підприємств гірничо-видобувного комплексу. Обґрунтовано використання електромеханічних вітроенергетичних комплексів в системах електроживлення підприємств гірничо-видобувного комплексу. Запропоновано впровадження локальних систем в комплекс структур мереж електроживлення підприємств гірничо-видобувного комплексу на базі відновлювальних джерел енергії.

**Ключові слова:** система електропостачання, електричні установки, альтернативні джерела енергії

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Гірничі підприємства, є найбільшими споживачами електричної енергії, яку вони отримують з електричної мережі.

Через високу енергоемність продукції, постійне збільшення цін на енергоносії (природний газ, нафтопродукти, електроенергія та ін.) частка енергетичної складової в собівартості продукції гірничо-збагачувальних підприємств досягає 27-32% [1].

Тому, все актуальнішим стає отримання власних обсягів електроенергії за рахунок використання поновлювальних джерел, особливо енергії вітру.

**Аналіз досліджень і публікацій.** За результатами аналізу відомих та доступних авторам публікацій [2-7], було зроблено висновок про те, що проведені раніше дослідження підтверджують необхідність та актуальність впровадження альтернативних джерел електричної енергії в умовах промислових підприємств, а саме підприємств гірничо-видобувного комплексу.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є обґрунтування доцільності використання вітроенергетичних комплексів для автономного виробництва електроенергії на підприємствах гірничо-видобувного комплексу.

**Викладення матеріалу та результати.** Для досягнення вищевикладеної мети була проаналізована можливість і специфіка роботи вітроенергетичного комплексу (ВЕК) в умовах діючих підприємств гірничо-видобувного комплексу.

Як відомо [2,3], електропостачання підземних гірничих робіт обумовлено рядом специфічних факторів, основними з яких є: прийнята технологія ведення робіт та гірничо-геологічні умови залягання корисних копалин [3].

При цьому система електропостачання гірничих робіт повинна відповідати наступним вимогам:

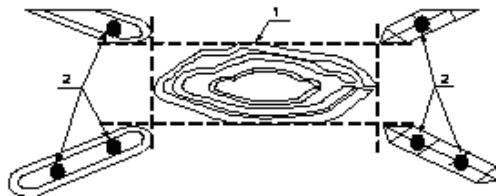
- забезпечувати безперебійне живлення електроенергією основних електроприймачів;
- бути безпечною у відношенні пожеж та ураження людей електричним струмом;
- забезпечувати необхідну якість електроенергії в умовах безперервної зміни технологічних параметрів гірських розробок і відповідних змін структур електричних мереж;
- бути економічною при дотриманні вимог, перелічених вище.

В даній роботі розглядається можливість використання енергій потоків атмосферного повітря на відвалах кар'єрів, між відвалами кар'єрів.

За результатами аналізу атмосферних повітряних потоків на території гірничо-видобувних підприємств, можна зробити висновок про те, що згідно технології ведення гірничих робіт, повітряний потік, в підземних гірничих виробках, як необхідна складова технологічного циклу вентиляції останніх, є достатньо потужним, і діє постійно і цілодобово. Доведено, що такого обсягу та швидкості повітряного потоку достатньо для генерування автономно 3-4 кВт електричної енергії вітроустановкою [3,4].

В результаті дослідження аеродинамічних характеристик повітряних потоків промислових підприємств гірничо-видобувного комплексу (ГВК) було зроблено висновок про те, що викори-

стання ВЕК, що використовуються як автономно так і в складі системи електропостачання, є доцільним і достатньо рентабельним [4]. Дослідження аеродинамічних характеристик вентиляції кар'єрів ГВК склали наступну картину. Інтенсивність природного провітрювання кар'єрів ГВК вітром знаходяться в залежності від швидкості вітрового потоку, що діє над кар'єром, і в зворотній від об'єму зони рециркуляції. Скорочення об'єму зони рециркуляції може бути досягнуте зменшенням кутів укосу бортів кар'єру за рахунок раціональної черговості відробітку уступів [4].



**Рис. 1.** Схема раціонального розташування вітроенергетичних комплексів на відвалах:  
1 - кар'єр; 2 - місця встановлення ВЕК

На рис. 1, як приклад показано схему раціонального розташування ВЕК на відвалах кар'єру, що дозволяє досягти збільшення коефіцієнту використання вітрового потоку при будь-якому напрямі вітру на поверхні [6].

На підставі проведених досліджень зроблений висновок про те, що найбільш раціональним шляхом інтенсифікації природного повітрообміну є максимально можливе звільнення території, що прилягає до кар'єру, від різних споруд, у тому числі й відвалів. В окремих випадках (наприклад, при будівництві нових кар'єрів на рівнинній місцевості) раціональне розташування відвалів і поверхневих споруд може дати відчутний ефект, яким, безумовно, не слід нехтувати.

У зв'язку з цим глибокі кар'єри мають комплекс засобів штучної вентиляції, який здатний здійснити надійне провітрювання кар'єрів навіть за найсприятливіших метеорологічних умов.

Відвали і будівлі, розташовані перед кар'єром з навітряного боку, підвищують турбулізацію повітря, що збільшує кут розкриття вітрового потоку, що надходить до кар'єру. При цьому зменшується об'єм рециркуляційної зони і поліпшується провітрювання кар'єру. Відстань таких відвалів від кар'єрів повинна бути не менше як десять їх висот [7].

Таким чином можна зробити висновок, що такі умови для збільшення швидкості повітряного потоку достатні для генерації певного обсягу електричної енергії вітроустановкою. Швидкість потоку повітря на поверхні відвалів достатньо для генерації певного обсягу електричної енергії вітроустановкою. Виходячи з результатів цих досліджень є сенс для умов кар'єрів ГВК будувати системні ВЕК з вітровими двигунами [7].

Беручи до уваги наведені вище результати дослідження, та потужності вітрогенераторів, можна зробити висновок про використання вітрогенераторів на відвалах кар'єрів ГВК для освітлення кар'єру та для передачі залишкової згенерованої потужності в мережу.

Водночас, аналіз розподілу потоків споживання електроенергії свідчить, що велика частка електричної енергії припадає саме на локальні енергетичні об'єкти, що обумовлює в цілому актуальність вирішення питань енергоефективності їх експлуатації [2]. До локальних об'єктів у гірничорудній промисловості відносяться: електротехнічні системи компресорних насосних станцій, вентиляційних та підйомних установок та інші.

Для досягнення викладеної мети проаналізована можливість і специфіка роботи розподілених джерел електроенергії (РДЕ) на базі відновлювальних джерел електроенергії (ВДЕЕ) в умовах діючих підприємств гірничо-видобувного комплексу.

У роботі пропонується підхід до побудови систем автоматизованого керування електроспоживанням промислових підприємств, заснований на базі відновлювальних альтернативних джерел енергії, у вигляді сукупності взаємозалежних структур. Як наслідок є необхідним та актуальним використання новітніх технологій для комутації електричних мереж з можливістю прогнозування їх енергетичних параметрів.

Таким чином, була проаналізована можливість і специфіка роботи РДЕ в умовах діючих підприємств ГВК, розроблена конструкція комплексу, синтезована її структура. Розроблена структура РДЕ на базі ВДЕЕ і система управління нею дозволяють збільшити надійність і як-

ість електропостачання споживачів, а також підтримувати безперебійність електропостачання споживачів електричної енергії [2].

За результатами дослідження зроблено висновок про те, що системи електропостачання на базі ВМЕС характеризуються наявністю в них генераторів обмеженої потужності, широким діапазоном зміни параметрів навантаження тощо [7-9]. У зв'язку з цим до їх застосування у складі схем електропостачання локальних енергетичних систем (ЛЕС) висувається ряд вимог, насамперед, надійність, обсяг згенерованої потужності, віддаленість споживачів від джерел живлення електроенергії, наявності зон з забрудненими та агресивними середовищами, вплив самих ЛЕС на якість електричної енергії тощо. Таким чином, РДЕ на базі ВДЕЕ слід наблизити до об'єкту споживання, щоб зменшити кількість мережових ланок та ступенів проміжної трансформації електроенергії та комутації в системі електропостачання в ЛЕС, що можливо на основі децентралізованої архітектури. Це, з одного боку, зменшує кількість проміжних ланок між ВДЕЕ та електроспоживачами, а також знижує кількість ступенів трансформації в ЛЕС, а з іншого може збільшити кількість факторів негативного впливу на якість електроенергії та негативні перехідні процеси в ЛЕС.

В результаті аналізу можливості впровадження ВДЕЕ у складі локальних енергетичних систем було виявлено, що РДЕ на базі ВДЕЕ, впливають на розподільні мережі в ЛЕС та перетворюють їх на активні елементи. Це призводить до необхідності внесення змін у прийнятті стратегії управління ЛЕС та планування структури і режимів локальних енергетичних систем. При цьому їхній вплив може мати як позитивний, так і негативний характер, тому доцільно заздалегідь ґрунтовно досліджувати та аналізувати питання приєднання РДЕ до ЛЕС в залежності від умов експлуатації та особливостей технологічного процесу електроприймачів ГВК [6].

До складу запропонованої системи електропостачання входить наступне устаткування: вітрові мініелектростанції; батарея акумуляторів, що служить для накопичення електроенергії при роботі ВДЕЕ для живлення системи її управління (або, за необхідності, як резервне джерело живлення); перетворювальна апаратура, у випадку використання генератора змінної напруги, що служить для перетворення електроенергії від ВДЕЕ у постійний струм для живлення інвертора й заряду акумуляторних батарей і постійного струму від акумуляторів напруги змінного струму зі стандартними параметрами.



Рис. 2. Структурна схема системи локальної електропостачання на базі відновлювальних джерел електроенергії

При проектуванні ВДЕЕ у складі локальної системи електропостачання (рис. 1), доводиться вирішувати питання, пов'язані з усталеною роботою станції, що виключає перевантаження генератора, за умови надійності в експлуатації. Тому запропоновано підключати мережу до споживача через автоматизований розподільчий пристрій, що призначений для регулювання електроживлення споживача в автоматичному режимі. Таким чином, за умови достатнього електропостачання споживача від ВДЕЕ, енергосистема працює в автономному режимі. У випадку, коли відбувається, за рядом причин, недостатнє генерування електричної енергії ВДЕЕ чи аварійна ситуація, то автоматичний розподільчий пристрій автоматично підключає до системи електропостачання споживача блок акумуляторних батарей, а у разі нагальної необхідності, мережу, як додаткове джерело електричної енергії. Так, мережа є додатковим аварійним джерелом електричної енергії.

За такої системи регулювання підвищується надійність електропостачання споживача та модульність системи в цілому. Оскільки, за необхідністю, відбувається регулювання кількості акумуляторних батарей та ВДЕЕ.

У зв'язку з особливостями електромагнітної сумісності та оптимальним електроживленням споживачів, при плануванні та впровадженні систем локального електроживлення на базі ВДЕЕ, необхідно щоб розташування ВДЕЕ відповідало вимогам забезпечення оптимального енергообміну, покращення якості електроенергії, вимогами до стійкості, надійності та ефективності роботи системи, потужністю, характером і місцем розташування джерел спотворень, а також умові досягнення оптимальних значень техніко-економічних показників системи в цілому.

За умови від'ємного значення потужності спожитої електричної енергії з енергосистеми відбувається віддача надлишку згенерованої електричної енергії до мережі.

Беручи до уваги наведені вище результати досліджень, результати досліджень, отримані раніше [4-10], можна зробити висновок про те, що використання РДЕ на базі ВДЕЕ в умовах залізрудних видобувних комплексів є реальним.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Використання вентиляційних повітряних потоків в умовах кар'єрів ГВК, з перетворенням вітрової енергії в електричну відкриває реальні можливості автономно генерувати і використовувати електричну енергію для власних потреб підприємств ГВК, заощадивши при цьому засоби на її закупівлю від «Обленерго».

Застосування в системах управління електричних мереж інтелектуальних систем, є одним із варіантів ефективного управління електропостачанням відповідальних об'єктів, що дасть можливість підвищити надійність та якість управління електропостачанням.

На підприємствах гірничодобувної галузі актуальним та можливим є впровадження в загальну структуру систем електроживлення локальних систем на базі ВДЕЕ, а саме БЕК.

Водночас з метою достатньо енергоефективного використання таких мініелектростанцій в структурах систем електроживлення необхідно ґрунтовно аналізувати питання приєднання локальних систем в комплекс вищезгаданих систем.

#### *Список літератури*

1. **Азарян А.А.** Комплекс ресурсо- і енергозберігаючих геотехнологій видобутку та переробки мінеральної сировини, технічних засобів їх моніторингу із системою управління і оптимізації гірничорудних виробництв / **А.А. Азарян, Ю.Г. Вілкул та ін.** // Кривий Ріг: Мінерал, 2006. – 219 с.
2. **Синчук И.О.** Потенциал электроэнергоэффективности и пути его реализации на производствах с подземными способами добычи железорудного сырья. Монография [Текст] / **И.О. Синчук, Э.С. Гузов, А.Н. Яловая, С.Н. Бойко** // под ред. докт. техн. наук, профессора О.Н. Синчука. – Кременчук: Изд. ЧП Щербатых А.В, 2015. – 296 с.
3. **Бойко С.М.** Можливості використання вітрогенераторів для виробництва електричної енергії в підземних виробках шахт // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця 2012. – Вип. 2, – С. 97-99.
4. **Синчук О.М.** Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії: навчальний посібник / **С.М. Бойко, К.І. Лосина та ін.** // Кременчук: Вид. ЧП Щербатих О.В., 2013. – 192с.
5. **Синчук О.М.** Електромеханічний комплекс вітроенергетичної установки для використання в підземних виробках залізрудних шахт // **С.М. Бойко** // Восточно-европейский журнал передовых технологий – Харьков, 2013. – № 1/8 (67). – С. 13-21.
6. **K. De Brabandere.** A voltage and frequency droop control method for parallel inverters / **B. Bolsens, J. Van den Keybus, A. Woyte, J. Driesen, and R. Belmans** // IEEE Trans. Power Electron. - Jul. 2007. - vol. 22, no. 4. - P. 1107–1115.
7. **H. Laaksonen.** Voltage and frequency control of inverter based weak LV network microgrid / **P. Saari, and R. Komulainen** // Int. Conf. Future Power Syst., - 2005, - P. 1–6.
8. **S. Tabatabaee.** Investigation of droop characteristics and X/R ratio on small-signal stability of autonomous microgrid / **H.R. Karshenas, A. Bakhshai, and P. Jain** // Proc. 2nd Power Electron., Drive Syst. Technol. Conf. – 2011. – P. 223–228.
9. **J.M. Guerrero.** Output impedance design of parallel-connected UPS inverters with wireless load-sharing control / **L. GarcıadeVicuna, J. Matas, M. Castilla, and J. Miret** // IEEE Trans. Ind. Electron. - Aug. 2005. - vol. 52, no. 4 - P. 1126–1135.
10. **Лежнюк П.Д.** Оптимізація режиму розподільних електричних мереж з розосередженими джерелами електроенергії / **П.Д. Лежнюк, О.А. Ковальчук, В.В. Кулик** // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика», випуск 11 (186). – 2011. – С. 250 - 251.

Рукопис подано до редакції 28.03.16

УДК: 621.316.1.027

В.М. КУТІН, д-р техн. наук, проф., М.В. КУТІНА, канд. техн. наук.  
Вінницький національний технічний університет

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ТА ЇЇ АНАЛІЗ

Запропонована діагностична модель роботоздатності ізоляції двопровідних мереж постійного струму, які використовуються в промисловості і на транспорті. Визначені умови роботоздатності ізоляції шляхом аналізу перехідної характеристики струму через шунтувальний зв'язок, який модулює тіло людини. Шляхом аналізу запропонованої моделі визначено оптимальну функціональну характеристику для пристрою захисного вимикання. Отримано умови обмеження струму в перехідному і сталому режимі, а також опору ізоляції полюсів відносно землі при симетричному її зниженню. Показано, що ємність мережі постійного струму впливає лише на час існування перехідного процесу при дотику людини до струмоведаючої частини. Струм через тіло людини має максимальну величину в перший момент дотику. Час дії електричного струму не обмежується сумарним часом спрацювання пристрою захисного вимикання та комутаційного апарата, що вимикає джерело живлення. Час протікання струму визначається ще й часом існування зворотної е.р.с. вимкнених двигунів постійного струму навантаження, а значення струму визначається законом зміни спадання е.р.с. електродвигунів постійного струму, що обертається. Функціональна характеристика пристрою захисного вимикання побудована за визначеними умовами роботоздатності ізоляції і виключає невикористані вимикання високопродуктивних машин і механізмів.

**Ключові слова:** двопровідна мережа постійного струму, робота здатність ізоляції полюсів відносно землі

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Як і в мережах змінного струму, в мережах постійного струму основною умовою визначення роботоздатності ізоляції є забезпечення безпеки експлуатаційного персоналу. Гранично допустимі рівні напруги дотику і струму при аварійних режимах виробничих установок не повинні перевищувати величин, визначених ГОСТ 12.1038-82. Правила побудови електроустановок вимагають оснащення двопровідникових мереж постійного струму засобами захисного вимикання, контролю ізоляції, захисного заземлення.

Періодичний та неперервний контроль ізоляції дозволяє підтримувати опір ізоляції полюсів мережі відносно землі на високому рівні шляхом визначення та усунення місць дефектів. Захисне заземлення знижує напругу дотику, яка може з'явитись під час порушення ізоляції на металевих частинах електроустановки, яка нормально не знаходиться під напругою. Пристрій захисного вимикання призначений для автоматичного вимикання електроустановок в разі однопольового дотику людини, або виникненню шунтувального зв'язку, коли струм витікання перевершує нормовану величину.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Існуючі методи і засоби контролю ізоляції полюсів є недосконалими. Найбільш розповсюдженими є мостові схеми [1-6]. Вони мають різний рівень чутливості до зміни значень провідності ізоляції окремих полюсів відносно землі та не реагують на симетричне зниження опору ізоляції полюсів. В методах схеми [2, 7-9, 11-13], які ґрунтуються на принципі накладання гармонічного сигналу на контрольовану мережу, чутливість до зміни технічного стану ізоляції полюсів залежить від співвідношення між ємнісною і активною провідністю ізоляції полюсів відносно землі. Зниження рівня частоти гармонічного сигналу з метою зменшення впливу ємнісної провідності на результати контролю не дає бажаного результату, так як значно ускладнюється задача контролю реакції на сигнал, що накладається через втрати потужності стороннього джерела живлення і внаслідок високого рівня завад.

Підвищення точності методів безперервного контролю ізоляції здійснюється шляхом застосування комбінації методів контролю і дублювання експерименту на основі точних методів періодичного контролю ізоляції [8,10,14,15-18].

Існуючі пристрої захисного вимкнення забезпечують виконання стандартів електробезпеки (ГОСТ 12.1.038.82), але на всьому діапазоні зміни опору ізоляції полюсів, можливих при експлуатації мереж постійного струму, мають "перезахист", тобто хибне спрацювання і невикористані вимикання високопродуктивних машин і механізмів.

Отже, для підвищення рівня надійності, безпеки та ефективності використання двопровідних мереж постійного струму необхідно вдосконалити контроль ізоляції та захисного вимкнення.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є визначення умов роботи здатності ізоляції двопровідної мережі постійного струму, шляхом аналізу динамічної характеристики через шунтувальний зв'язок між полюсом мережі і землею.

**Викладення матеріалу та результати.** Проаналізуємо умови роботоздатності ізоляції двопровідної мережі постійного струму безвідносно до використання конкретних засобів користуючись тільки нормами безпеки, наведеними в ГОСТ 12.1038-82. Двопровідну мережу постійного струму будемо розглядати як перетворювач вхідних сигналів у вихідні. Вхідним сигналом будемо вважати напругу  $U_0 = \text{const}$  джерела постійного струму, а вихідним сигналом – струм через шунтувальний зв'язок. Враховуючи те, що граничним випадком є дотик людини з опором  $R_h$ , тоді, струм через тіло людини може бути визначений як

$$i_h(t) = \frac{U_0 R_1}{R_1 R_2 + R_h (R_1 + R_2)} \left( 1 + \frac{R_1 R_2}{R_h (R_1 + R_2)} \exp \left[ - \frac{R_1 R_2 + R_h (R_1 + R_2)}{2 C_1 R_1 R_2 R_h} t \right] \right),$$

де  $R_1, R_2$  – омичний опір полюсів мережі відносно землі;  $C_1, C_2$  – ємність полюса мережі відносно землі.

Струм через тіло людини має максимальну величину в перший момент дотику, тобто при  $t = 0$

$$i_h(0) = U_0 R_1 / R_h (R_1 + R_2).$$

Навіть в тому випадку, коли застосовується пристрій захисного вимикання (ПЗВ), час дії електричного струму не обмежується сумарним часом спрацювання ПЗВ та комутаційного апарата, що безпосередньо вимикає джерело живлення, час протікання струму визначатиметься ще й часом існування зворотної е.р.с. вимкнених двигунів постійного струму навантаження.

Після вимикання мережі від джерела струму закон зміни струму  $i_h(t)$  визначається законом зміни часу спадання зворотної е.р.с. електродвигунів постійного струму, що обертаються. Найбільший час існування зворотної е.р.с. має місце, коли двигун не навантажений – в режимі холостого ходу. Постійна часу спадання зворотної е.р.с. залежить також від способу гасіння поля електродвигуна. Системи приводів постійного струму можуть використовуватись різні, тому визначити найбільший або середній час існування зворотної е.р.с. неможливо без розгляду конкретної схеми електроприводу.

Для узагальнення будемо розглядати вимикання мережі ПЗВ за допомогою фідерного автоматичного вимикача, встановленого після джерела, і відсутність гасіння поля електродвигуна. Визначивши момент інерції  $J$  через маховий момент  $GD^2$ , кутову швидкість через кількість обертів у хвилину, а електромагнітний обертаючий момент  $M_z$  через витрати потужності  $P_1$  з початковою кількістю обертів  $n_0$  перед вимиканням двигуна, маємо перетворене рівняння руху

$$GD^2 \left( \frac{\pi}{60} \right)^2 \frac{dn}{dt} = - \frac{P_1}{n_0}$$

або

$$T_{e,d} dn = -n_0 dt, \quad (1)$$

де  $T_{e,d} = \left( \frac{\pi}{60} \right)^2 \frac{GD^2 n_0^2}{P_1}$  – постійна часу вибігу електродвигуна.

Інтегруючи рівняння (1) в межах  $n_0$  до  $n$ , для проміжку часу від 0 до  $t$  отримаємо

$$e = K_e n_0 \Phi_e \left( 1 - (t/T_{e,d}) \right). \quad (2)$$

Із виразу (2) видно, що зворотна е.р.с. в разі самогальмування вимкненого двигуна постійного струму без гасіння його поля для випадку  $M_c = \text{const}$ , змінюється за лінійним законом.

З урахуванням (1), (2) максимальна величина струму через тіло людини після вимкнення мережі

$$i_h(0) = e R_1 / R_h (R_1 + R_2) = \left( K_e \Phi_e n_0 \left( 1 - (t/T_{e,d}) \right) R_1 \right) / R_h (R_1 + R_2). \quad (3)$$

Постійна часу  $T_{\epsilon, \delta}$  залежить від конструктивних елементів частин механізму навантаження на двигун, що обертається, типу двигуна, втрат на тертя та інших факторів і може змінюватись в широких межах, досягаючи десятків секунд. В зв'язку з цим можна вважати, що за час дії ПЗВ та комутаційного апарату  $t_{відк}$ , струм через людину не буде зменшуватись, залишаючись максимальним, тобто

$$i_h(0) = i_{h\delta on} = U_0 R_1 / R_h (R_1 + R_2),$$

де  $i_{h\delta on}$  - гранично допустимий струм через тіло людини коли час дії  $t = t_{відк}$ , який визначається ГОСТ 12.1038-82.

У сталому режимі

$$I_h = I_{h\delta on} = U_0 R_1 / (R_1 R_2 + R_h (R_1 + R_2)), \quad (3)$$

де  $I_{h\delta on}$  - граничнодопустимий струм через тіло людини коли час дії більше 1 с.

Вважаючи, що  $i_{h\delta on} = m I_{h\delta on}$ , із рівняння (3) можна визначити допустиму величину опору шунтувального зв'язку в перехідному режимі

$$R_{3.від*}^{(n)} \geq 1/m \left( 1 + (R_{2*} / R_{1*}) \right), \quad (4)$$

а із рівняння (3) для сталого режиму

$$R_{3.від*}^{(c)} \geq (1 - R_{2*}) / \left( 1 + (R_{2*} / R_{1*}) \right), \quad (5)$$

де  $R_{3.від*} = R_{3.від} I_{h\delta on} / U_0$ ;  $R_{1*} = R_1 I_{h\delta on} / U_0$ ;  $R_{2*} = R_2 I_{h\delta on} / U_0$  - відповідно відносні величини опору замикання та полюсів в мережі відносно землі.

Аналіз рівнянь (4) та (5) показав, що коли  $R_{1*} = const$  і зміні опору ізоляції від'ємного полюсу в межах  $(m-1)/m \leq R_{2*} \leq \infty$  переважають вимоги до обмеження струму в перехідному режимі і  $R_{3.від*}$  визначається за рівнянням (4), а коли  $0 \leq R_{2*} \leq (m-1)/m$ , переважають вимоги до обмеження струму в сталому режимі і  $R_{3.від*}$  визначається за рівнянням (5), його величина  $R_{3.від*} \leq 1$ .

В реальних умовах існує необхідність обмеження симетричного зниження опору ізоляції полюсів мережі  $R_m$  як за умовами електробезпеки, так і утворенню небезпечного шунтувального зв'язку для навантаження двопровідникової мережі постійного струму. Враховуючи те, що найбільш несприятливим буде випадок дотику людини з мінімальним опором його тіла, яке згідно ГОСТ 12.1038-82 приймається  $R_h = R_{\delta on min} = 6 \text{ кОм}$ , а  $R_1 = R_2 = R_m$  і переважають вимоги обмеження струму в сталому режимі із (3) можна визначити

$$R_{m*} = 1 - 2 R_{\delta on min*}, \quad (6)$$

де  $R_{m*} = R_m I_{h\delta on} / U_0$ ;  $R_{\delta on min} = R_{\delta on min} I_{h\delta on} / U_0$ .

Отже, рівняння (4)-(6) є умовами роботоздатності ізоляції. Згідно ГОСТ 12.1038-82  $i_{h\delta on} \leq 200 \text{ мА}$ ;  $I_{h\delta on} \leq 15 \text{ мА}$ , тому коефіцієнт  $m$  в рівняннях (4), (6) приймається  $m = 13,3$ .

Для оперативних мереж постійного струму, які використовуються на електричних станціях та підстанціях і пристрої контролю ізоляції яких діють на сигнал, правила побудови електроустановок рекомендують норми, згідно з якими зниження опору ізоляції одного з полюсів допускають до 20 кОм в мережі 220 В, до 10 кОм в мережі 110 В, до 5 кОм в мережі 48 В і до 3 кОм в мережі 24 В. Умовою роботоздатності ізоляції є неперевищення цих величин.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Вперше побудована діагностична модель роботоздатності для двопровідних мереж постійного струму промислових підприємств у вигляді перехідної характеристики струму через шунтувальний зв'язок, величина та час існування якого обмежується гранично допустимим рівнем, який визначається стандартом. Аналіз моделі дозволив визначити оптимальну функціональну характеристику для пристроїв захисного вимикання. Доведено, що при постійному відносному значенні одного із омичних опорів полюсів  $R_{1*}$  і зміні опору ізоляції другого полюса в межах  $(m-1)/m \leq R_{2*} \leq \infty$  переважають вимоги до об-



меження струму в перехідному режимі і допустима величина опору шунтувального зв'язку визначається як  $R_{з.від*} \geq 1/m(1 + R_{2*}/R_{1*})$  а коли  $0 \leq R_{2*} \leq (m-1)/m$  переважають вимоги до обмеження струму в сталому режимі і  $R_{з.від*} \geq (1 - R_{2*})/(1 + R_{2*}/R_{1*})$ . В разі симетричного зниження опору ізоляції умовами роботоздатності ізоляції є  $R_{m*} = 1 - 2R_{дон\min*}$ , де  $m = i_{\text{ндоп}}/I_{\text{ндоп}}$  є відношення граничнодопустимих струмів в перехідному режимі ( $t \leq 0,2 \text{ с}$ ) та сталому ( $t > 1 \text{ с}$ ),  $R_{к*} = R_{к} I_{\text{ндоп}}/U_0$ ,  $U_0$  – напруга джерела струму;  $R_{дон\min} = 6 \text{ кОм}$ . Ємність мережі постійного струму впливає лише на час існування перехідного процесу в разі виникнення шунтувального зв'язку.

### Список літератури

1. Гумин И.Я. Вторичные схемы электрических станций и подстанций / И. Я. Гумин, М. И. Гумин, В. Ф. Устинов. - М.-Л.: Энергия, 1964. - 176 с. -Бібліогр.: С. 174-176.
2. Цапенко Е. Ф. Контроль изоляции в сетях до 1000 В / Е. Ф. Цапенко -М.: Энергия, 1972. - 130 с.
3. А.с. 139057 СССР. Устройство для контроля сопротивления изоляции электрических сетей постоянного тока: В. С. Осетров, Г. Е. Пиколин; - №4115616/24-21; Заявл. 25.06.86; Оpubл. 23.04.86, Бюл. № 15.
4. А.с. 1305608 СССР. Устройство для измерения сопротивления изоляции электрических сетей:/ Л. Н. Карпиловский, Е. Я. Бойко, Л. Л. Лесняк; - № 3939333/24-21; Заявл. 25.06.86; Оpubл. 23.04.86, Бюл. №15.
5. А.с. 1308938 СССР. Устройство контроля сопротивления изоляции электрических сетей:/ Е. А. Иванов, Л. И. Гребешков, Е. Д. Гусев, В. Д. Дудник, В. С. Лебедев, В. М. Ребров, Ю. А. Шестопалов; - № 3964533/24-21; Заявл. 08.10.85; Оpubл. 07.05.87, Бюл. №17.
6. А.с. 1272278 СССР. Устройство для контроля сопротивления изоляции сетей постоянного тока: / Ю. Н. Лебедев (СССР); - № 3901112/24-31; Заявл. 23.05.85; Оpubл. 23.11.86, Бюл. №43.
7. Трояновский В. А. Установка для непрерывного контроля изоляции в сетях постоянного тока / В. А. Трояновский // Промышленная энергетика. - 1962. -№ 6. - С. 14-15.
8. Кононенко В. Л. Исследование и разработка защиты от утечек в подземных изолированных от земли электрических сетях постоянного тока: дис.на соискание канд. техн. наук: спец 05.09.03 - "Электрооборудование горного производства" / Кононенко Владимир Петрович- Донецк: Донецкий Ордена Трудового Красного знамени политехнический институт, 1971, - 212 с. - Бібліогр.: С. 166-173.
9. Кононенко В. П. Влияние емкости сети на работу устройства защиты от утечек сети постоянного тока / В. П. Кононенко // Сб. Взрывоопасное оборудование. - М.: Энергия, 1967. - Вып. № 5 - С. 306-309.
10. Кобылянский А. В. Поиск места повреждения в сетях постоянного тока / А. В. Кобылянский, А. Е. Рубаненко // Энергетика и электрификация. -1987.-№4 С. 17-19.
11. Кутін В. М. Система діагностики розподільних мереж постійного струму електричних станцій і підстанцій / В. М. Кутін, О. Є. Рубаненко, Ештіба Алі Мусбах, Аль Нсур Мохамед // Вісник Вінницького полг-технічного інституту. - 1994. - № 2. - С. 51-56.
12. Борухман А. В. Определение места повреждения оперативного постоянного тока / А. В. Борухман, А. Н. Кулдыкин // Электрические станции. -1982. -№7.- С. 58-60.
13. А.с. 1323984 СССР. Способ определения сопротивления изоляции электрических сетей и устройство для его осуществления; / Л.А. Лысенко, В.М. Машенков, В.К. Потапкин; - №4036940/24-21; Заявлено 29.01.86; Оpubл. 15.07.87, Бюл. №26.
14. А.с. 246641 СССР. Устройство автоматического контроля изоляции сетей постоянного тока:/ В. С. Дзюбан, В. П. Кононенко; - № 3892243/21-21; Заявл. 25.06.69; Оpubл. 12.03.70, Бюл. №2. С. 53.
15. Кутин В. М. Совершенствование средств защиты от утечек в цепях постоянного тока экскаваторов / В. М. Кутин, В. М. Хлыстов // Электробезопасность на горнорудных предприятиях черной металлургии СССР, Тезисы докладов и сообщений II Всесоюзный н-т конференции. - Днепропетровск, 1979.-№ 8.-С. 51-53.
16. Кутин В. М. Диагностика оперативных цепей постоянного тока, средства автоматики на электрических станциях и подстанциях / Кутин В. М., Рубаненко А. Е., Шахид Умар /У Тез. докл. н-т конференции, 21- Киев, 1991.-220 с,
17. Брызгалов В. Н. Метод измерения сопротивления изоляции сети постоянного тока / В. Н. Брызгалов, Л. А. Лысняк, В. Б. Якомаскин // Электротехника.- 1981.-№ 10.-С. 56-58.
18. Кутін В. М. Комбінована система діагностування оперативних мереж постійного струму на електричних станціях і підстанціях / В.М. Кутін, М. П. Свиридов, В. В. Жогов // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2003). Тези доп., VII міжнародної н-т конф.- Вінниця, 2002 - 158 с.

УДК: 622.625.28-83

О.В. ОМЕЛЬЧЕНКО, О.О. УДОВЕНКО, кандидати техн. наук, доц.,  
Р.В. СІЯНКО, магістрант, Криворізький національний університет

## ДО ПИТАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ДВОФАЗНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ В ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ ШАХТНИХ КОНТАКТНИХ ЕЛЕКТРОВІЗІВ

У статті викладені результати досліджень в напрямку пошуку і створення сучасного за структурою та енергоефективного за видом тягового електроприводу для рудникових контактних електровозів. Приведена порівняльна оцінка варіантів можливих структур тягових асинхронних приводів, відмінність яких в основному полягає в будові і характеристиках інверторів напруги електроприводу. Запропоновано перспективне схемотехнічне рішення тягового електроприводу змінного струму варіантом IGBT-інвертор – двофазний асинхронний електричний двигун. Така структура в порівнянні з трифазним варіантом має ряд переваг: менший обсяг на 35%, удвічі менші втрати електроенергії, вартість комплектуючих менше на 10%, надійність вище на 33%. Поміж тим для вирішення проблеми енергоефективності пропонується використовувати метод ШІМ для керування перетворювачем за законом трапеції, так як він володіє меншим спотворенням в порівнянні з іншими розглянутими законами управління.

**Ключові слова:** електровоз, тяговий електропривод, асинхронний двигун, система керування.

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** В наш час на підприємствах по видобутку залізорудної сировини підземним способом для транспортування корисних копалин по підземним горизонтам основним видом транспорту є шахтні контактні електровози, головним силовим елементом якого є тяговий електропривод (ТЕП) з двигуном постійного струму (ДПС) [1]. Для зміни швидкості ТЕП з ДПС використовується резисторний спосіб регулювання, що не є сучасним і доцільним через свою низьку економічність і ефективність. Тому наступним етапом розвитку стала заміна системи керування або типу тягового двигуна. Контактрно-резисторна система керування двигуном замінюється на тиристорно-імпульсну. Використання тиристорно-імпульсних перетворювачів забезпечує плавне прискорення і гальмування електровозу [2-4], а поява IGBT-транзисторів, що мають характеристики близькі до ідеального ключа, зменшила комутаційний струм, кількість обладнання і затрати на його обслуговування [5-8]. Однак, наявність колекторно-щіткового вузла не дає можливості покращити якісні показники приводу.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Більш раціональним, враховуючи світову практику вибору типів тягових двигунів, є використання ТЕП з безколекторним АД [9,10].

У ньому відсутній колекторно-щітковий вузол, маса та розміри менші від ТЕП з ДПС при збереженні тієї ж потужності, експлуатаційна надійність вища, а регулювальні можливості кращі [11]. Найбільше всі ці переваги проявляються при підтриманні граничних швидкостей та в режимі електричного гальмування.

Отже, перспективними є ТЕП змінного струму, які використовують АД та живляться від частотно-регульованого IGBT інвертору.

**Постановка завдання.** Метою проведеного дослідження є порівняння двофазних тягових асинхронних приводів з традиційними трифазними для застосування в шахтних контактних електровозах, визначення потужності асинхронних двигунів та розробка системи керування ТАП.

**Викладення матеріалу та результати.** Для досягнення зазначеної мети в роботі необхідно розв'язати такі задачі:

Порівняти різні варіанти асинхронних приводів;

Виконати розрахунок потужності двофазного двигуна, що може використовуватися в якості тягового в ТАП шахтних електровозів;

Розробити систему керування ТЕП з двофазними асинхронними двигунами шахтного контактного електровозу.

Можливими варіантами двигунів у структурі ТАП є:

Трифазний асинхронний двигун, обмотки якого з'єднані в зірку (ТАП-3 $\Delta$ );

Трифазний асинхронний двигун, обмотки якого з'єднані в розімкнений трикутник (ТАП-3 $\Delta$ );

Двофазний асинхронний двигун, обмотки якого живляться від окремих інверторів (ТАП-2);  
Двофазний асинхронний двигун, обмотки якого живляться від комбінованих IGBT перетворювачів (ТАП-комбі).

Для порівняння різних варіантів структур перетворювачів ТАП були використані наступні критерії:

Енергоефективність ( $\Delta P$  - втрати потужності,  $\eta$  - коефіцієнт корисної дії);

Масогабаритні показники ( $V$  - об'єм перетворювача);

Надійність функціонування ( $H$  - показник надійності);

Вартість електрообладнання ( $S$  - вартість).

Результати розрахунків показників всіх варіантів ТАП зведено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати розрахунків показників варіантів структур перетворювачів ТАП

| Системи        | Показники, в.о. |        |      |      |      |
|----------------|-----------------|--------|------|------|------|
|                | $\Delta P$      | $\eta$ | $V$  | $H$  | $S$  |
| ТАП-3 $\Delta$ | 1,0             | 1,0    | 1,0  | 1,0  | 1,0  |
| ТАП-3 $\Delta$ | 0,39            | 1,016  | 0,59 | 2,0  | 1,34 |
| ТАП-2          | 0,48            | 1,014  | 0,65 | 1,33 | 0,89 |
| ТАП-комбі      | 1,46            | 0,987  | 1,31 | 0,77 | 0,48 |

Для зручності порівняння показники дані записані в відносних одиницях по відношенню до базового варіанту, а всі його показники прийняті за 1.

Структурну схему ТАП-2 представлено на рис. 1.

Розрахункова потужність, підведена до валу двигуна

$$P_1 = m U_1 I_1 \cos \varphi_1 \eta \quad (1)$$

де  $m$  - число фаз обмотки статора;  $U_1$ ,  $I_1$  - фазні напруги і струм;  $\eta$  - ККД.

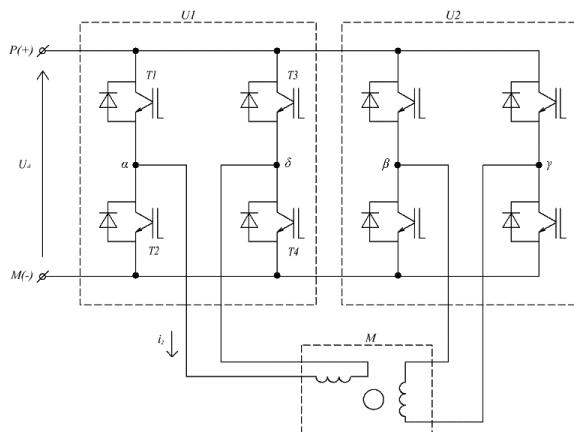


Рис. 1. Спрощена структура тягового електроприводу з двофазним асинхронним двигуном, обмотки якого живляться від окремих інверторів (ТАП-2)

Для трифазного асинхронного двигуна  $m=3$ , а для двофазного  $m=2$  і аналізуючи (1) легко зробити помилковий висновок про те, що двофазний двигун має потужність на  $\frac{1}{2}$  менше. Це може бути, якщо  $\frac{1}{2}$  «звільнених» пазів залишити порожніми, але так робити помилково з технічних позицій.

При зменшенні числа обмоток (фаз) створюється можливість в тому ж двигуні збільшити число витків в обмотці (збільшити в 1,5 рази  $U_1$ ) або збільшити перетин провідників (збільшити в 1,5 рази  $I_1$ ). В результаті

при тих же масі і габаритах виходить та сама потужність двигуна. Тобто характеристики тягового асинхронного двигуна (ТАД), при двофазному виконанні залишаються такими ж, як і в трифазному.

Застосування IGBT-інверторів в ТЕП дозволяє вирішити комплекс завдань, пов'язаних з перетворенням електроенергії для живлення ТАД. Проте залишається проблема якості перетворення електроенергії.

У практиці створення ТЕП типу «IGBT-перетворювач - асинхронний двигун» є ряд рішень для поліпшення форм кривих струму і напруги - від фільтрів до алгоритмів керування. Разом з тим рі-

шення, надійного і комплексного за структурою для умов рудних електровозів, немає. Тому зроблена спроба ще раз оцінити цю проблему, зокрема проаналізувати один з нових підходів до цієї проблеми.

Попередньо оцінивши способи формування кривих струму були обрані для порівнювання методи прямої і векторної ШІМ за законом синусоїди, і за законом трапеції. Для аналізу способів управління було проведено порівняння форм кривих напруг тягових асинхронних двигунів. Порівнювалися лінійні напруги: трифазного інверторного мосту; однофазного мосту і трапецеїдальної форми:

Аналіз методу векторної ШІМ напруги синусоїдальної форми виконаний на основі трифазного інверторного мосту і тягового асинхронного двигуна, обмотки якого з'єднані в зірку (рис. 2)

$$u = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} U_a \left( \sin \omega_s t - \frac{1}{5} \sin 5\omega_s t + \dots + (-1)^k \cdot \frac{1}{v} \cdot \sin v\omega_s t \right), \quad (2)$$

де  $v = 6k \pm 1, k = 0, 1, 2, 3, \dots$ ;

Аналіз методу прямої ШІМ напруги синусоїдальної форми виконаний на основі однофазного інверторного мосту, що живить одну з фаз двофазного тягового асинхронного двигуна

$$u = \frac{4}{\pi} U_a \left( \sin \omega_s t - \frac{1}{3} \sin 3\omega_s t + \dots + \frac{1}{v} \cdot \sin v\omega_s t \right), \quad (3)$$

де  $v = 2k \pm 1, k = 1, 2, 3, \dots$ ;

Принцип формування трапецієподібної кривої струму двигуна розвинений в додатку до двофазного перетворювача з урахуванням тягової специфіки.

Для визначення кута  $\alpha$ , при якому гармонійний склад оптимальний, був проведений аналіз розкладання трапецієподібної кривої струму в ряд Фур'є

$$i(\omega t) = \frac{4}{\alpha\pi} I_T \sum_{v=1}^n \frac{1}{v^2} \sin v\alpha \cdot \sin v\omega t = \frac{4}{\pi} I_T \left( \frac{\sin \alpha}{\alpha} \cdot \sin \omega t + \frac{\sin 3\alpha}{9\alpha} \cdot \sin 3\omega t + \frac{\sin 5\alpha}{25\alpha} \cdot \sin 5\omega t + \dots \right). \quad (4)$$

Було встановлено, що найбільше наближення до синусоїди дає трапецієвидна крива з  $\alpha = \pi/3$ , яка і прийнята за основу

$$u = \frac{4}{\pi} U_a \left( \frac{\sin \alpha}{\alpha} \cdot \sin \omega_s t + \frac{\sin 3\alpha}{9\alpha} \sin 3\omega_s t + \dots + \frac{\sin v\alpha}{v^2\alpha} \cdot \sin v\omega_s t \right), \quad (5)$$

де  $v = 2k - 1, k = 1, 2, 3, \dots$

Результати зведено в табл. 2.

Таблиця 2

Результати порівняння лінійних напруг

| Варіант  | Схема. Форма напруги              | $K_u$ | $K_a$ | Примітка                 |
|----------|-----------------------------------|-------|-------|--------------------------|
| <i>a</i> | Трифазний міст.<br>Прямокутна     | 0,955 | 1,1   | Немає третього гармоніки |
| <i>б</i> | Однофазний міст.<br>Прямокутна    | 0,9   | 1,273 | Є 3-а гармоніка          |
| <i>в</i> | Однофазний міст.<br>Трапецієвидна | 1,0   | 1,053 | Немає третього гармоніки |

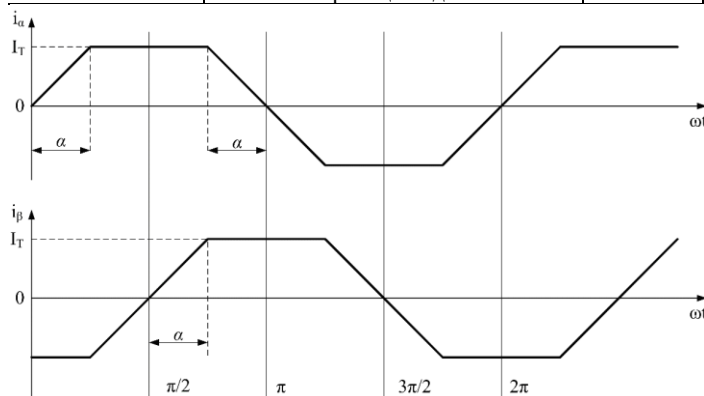


Рис. 2. Ідеалізовані діаграми кривих фазних струмів двигуна, сформованих за законом трапеції в двофазному перетворювачі

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** У роботі здійснене дослідження раціональності використання двигунів постійного струму в шахтних електровозах, а також доведена необхідність їх заміни на більш ефективні асинхронні двигуни.

Також було виконано аналіз існуючих систем керування і порівняння різних варіантів ТАП. У результаті було встановлено: двофазний ТАП переважає перед традиційним трифазним в частині меншого обсягу перетво-

рyвача - на 35 %, втрати в перетворювачі менші на 52 %, надійність вище на 33 %, вартість комплектуючих перетворювача менше на 10 %.

Аналіз способів формування кривих струму (напруги) ТАД дозволив рекомендувати до реалізації трапецієвидну форму фазної напруги двигуна, одержувану за допомогою прямої ШІМ напруги, коефіцієнт використання живлячої напруги якої на 10 % вище синусоїдальної кривої, а коефіцієнт спотворення - дорівнює одиниці проти 0,955 при синусоїдальному способі.

#### Список літератури

1. Волотковский С.А. Рудничная электровозная тяга / С. А. Волотковский. – М.: Недра, 1981. – 389 с.
  2. Синчук О.Н. Импульсные системы управления и защиты на рудничном электровозном транспорте / О. Н. Синчук, В. В. Чумак, О. В. Ершов // К.: «АДЕФ – Україна», 1998. – 280 с.
  3. Бардаш Ю.Ф. Тиристорный электропривод рудничных электровозов. / Бардаш Ю. Ф., Буряк А. Н., Чернявский В. Н. – М.: ЦНИИЭИ-уголь, 1975. – 55 с.
  4. Волотковский С.А. Опыт эксплуатации рудничных контактных электровозов с импульсной системой управления / С. А. Волотковский, Ю. С. Ремха, В. Х. Пироженов [и др.] // Горный журнал. – 1976. – №7. – С. 51 - 53.
  5. Шидловський А.К. Енергозбереження і силова електроніка в електроенергетиці / А. К. Шидловський, В. Б. Павлов // Техн. електродинаміка. Тем. випуск. Силова електроніка та енергоефективність. – К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2006. – Част.1. – С. 3-8.
  6. Дебелый В.Л. Основные направления развития шахтного локомотивного транспорта / В. Л. Дебелый, Л. Л. Дебелый, С. А. Мельников // Уголь Украины. – 2006. – №6. – С.30-31.
  7. Лебедкін С.В. Вугільна промисловість і перспективні напрямки розвитку тягових електроприводів рудникових електровозів (Проблеми і перспективи) / С. В. Лебедкін, А. Ф. Сінолицький, О. В. Пасько // Вісник Криворізького технічного університету: зб. наук. пр. – 2004. – №4. – С. 12-15.
  8. Перспективи розвитку шахтних (рудничних) електровозів з енергозберігаючими видами тягових електроприводів / О. Н. Синчук, С. В. Лебедкін, И. О. Синчук [и др.] // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ: СНУ ім. В.Даля, 2006. – №8(102). – С. 86-92.
  9. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии в структурах электроприводов. Схемотехника и принципы управления: учебное пособие / И. О. Синчук, А. А. Чернышев, И. И. Киба [и др.]. – Кременчуг: ПП Щербатых О. В., 2008. – 88 с.
  10. Синчук О.Н. Рудничный контактный электровоз с тяговым электроприводом переменного тока и микропроцессорной системой управления (разработка, испытания) / О. Н. Синчук, И. О. Синчук, Ф. И. Караманиц [и др.] // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ: СНУ ім. В.Даля, 2007. – №5(123). Ч. 2. – С. 33-37.
  11. Сінчук О.М. Випробування асинхронного тягового електропривода рудникового контактно-акумуляторного електровоза / О. М. Сінчук, Д. А. Шокарев, Є. І. Скапа, І. О. Сінчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – Вип. №6. – С. 49-52.
- Рукопис подано до редакції 01.04.16

УДК 621.314.632

В.А. КОЛЬСУН, канд. техн. наук, доц., Д.В. РИЖЕНКОВ, аспірант,  
В.М. МАКОДЗЬОБ, аспірант, О.М. КУЛИК, магістр,  
Криворізький національний університет

### АНАЛІЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ СТОСОВНО МЕРЕЖІ ЖИВЛЕННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СОНЯЧНОЇ СТАНЦІЇ

У статті досліджено енергетичні показники мережі живлення за умови наявності інверторів фотоелектричних сонячних станцій. Розраховані функції струму та напруги трифазних випрямлячів з нелінійним навантаженням. Проведена порівняльна характеристика енергетичних показників мережі живлення без використання фільтро-компенсаційних пристроїв та з активними фільтрами.

**Ключові слова:** енергетичні характеристики, активний фільтр, перетворювач, гармоніки, навантаження

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Однією з найбільш гострих проблем сьогодення України є питання стабільного енергозабезпечення та економії енергоносіїв.

На сучасних промислових підприємствах, у комунальному господарстві та транспорті більшу частину електроенергії споживає електропривод (ЕП) виробничих установок.

Виникає принципова необхідність підвищення його енергетичної ефективності та забезпечення регулювання технологічного процесу, що зумовлює застосування регульованого ЕП.



Значення коефіцієнту спотворення низьке, що дає уявлення про необхідність використання додаткових схем технічних рішень (рис. 3).

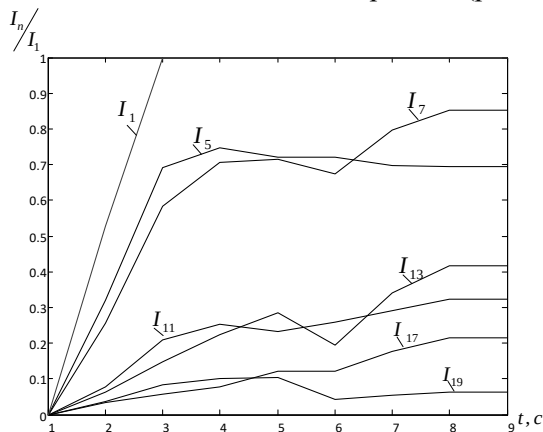


рис. 2. Гармонічний склад струму у схемі з індуктивним навантаженням

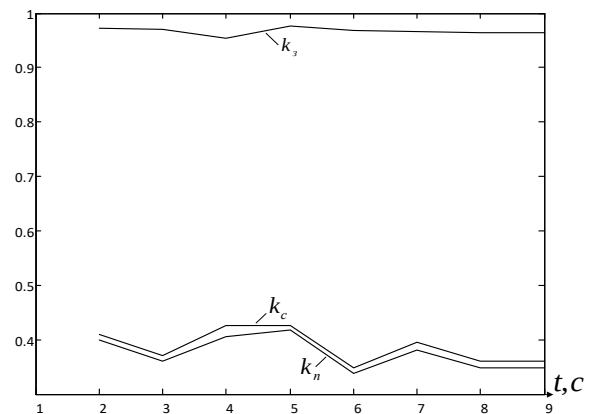


Рис. 3. Коефіцієнти зсуву, спотворення та потужності

Графік струму мережі живлення визначає значне відхилення форми від синусоїдальної (рис. 4).

Саме останнє й формує задачу дослідження щодо компенсації неактивних складових потужності засобами активної фільтрації.

Останнім часом найбільший розвиток одержали роботи з активними фільтрами (АФ), які складаються з перетворювача змінного(постійного) струму з індуктивним чи ємнісним акумулятором енергії на стороні постійного струму. АФ є високоефективними у боротьбі з гармонічними складовими напруги та струму мережі, та мають такі переваги :

спосіб застосування компенсації. АФ постійно контролює струм гармонік у навантаженні і зменшує загальне спотворення нелінійного навантаження нижче 5%;

високоефективна компенсація струмів гармонік від 2-ї до 50-ї гармонік.

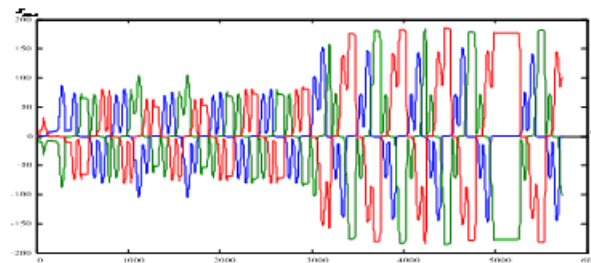


Рис. 4. Струм мережі живлення

Саме останнє й формує задачу дослідження щодо компенсації неактивних складових потужності засобами активної фільтрації.

Останнім часом найбільший розвиток одержали роботи з активними фільтрами (АФ), які складаються з перетворювача змінного(постійного) струму з індуктивним чи ємнісним акумулятором енергії на стороні постійного струму. АФ є високоефективними у боротьбі з гармонічними складовими напруги та струму мережі, та мають такі переваги :

спосіб застосування компенсації. АФ постійно контролює струм гармонік у навантаженні і зменшує загальне спотворення нелінійного навантаження нижче 5%;

високоефективна компенсація струмів гармонік від 2-ї до 50-ї гармонік.

Активні фільтри підрозділяються на послідовні [2], паралельні [3] та гібридні [4].

Послідовний АФ являє собою інвертор напруги, навантажений на трансформатор, вторинна обмотка якого з'єднується послідовно з навантаженням.

До переваг послідовного АФ доцільно віднести можливість керування напругою вточці підключення навантаження.

Але складність підключення і захисту від перевантаження, поганий контроль струму мережі зробили застосування послідовних АФ обмеженим.

Паралельний АФ являє собою інвертор зі струмовим виходом, що підключається паралельно навантаженню. Він вільний від недоліків, властивих послідовному АФ і має такі переваги: простота підключення і захисту, пряме керування струмом і краща якість придушення гармонік струму.

Гібридний АФ являє собою інвертор напруги, підключений до мережі через послідовний LC-фільтр, налаштований на 5-у і (або) 7-у гармоніку.

Таке рішення дозволяє зменшити потужність інвертора і знизити вимоги до розмаху його вихідної напруги.

Але резонансна ланка на виході інвертора не дозволяє ефективно компенсувати гармоніки з частотами, що значно перевищують частоту налаштування LC- фільтра[1].

Найбільшого поширення набули гібридні і паралельні АФ завдяки простоті підключення і можливості прямого керування струмом.

Модель розглянутого активного фільтра з паралельною роботою частотного перетворювача подана нижче (рис. 5).

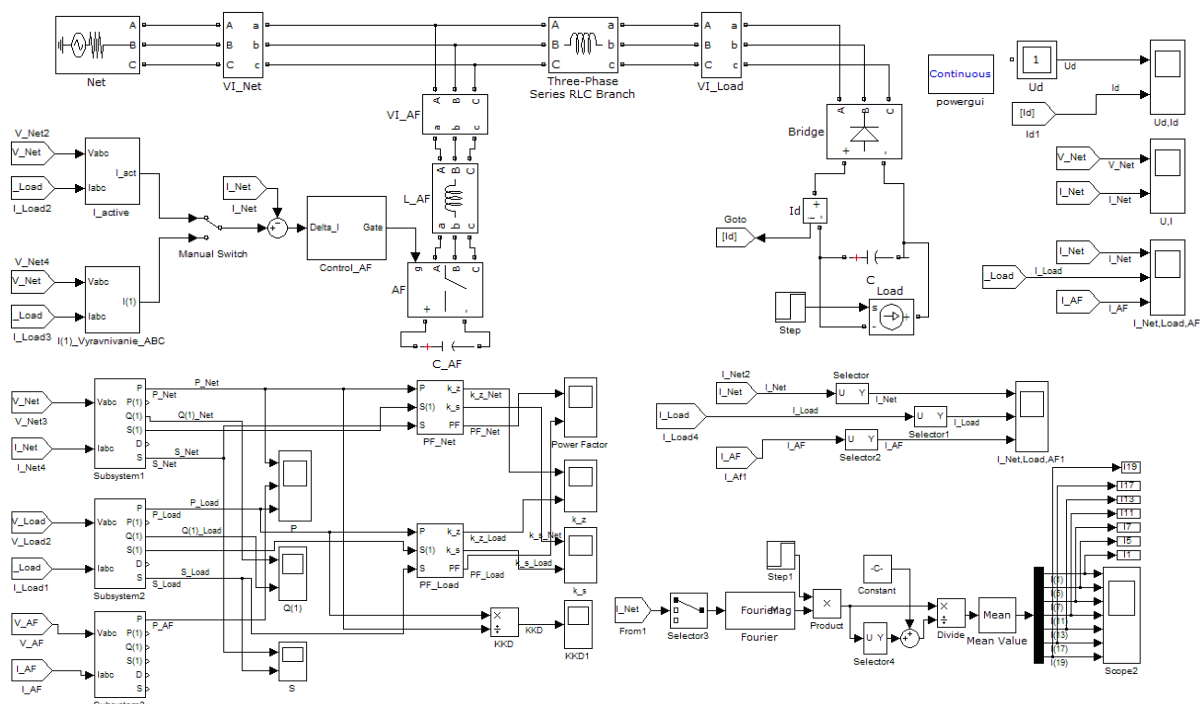


Рис.5. Модель трифазної мостової схеми випрямлення з активно-індуктивним навантаженням та активним фільтром

Схема містить блоки для розрахунку:

повної, активної, реактивної потужностей та потужності спотворення (рис. 6);

коефіцієнтів зсуву, спотворення та потужності (рис. 7);

гармонічного складу струму мережі(рис. 8).

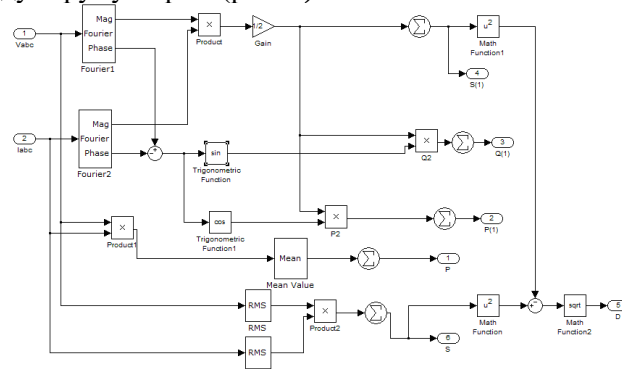
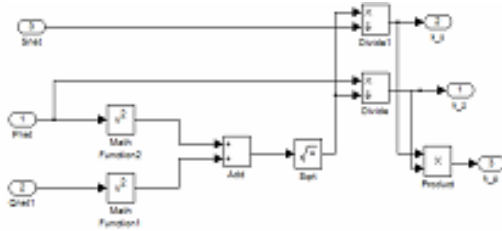
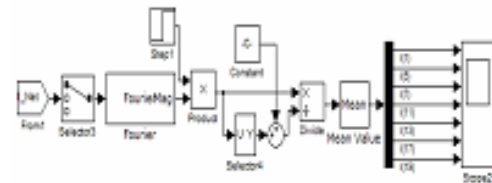


Рис. 6. Підсистема розрахунку повної, активної та реактивної потужностей



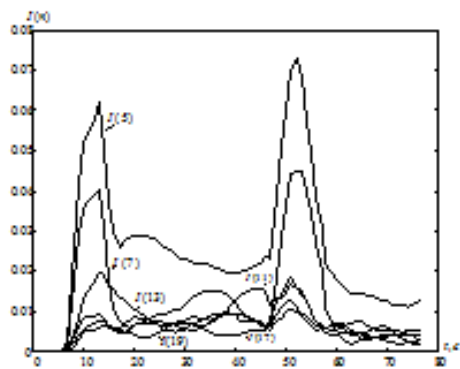


**Рис. 7.** Підсистема розрахунку коефіцієнтів спотворення, зсуву та потужності

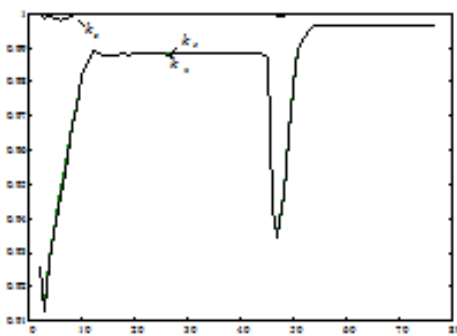


**Рис. 8.** Підсистема розрахунку гармонічних складових струму мережі

У результаті аналізу гармонічного складу мережі виявлено значне зниження канонічних гармонік у порівнянні зі схемою без АФ (рис. 9). Коефіцієнти зсуву, спотворення та потужності в цьому випадку також покращені та приведені на рис. 10.

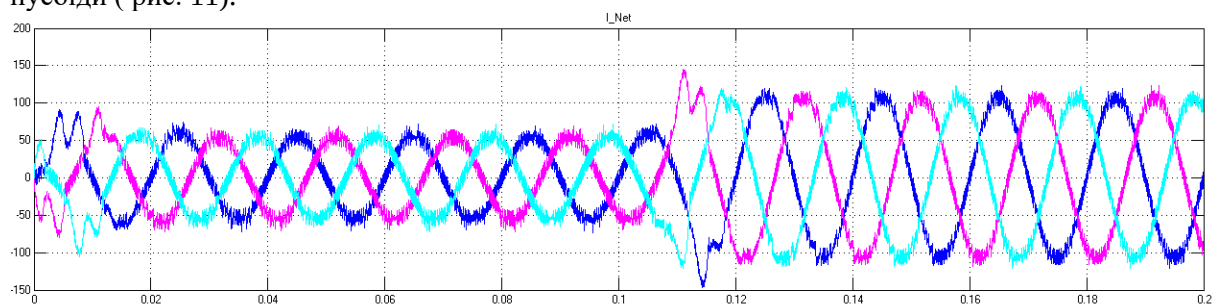


**Рис. 9.** Гармонічний склад струму мережі



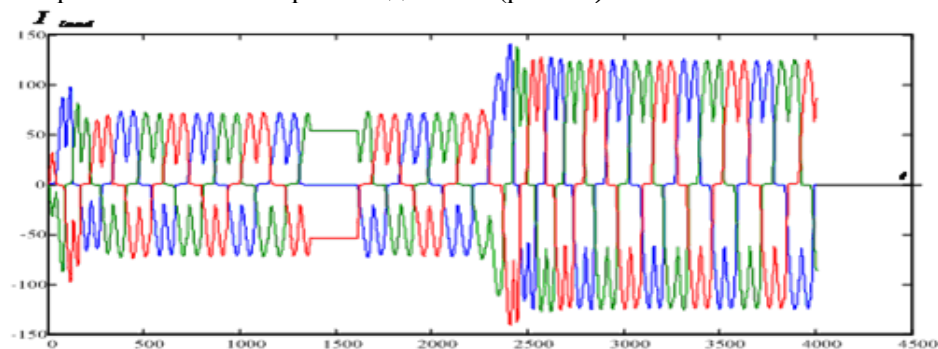
**Рис. 10.** Коефіцієнти зсуву, спотворення та потужності у схемі з АФ

Осцилограми струму показують значне поліпшення форми струму, вона наближена до синусоїди (рис. 11).



**Рис. 11.** Струм мережі з використанням активного фільтру

Під час порівняння струмів навантаження отриманих аналітично та за допомогою моделювання, можна зробити висновок про їх подібність (рис. 12).



**Рис.12.** Струм навантаження у схемі з АФ

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Під час дослідження системи живлення дволанкових перетворювачів частоти та вивчення взаємовпливу окремих перетворювачів на мережу живлення виявлені значні спотворення форми струму та напруги, канонічні гармоніки мають досить великі значення, енергетичні показники низькі.

Виявлено, що зазначений факт обумовлений значною ємністю в ланці постійного струму. Під час вирішення задач щодо підвищення енергетичних показників запропоноване використання паралельних активних фільтрів.

Активні фільтри мають ряд переваг перед іншими, проте одночасне застосування як активного, так і пасивного фільтру дозволило б досягти більшої ефективності.

Використання активних фільтрів дозволяє значно знизити рівень основних гармонік, максимально наблизити струм до синусоїдального та компенсувати реактивну потужність. Енергетичні показники, у порівнянні зі схемою без компенсаційних пристроїв, значно вищі.

#### *Список літератури*

1. Бурлака В.В., Гулаков С.В., Бублик С.К., Дьяченко М.Д. Параллельный активный фильтр с повышенным коэффициентом подавления высших гармоник тока / В.В.Бурлака, С.В.Гулаков, С.К. Бублик, М.Д. Дьяченко // Вестник ПГТУ. – 2009.
2. Escobar G., Stankovic A. M., Cardenas V., Mattavelli P. A controller based on resonant filters for a series active filter used to compensate current harmonics and voltage unbalance / G. Escobar, A. M. Stankovic, V. Cardenas, P. Mattavelli // Conference on Control Applications Glasgow, Scotland, U.K. September 18 – 20. – 2002. – P. 7 – 12.
3. Gaiceanu M. Active power compensator of the current harmonics based on the instantaneous power theory / M. Gaiceanu // The annals of "Dunarea de Jos" university of Galati: electrotehnics, electronics, automatic control, informatics. Fascicle III, 2005. – P. 23 – 28.
4. Ucak O. Design and implementation of a shunt active power filter with reduced dc link voltage / O. Ucak, I. Kocaba, A. Terciyani // TUBITAK – Space technologies research institute, power electronics group METU campus, TR 06531, Ankara, Turkey. – 5 c

Рукопис подано редакції 25.03.16

УДК 621.771:517.9

В.П. ЛЯШЕНКО, д-р техн. наук, проф.,

Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського,

О.В. АНІСЬКОВ, ст. викладач, Криворізький національний університет

### **МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОКАТКИ ТОНКОЇ І НАДТОНКОЇ СТРІЧКИ ІЗ ТУГОПЛАВКИХ І ВАЖКОДЕФОРМОВАНИХ МЕТАЛІВ**

У роботі проведено аналіз особливостей технології виготовлення стрічки із тугоплавких і важкодеформованих металів. Запропоновано математичні моделі для визначення енергосилових параметрів процесу плющення (прокатки) тонкої і надтонкої стрічки із тугоплавких і важкодеформованих металів, які дозволяють враховувати силову дію інструмента, зокрема валків прокатного стану, та температурне поле зони підведення струму до стрічки. Розглянута узагальнена та спрощені математичні моделі. Проведені чисельні експерименти та побудовані, на основі розв'язків спрощених задач, температурні розподіли зони дії струму.

**Ключові слова:** прокатка, постійний та імпульсний струм; електро-фізико-механічні властивості

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** В даний час у сучасних умовах виробництва стрічки та дроту все більше уваги приділяється енергозберігаючим технологіям, оптимізації обладнання, точності настройки процесів регулювання з використанням апаратних і програмних можливостей сучасної електронної техніки.

**Аналіз досліджень і публікацій.** У металургійній промисловості і зокрема в прокатному виробництві визначальне значення має якість продукції. Технологія виробництва стрічки з дроту тугоплавких і важкодеформованих металів можлива лише при підвищених температурах 600-1000 °С. Знизити температуру прокатки (плющення) до температури 200-300°C дозволяє застосування імпульсного струму, що підводиться у зону деформації (рис.1). У роботах К.М.Клімова і І.І.Новікова, [1,2] описані процеси плющення дроту з підведенням струму до дроту тугоплавких металів з метою нагрівання у зоні деформації при температурах не більше

300°C. Описана технологія дозволяє отримувати стрічку з вольфраму і вольфрам-ренієвого сплаву ВР-27ВП з коефіцієнтом витяжки в межах 20-30% [3,4].

Застосування у зоні деформації електричного струму дозволяє підвищити ступінь одиничного обтиску матеріалу на 10-20 % [5,6]. Подальше підвищення ступеня одиничного обтиску дозволяє спосіб ультразвукового електропластического плющення дроту з тугоплавких і важкодеформованих металів і сплавів. Спосіб передбачає одночасне використання в зоні деформації електричного струму та ультразвуку [7]. При отриманні стрічки, як показано в роботі [8], можливі два режими деформування - імпульсний і неперервний, причому співвідношення між ними визначається кінематичними параметрами установки і режимами процесу плющення з мінімальним підігрівом металу. З точки зору зниження енергосилових параметрів процесу та підвищення якості стрічки імпульсний режим підведення струму у зону деформування більш ефективний, ніж неперервний. Згідно експериментам [8], існують граничні співвідношення між швидкістю протягування стрічки, величиною пружної деформації заготовки (здебільшого дроту малого діаметра) і кутом захоплення валками металу, при якому забезпечується імпульсний режим пружно-пластичного деформування.

Проектування обладнання для виробництва стрічки з тугоплавких і важкодеформованих металів вимагає визначення енергосилових параметрів процесу, які дозволяють створити оптимальні умови деформування, запобігати руйнуванню металу у процесі деформації.

Це може бути успішно реалізовано з використанням математичних моделей, які дозволяють створити систему керування процесом деформації, враховуючи особливості технології отримання стрічки. Математичні моделі теплових процесів під час термічної обробки дроту зовнішніми та внутрішніми джерелами тепла, а також блок-схеми пристроїв контролю температури описані в роботах [9-14].

**Викладення матеріалу та результати.** Розглянемо математичну модель плоскої пластичної деформації та визначення силових параметрів під час процесу прокатки стрічки між тілами, що обертаються. При побудові моделі плющення вважається, що жорстка стрічка товщиною  $h_1$  та шириною  $e$ ,  $h_1 \leq e$  рухається уздовж осі деформації  $Ox$  у напрямі, перпендикулярному осям валків (рис. 1).

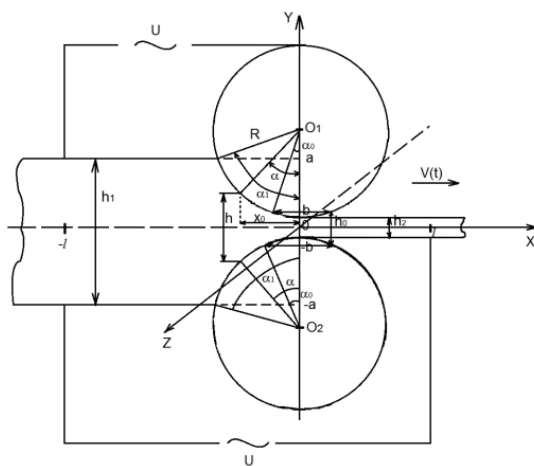


Рис 1. Схема подовжного плющення

Радіуси валків  $R$  однакові і обертаються з однаковими кутовими швидкостями, процес деформації є симетричним відносно серединної площини стрічки. Стрічка товщиною  $h_1$  на вході у валки отримує товщину  $h_2$  після виходу з них ( $h_1 < h_2$ ). Наближено приймаємо, що уся деформація стрічки відбувається між входом і виходом з валків. Решта стрічки вважається жорсткою.

Електричний струм до стрічки, як зображено на рис. 1, можна підводити за допомогою ковзких електричних контактів двома способами, а саме: у зону довжиною  $l$ , де один контакт до стрічки, а другий до валків, або обидва контакти до стрічки у

зону довжиною  $2l$ .

Розглянемо модель холодної прокатки стрічки. Закон зміни товщини стрічки у зоні деформації, що залежить від кута  $\alpha$  (рис. 1) визначається за формулою

$$h = h_2 + 2R(1 - \cos \alpha), \quad (1)$$

де  $R$  - радіус деформованої поверхні кругового циліндричного валка.

Абсциса поточної точки уздовж дуги контакту пов'язана з кутом  $\alpha$  співвідношенням

$$x = R \sin \alpha \quad (2)$$

Довжина зони деформації  $l = R \sin \alpha_1$ ,  $\alpha_1$  - кут захоплення стрічки валками ( $\max \alpha$ ). Радіус деформованої поверхні валка пов'язаний з його радіусом до деформації формулою Хітчкока [15]

$$R = R_0 [1 + P_y / (C \Delta h)],$$

де  $C = \pi E / [16(1 - \mu^2)]$ ,  $E$  - модуль пружності;  $\mu$  - коефіцієнт Пуассона;  $P_y$  - проекція на вертикальну вісь  $Oy$  сил, що діють на одиницю довжини валка,  $\Delta h = h_1 - h_2$  - зміна товщини стрічки при плющенні.

Приймаємо, що деформація у напрямі ширини стрічки дорівнює нулю, тобто деформація смуги є плоскою [16]. Тоді за умови, що стрічка нестискувана маємо наступний закон зміни середніх швидкостей  $v$  у напрямі плющення (осі  $Ox$ )

$$v = v_1 h_1 / h = v_2 h_2 / h, \quad (3)$$

де  $v_1$  і  $v_2$  - середні швидкості на вході у валки і на виході з них;  $h$  - товщина стрічки в поточному перетині, що визначається кутом  $\alpha$ .

З формули (3) слідує, що у міру просування через валки середня швидкість  $v$  збільшується, і якщо в околі входу, у валки середня швидкість менше колової швидкості валків, то в околі виходу з валків вона зазвичай більша за неї. Тому на початковій від входу ділянці контакту стрічки і валків сили тертя, що діють на стрічку, направлені у бік руху металу, а потім на ділянці виходу у зворотну боці. На рисунку 1 кут  $\alpha_0$  відповідає координаті точки, в якій сили тертя змінюють знак. Нейтральний перетин висотою  $h_0$  визначається кутом  $\alpha_0$ . Частина зони деформації від входу у валки до нейтрального перетину називається зоною відставання, а інша частина від нейтрального перетину до виходу з валків зоною випередження.

Припустивши, що деформація плоска, матеріал ідеально жорстко-пластичний, прийнявши, що перетини перпендикулярні напрямку плющення залишаються плоскими, а деформації і напруження не змінюються по товщині стрічки, можна спростити умову пластичності, та звести двовимірну задачу до одновимірної. Для спрощення розв'язку приймемо, що тертя на всій поверхні контакту підкоряється закону Кулона зі сталим коефіцієнтом пропорційності  $f$  по усій поверхні контакту

$$q = fp \quad (4)$$

Припустимо, що напруги по товщині стрічки залишаються незмінною. Тоді рівняння рівноваги елемента  $\Delta x = dx$  стрічки, розташованого між кутами  $\alpha$  і  $\alpha + d\alpha$  перпендикулярними осі  $Ox$  має вигляд

$$(\sigma_x + d\sigma_x)(h + dh)b - \sigma_x hb + 2pRb d\alpha \sin \alpha \mp 2qRd\alpha \cos \alpha = 0, \quad (5)$$

де  $\sigma_x$ ,  $p$  - напруга у напрямі осі  $Ox$  та контактний тиск відповідно;  $q$  - інтенсивність сил тертя; при чому верхній знак "+" для зони відставання, а нижній - для зони випередження.

Використавши умову пластичності  $\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} = 2\tau_T$  [17] та знехтувавши другим доданком під радикалом у порівнянні з першим,  $\sigma_x - \sigma_y = 2\tau_T$  отримаємо звичайне диференціальне рівняння для плоскої деформації у вигляді

$$\frac{d\sigma_x}{dh} + \frac{\sigma_x + p}{h} \mp \frac{q}{htg\alpha} = 0, \quad (6)$$

де  $\tau_T$  - дотична напруга на стрічку. При цьому ми поклали, що  $\frac{dh}{d\alpha} = 2R \sin \alpha$  та врахували співвідношення (1). Скориставшись рівнянням  $\sigma_x - \sigma_y = 2\tau_T$ , та законом Кулона, диференціальне рівняння (6) спрощується

$$\frac{dp}{dh} \pm \frac{f}{htg\alpha} p - \frac{2\tau_T}{h} = 0. \quad (7)$$

Рівнянням (7) є лінійне диференціальне рівняння першого порядку із змінними коефіцієнтами. Його загальні розв'язки у зонах відставання та випередження відповідно мають вигляд

$$p = \frac{e^{I_1(\xi_0)}}{e^{I_1(\xi)}} \{ C_1 + 2\tau_T [I_2(\xi) - I_2(\xi_0)] \} \quad (8)$$

$$p = \frac{e^{I_1(\xi)}}{e^{I_1(1)}} \{ C_2 + 2\tau_T [I_3(\xi) - I_3(1)] \}, \quad (9)$$

де

$$I_1(\xi) = \int_1^\xi \frac{f da}{atg\alpha} = \frac{f}{tg\alpha} \ln \xi, \quad I_2(\xi) = \int_0^\xi \frac{e^{I_1(\xi)}}{e^{I_1(\xi_0)} \xi} d\xi, \quad I_3(\xi) = \int_0^\xi \frac{e^{I_1(1)}}{e^{I_1(\xi)} \xi} d\xi, \quad (10)$$

де  $\xi = h/h_2$ ,  $\xi_0 = h_0/h_2$ ,  $\xi_1 = h_1/h_2$

Сталі  $C_1$ ,  $C_2$  і  $h_0$  визначаються із відповідних граничних умов та співвідношення  $\sigma_x - \sigma_y = 2\tau_T$ ,

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x(h_1) &= N_1 / (bh_1), \quad a \quad p = p_1 = 2\tau_T - \sigma_{x1}, \\ \sigma_x(h_2) &= N_2 / (bh_2), \quad a \quad p = p_2 = 2\tau_T - \sigma_{x2}, \\ p^{(1)}(h_{0+}) &= p^{(2)}(h_{0-}), \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

де  $\sigma_{x1}, \sigma_{x2}, N_1, N_2, p_1, p_2$  - напруга, сили і контактний тиск на вході у валки і на виході з них;  $p^{(1)}$  і  $p^{(2)}$  - контактний тиск в зонах відставання і випередження відповідно.

З граничних умов (11) отримаємо три рівняння для визначення сталих  $C_1$ ,  $C_2$  і  $\xi_0$

$$p_1 = \frac{e^{I_1(\xi_0)} d\xi}{e^{I_1(\xi_1)} \xi} \{C_1 + 2\tau_T [I_2(\xi_1) - I_2(\xi_0)]\}, \quad p_2 = C_2, \quad C_1 = \frac{e^{I_1(\xi_0)} d\xi}{e^{I_1(1)} \xi} \{C_2 + 2\tau_T [I_3(\xi_0) - I_3(1)]\}$$

Після визначення контактної тиску і інтенсивності сил тертя можна обчислити силу і момент, що діють на валки.

Прокатка з підігрівом. Розглянемо математичну модель температурного поля стрічки, до якої електроконтактним способом підводиться постійний або імпульсний струм. Або обидва разом, у зону довжиною  $l$ , де один контакт до стрічки, а другий до валків [5,7]. Нехай тонка стрічка товщиною  $h_1 \rightarrow 0$  зі швидкістю  $v(t)$  рухається у напрямі осі  $Ox$ . Математична модель температурного поля області  $\Omega_t = \{0 < x < l, |z| < h_1, t > 0\}$  має вигляд

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + c\rho v(t) \frac{\partial T}{\partial x} = w(t, T), \quad T(x, z, 0) = T_0, \quad T(0, z, t) = T_0, \quad T(l, z, t) = T_l, \quad (12)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{y=\pm h_1/2} = \pm [\alpha_2(T - T_c) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_c^4)]$$

де  $w(t, T) = \frac{I^2(t) \rho_0 (1 + \beta T)}{S^2}$  щільність джерел тепла,  $\alpha, \beta, \lambda, \rho, c$  - теплофізичні параметри стрічки та середовища,  $S$  - площа поперечного перетину стрічки.

Проведемо спрощення моделі (12), перейшовши до розгляду середньої, по товщині стрічки, температури

$$T(x, z, t) \cong T(x, t) = \frac{1}{h_1} \int_{-h_1/2}^{h_1/2} T(x, z, t) dz, \quad (13)$$

Провівши усереднення (13) та зваживши на граничні умови, будемо мати математичну модель у вигляді одновимірної нелінійної початково-крайової задачі для рівняння теплопровідності

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + c\rho v(t) \frac{\partial T}{\partial x} + \left[ \frac{2\alpha}{h_1} (T - T_0) + \frac{\varepsilon \sigma}{h_1} (T^4 - T_c^4) \right] = W(x, t, T), \quad 0 < x < l, \quad t > 0; \quad (14)$$

$$T(x, 0) = T_0, \quad T(0, t) = T_0, \quad T(l, t) = T_l$$

Знехтувавши перерозподілом тепла за рахунок теплопровідності, поклавши  $\lambda = 0$ , та втра- тами тепла з поверхні випромінюванням, поклавши  $\varepsilon = 0$  та  $I(t, T) = I = const$ ,  $v(t) = v = const$  отримаємо більш спрощену модель (14) у вигляді задачі Коші для звичайного диференціального рівняння першого порядку

$$\frac{dT}{dx} - \theta_1 u = -\chi_1, \quad 0 < x < l, \\ T(0) = T_0$$

$$\text{де } \chi_1 = \frac{-I^2 \rho_0 + 2\alpha T_0 s \sqrt{s}}{s^2 v c \rho_n}, \quad \theta_1 = \frac{\beta \rho_0 I^2 + 2\alpha s \sqrt{s}}{s^2 v c \rho_n}.$$

розв'язок якої має вигляд

$$T(x) = \frac{\chi_1}{\theta_1} + \left(T_0 - \frac{\chi_1}{\theta_1}\right)e^{\theta_1 x} \quad (15)$$

Використавши розв'язок (15) у якості початкової умови, чисельно-аналітичним методом, отримано розв'язок більш складної задачі в області  $\Omega_t = \{0 < x < l, t > 0\}$  поклавши у (14)  $\lambda = 0$ .

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} + c\rho v(t) \frac{\partial T}{\partial x} + \left[ \frac{2\alpha}{h_1}(T - T_0) + \frac{\varepsilon\sigma}{h_1}(T^4 - T_c^4) \right] = W(x, t, T), \quad T(0, t) = T_0, \quad T(x, 0) = \frac{\chi_1}{\theta_1} + \left(T_0 - \frac{\chi_1}{\theta_1}\right)e^{\theta_1 x} \quad (16)$$

При побудові математичної моделі (12) вважаємо, що у кожному перетині у напрямі осі  $Ox$  температурне поле залишається сталим.

Проведено чисельні експерименти та визначено температурні розподіли для конкретних технологічних процесів виготовлення стрічки.

На рис. 2 зображено температурні розподіли, отримані із розв'язків задачі (14), зони нагрівання постійно діючими внутрішніми джерелами тепла для різних значень параметра керування температурним полем – сили струму  $I$  при умові, що  $I(t, T) = I = const$ ,  $v(t) = v = const$ .

На рис. 3 зображено температурні розподіли, отримані із розв'язків задачі (16), зони нагрівання імпульсними внутрішніми джерелами тепла  $j = 10^7 \left[ \frac{A}{m^2} \right]$ ,  $\alpha = 1 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$ ,  $v = 0,1 \left[ \frac{m}{c} \right]$ ,  $h_1 = 0,2 \cdot 10^{-4} [m]$ ,  $l = 0,5 \times 10^{-2} [m]$ .

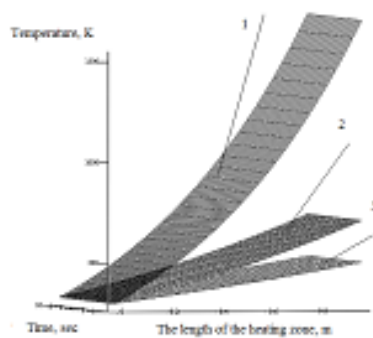


Рис. 2. Температурні розподіли отримані із розв'язків задачі (16). Крива 1-  $I=12A$

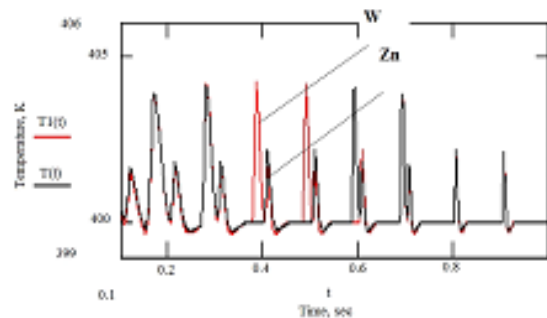


Рис. 3. Графіки температурних розподілів отримані для цинку та вольфраму із розв'язків (14), (16) при значеннях параметрів крива 2-  $I=8,4$ , крива 3-  $I=6,4$

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Побудовані математичні моделі для визначення енергосилових параметрів процесу плющення (прокатки) тонкої і надтонкої стрічки з тугоплавких і важкодеформованих металів, які дозволяють враховувати силову дію інструмента, зокрема валків прокатного стану, та температурний вплив дію струму та на стрічку. Проведені чисельні експерименти та побудовані, на основі розв'язків спрощених задач, температурні розподіли у зоні дії струму. Подальші дослідження будуть спрямовані на об'єднання математичних моделей (7)–(11) та (14), (16) з метою визначення оптимальних параметрів керування процесом прокатки тонкої і надтонкої стрічки.

#### Список літератури

1. Климов К.М. и др. Об электропластичности металлов // ж. ДАН СССР, 1974 т. 219, №2, С. 323-325.
2. Климов К.М. и др. Использование эффекта электропластичности для плющения проволоки// Приборы и системы управления, 1975, №10. - С. 5-53.
3. Климов К.М. и др. Изменение пластичности вольфрама под влиянием электрического тока// МТОМ, №1, с. 56-57, 1977.
4. Климов К.М. и др. Электропластическая прокатка проволок в ленту микронных сечений из вольфрама и его сплава с рением// Известия АН СССР, сер Металлы, №4, 1975. - С. 143-145.
5. Троицкий О.А. Новые направления фундаментальных и прикладных исследований электропластической деформации металлов// под. ред. В.Е. Громова. – Новокузнецк: Изд-во «СибГИУ», 2013. – С. 39-50
6. Жмакин Ю.Д., Кузнецов В.А., Романов Д.А. и др. Аппаратурное обеспечение экономических технологических процессов использующих электропластический эффект// под. ред. В.Е. Громова. – Новокузнецк: Изд-во «СибГИУ», 2012. – С. 287 – 293

7. Северденко В.Н., Клубович В.В., Степаненко А.В., Обработка металлов давлением и ультразвуком// Минск, Наука и техника, 1973. - 288 с.
9. Ляшенко В.П. Температурное поле бесконечного цилиндра с движущимся источником тепла // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. – Харків: ХНУ, 2013. – Вип. 21 (№ 1058). – С. 97-103.
10. V. Lyashenko, T. Hryhorova Generalized Mathematical Model of Thermal Diffusion in Powder Metallurgy // AIP Conference Proceedings. – Sophia (Bulgaria), 2014. – 85(2014), P. 85 – 93.
11. V. Lyashenko, E. Kobilskaya Control of Heat Source in a Heat Conduction Problem // AIP Conference Proceedings. – Sophia (Bulgaria), 2014. – 85(2014), P. 94 – 101.
12. Victor Lyashenko, Tetiana Bryl, Elena Kobylskaya, Aleksandr Aniskov System of control of pulse processing with hyperfine wire during electroplastic deformation // XV International PhD Workshop OWD 2013. Conference archives PTETIS, vol.33., 19-22 october. – Wisla, 2013. – P. 74 – 79.
13. Victor Lyashenko, Aleksandr Aniskov, Elena Kobilskaya. The process control of electroplastic deformation ultrafine wire // Proceeding of scientific and student's works in the field of Industrial Electrical Engineering. – Kosice, may 2013. – Volume 2, part 1. – P. 87-90.
14. Хилл Р. Математическая теория пластичности// М., Гостехтеоретиздат, 1956 г.
15. Ford H. Advanced mechanics of materials// E. Horwood ; New York : Halsted Press, 1977.
16. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести// М., Изд-во Машиностроение 1975г

Рукопис подано до редакції 08.04.16

УДК 622.625.28-83

И.О. СИНЧУК, А.Б. СЁМОЧКИН, кандидаты техн. наук, доц.,  
В.А. ФЕДОТОВ, ст. преподаватель, Криворожский национальный университет

## О ПРИНЦИПАХ МИНИМАЛЬНО СОУДАРЯЕМОГО И МАКСИМАЛЬНО ТОЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ВАГОНЕТОК РУДНИЧНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОСОСТАВОВ

При разгрузке-погрузке шахтный электропоезд передвигается рывками, при этом в сцепных устройствах возникают удары, снижающие их срок службы, а точность позиционирования оставляет желать лучшего. В работе авторами выявлены закономерности движения поезда, и выведено выражение, позволяющее с минимальными ударами в сцепках рассчитывать перемещение вагонетки в функции тахограммы скорости электровоза, а также наличия руды в вагонетках. Точность позиционирования вагонеток при перемещении на 0,6 м составляет для 1-й вагонетки не более 4%, а для восьмой вагонетки – не более 13%.

**Ключевые слова:** шахтный электропоезд, сцепное устройство, упругие удары, точность

**Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями.** Железородная промышленность и ее базовая технологическая слагаемая - горнорудная, являются основным источником пополнения валютных запасов Украины [1,2]. В последние 5-8 лет акцент в выборе способа добычи железорудного сырья (ЖРС) делается на подземный (шахтный) [3].

К сожалению, в силу естественного понижения глубин добычи ЖРС в отечественных железорудных шахтах ниже проектных 1500-2000 м себестоимость его имеет постоянную тенденцию к росту [3]. Весомой слагаемой себестоимости является способ доставки ЖРС от места добычи до подъема его на дневную поверхность. В отечественных железорудных шахтах, как впрочем и в большинстве зарубежных, доставка ЖРС осуществляется электровозосоставами (ВШТ), ведомыми специальными видами двухосных электровозов [4].

**Анализ исследований и публикаций.** Как следует из результатов исследований ряда авторов, показатели функционирования (ВШТ) отечественных железорудных шахт оставляют желать лучшего [5-8]. Все те же исследования подтверждают существующее априорное мнение, что реальным способом повышения эффективности функционирования ВШТ является его автоматизация, что для железорудных шахт в отличие других подземных предприятий подразумевает создание базовых локальных систем (подсистем) управления движением электровозосоставов по отдельным видам горных выработок [9]. Как установлено [9], режим движения электровозосоставов в подземных горных выработках определяется их видом, и это определяет режим работы тягового электропривода электровоза (ТЭП). На рис. 1 представлены осцилло-

граммы токов, потребляемых тяговыми электродвигателями двухосного рудничного электровагона при движении по подземному откаточному горизонту с дифференцированием по видам составляющих подземного горизонта: место погрузки ЖРС – движение по главному откаточному горизонту (квершлагу) – разгрузка.

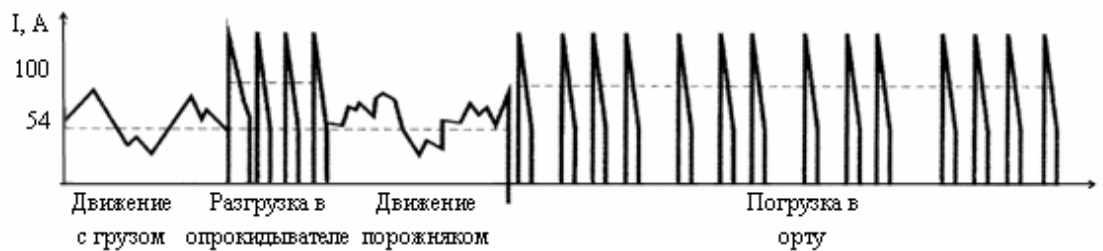


Рис. 1. Аппроксимированные нагрузочные диаграммы тяговых электроприводов контактных электровазосоставов в цикле движения по подземным горизонтам отечественных железорудных шахт

**Постановка задачи.** Как следует из рис. 1, режимы движения электровазосоставов в подземных горных выработках железорудных шахт различаются, прежде всего по своей динамике в функции соответствующего вида горной выработки. Более того, установлено, что более 60% своего времени ТЭП и его двигатели работают в переходных режимах, то есть в режимах «сплошной динамики» [6-8].



Рис. 2. Иллюстративное фото крайних положений сцепного устройства электровазосостава с вагонетками

Последнее во многом определяет долговечность слагаемых электросостава, а также не позволяет достаточно точно устанавливать вагонетки под пунктами погрузки-разгрузки, что неизбежно влияет на производительность электровазосоставов [6,8]. Более того, и, что главное, именно решение этой части проблемы необходимое условие построения системы автоматического управления. Исторически сложилось так, что конструкторами электровазосоставов конструктивно закладывалось в проекте, что основными элементами, демпфирующими упругие удары в электровазосоставе, должны быть сцепные устройства, которые, кстати, в рудничных электровазосоставах, используемых в железорудных шахтах по ряду технологических причин, отличаются по конструкции от автосцепок, широко применяемых в МПС и электровазосоставах угольных шахт, в худшую сторону по уровню жесткости и гашению сил динамических ударов (рис. 2а,б).

Именно исследование их поведения и определение границ возможного уровня демпфирования являются целью данных исследований, что позволяет строить структуру алгоритма автоматического адаптивного к данным условиям управления ТЭП [8].

**Изложение материала и результаты.** В ходе предварительных вычислительных экспериментов авторами установлено, что максимальное воздействие на ударные упругие моменты в сцепных устройствах шахтных электровазосоставов оказывает начальная величина зазора в сцепных устройствах. Между тем, меньшие удары (или же их отсутствие), как и ожидалось, происходят при полностью выбранных зазорах в начальный момент времени в данных видах сцепок. Далее по ниспадающей по интенсивности влияния вслед за зазорами следует величина рывка ускорения, скорости движения, развиваемой электровазосоставом. Фактор «рывка» выбран не случайно – как известно, для гашения подобных колебаний подъемных скипов в шахтах при их движении как раз используют тахограмму скорости скипов с поддержанием постоянства рывка



скорости [10]. Если рывок поддерживать постоянным, и переключать его знак в определенные моменты времени, как это показано на рис. 3, то получим графики, представленные на рис. 4 и 5.

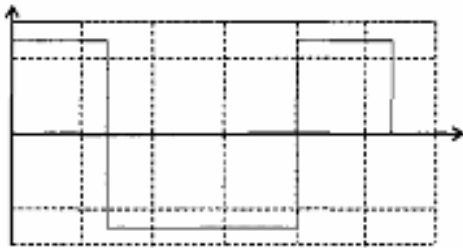


Рис. 3. График рывка скорости шахтного электровоза

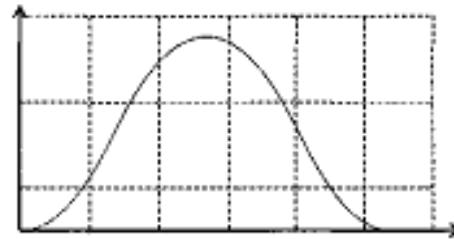


Рис. 4. График скорости шахтного электровоза

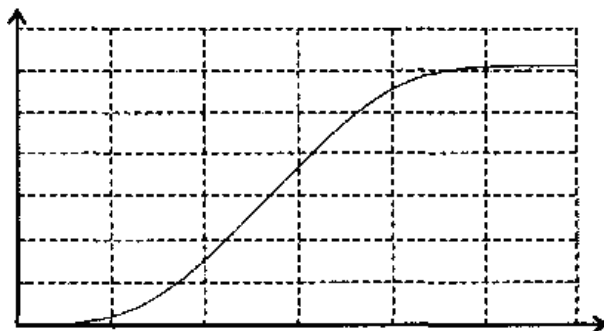


Рис. 5. График перемещения шахтного электровоза

Для указанного первого участка действия рывка известно, что перемещение всегда составляет устойчивую долю 0,0833 полного требуемого перемещения  $S$ . То есть для графика перемещения (см. рис. 3) первый участок действия положительного рывка заканчивается в момент, когда текущее перемещение равно  $0,0833 S = 0,0833 \cdot 3,1 = 0,26$  м.

Таким образом, зная предельно допустимое значение рывка, например  $J = 0,005$ , мы имеем систему уравнений, решив которую, можно определить точки переключения полярности рывка (как видно на рис. 1, переключение происходит в моменты времени, кратные  $t_1$ , т.е.  $t_1, 3 \cdot t_1, 4 \cdot t_1$ ).

$$\begin{cases} 0,005 \cdot t_1 = \frac{dV}{dt}; & 0,26 = \int_0^{t_1} V dt. \end{cases}$$

В общем, задача формирования заданной тахограммы скорости, легко формализуется и полностью определяется требуемой величиной перемещения электровоза.

В данном случае требуется обеспечить максимально точное и безударное управление перемещением вагонеток. Задача осложняется тем, что шахтный поезд соединен друг с другом специфичными сцепными устройствами. Во-первых, указанные сцепные устройства имеют значительный люфт (свободный порядка 20 см), во-вторых, сцепные устройства содержат в своем составе пружины с демпфирующими амортизаторами. Поэтому в общем случае, если все сцепные устройства шахтного поезда имеют люфт, то вагонетки относительно электровоза располагаются случайным образом, и вся система может иметь столько степеней свободы, сколько единиц в шахтном поезде. Задача точного безударного управления становится такой, что не поддается точному аналитическому решению.

Одним из путей упрощения задачи управления является приведение шахтного поезда к системе с одной степенью свободы. Естественно, простое пренебрежение зазорами в данном случае недопустимо, так как нами ранее была установлена их ведущая роль в формировании упругих ударов в сцепных устройствах. Что касается точности позиционирования, то при таком упрощении при люфте 0,2 м 5-я по счету от головы поезда вагонетка может остановиться (при свободных пружинах в сцепных устройствах) с точностью в диапазоне минимум от 0 до 1 м (с натянутыми или сжатыми пружинами эта цифра может быть больше). Поэтому приведение к

системе с одной степенью свободы проведем таким образом, что каким-либо образом в начальный момент времени выберем все зазоры в шахтном поезде, и с этого момента начинаем управление всем шахтным поездом как полностью связанною системою.

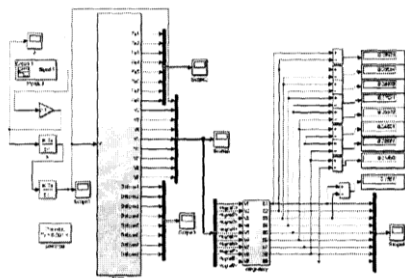


Рис. 6. Модель для исследования процессов перемещения шахтного электропоезда

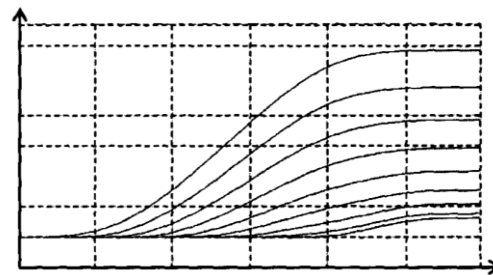


Рис. 7. Графики перемещения шахтного электропоезда

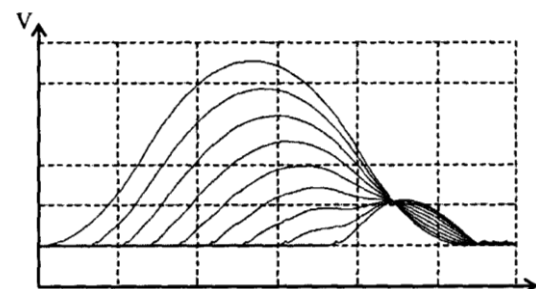


Рис. 8. Графики скоростей шахтного электропоезда

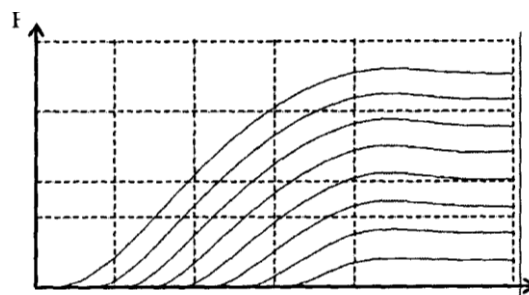


Рис. 9. Графики продольных относительных деформаций пружин сцепных устройств

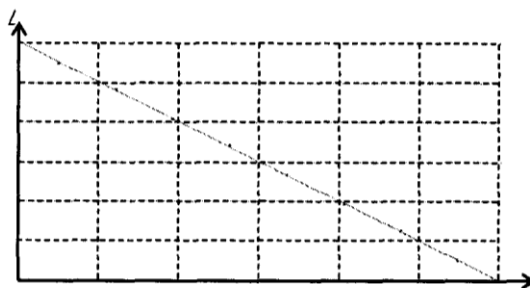


Рис. 10. График зависимости деформации сцепного устройства в функции номера сцепки (для груженого шахтного поезда)

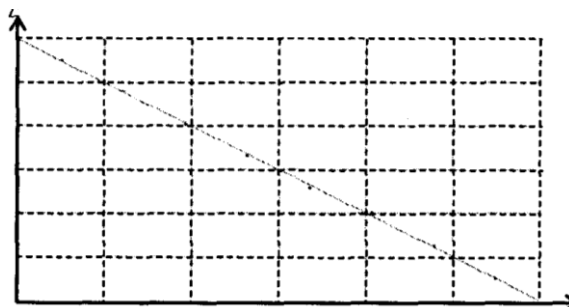


Рис. 11. График зависимости деформации сцепного устройства в функции номера сцепки (для пустого шахтного поезда)

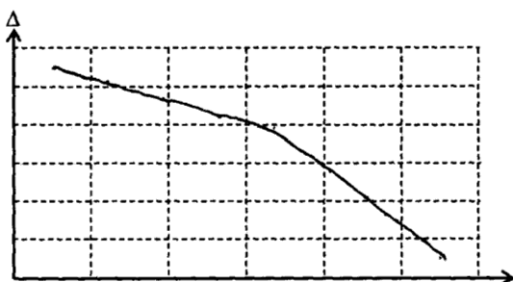


Рис. 12. График зависимости деформации сцепного устройства в функции номера сцепки (4 пустых и 4 полных вагонетки)

Основным требованием, которое предъявляются к полученной системе при управлении ею – предотвращение размыкания любого по поезду зазора в сцепных устройствах. В таком случае на первый взгляд представляется, что предотвратить размыкание зазоров возможно за счет ограничения величины рывка.

Смоделируем с помощью модели рис. 6 переходные процессы перемещения электровоза на 0,6 м, и получим следующие переходные процессы (рис. 7,8,9).

Рассматривая графики рис. 7,9 можно отметить монотонность уменьшения перемещения каждой единицы шахтного поезда (рис. 7), а также монотонность уменьшения относительной деформации пружин сцепных устройств (рис. 9). На последнем рисунке особо следует отметить, что нигде не происходит размыкания зазоров сцепных устройств (о чем можно судить по тому, что в ходе переходного процесса ни одна из линий графика не пересекает оси абсцисс), т.е., систему сохраняем связанною, с одной степенью свободы.

Проаналізуємо кількісно монотонність убывання переміщення на моделі рис. 6. Для цього з допомогою цифрових измерителів вивчимо різницю переміщень між кожними сусідніми вагонетками, після закінчення переміщення. Кожній сцепці присваювався номер, починаючи з голови поїзда, і для кожної сцепки визначалася різниця між переміщеннями сусідніх вагонеток. Була отримана таблиця, з допомогою якої був побудований графік рис. 10 і отримана апроксимація цього графіка формулою виду  $y = -0,0152x + 0,137$ .

Остання апроксимація була отримана для повного навантаженого шахтного поїзда. Для порожнього шахтного поїзда були отримані аналогічні результати:  $y = -0,00528x + 0,0486$  для графіка рис. 11. Аналогічні результати були отримані для шахтного поїзда з 4 першими порожніми і 4 останніми повними вагонетками (рис. 12).

Виходячи з останнього графіка, цікаво відзначити, що для першого, більш пологого ділянки графіка коефіцієнт нахилу становить:  $(0,0612 - 0,0766)/3 = 0,00513$ , що не більш ніж на 2,8% відрізняється від коефіцієнта нахилу графіка порожнього поїзда рис. 9.

Відповідно, для більш крутонахиленого ділянки коефіцієнт нахилу становить:  $(0,001421 - 0,05686)/3 = -0,0142$ , що не більш ніж на 6,5% відрізняється від коефіцієнта нахилу графіка навантаженого поїзда рис. 8.

Це дозволяє нам, знаючи вищеприведенні вирази, збільшити точність автоматизованого управління переміщенням будь-якої вагонетки в шахтному поїзді.

Допустимо, що потрібно перемістити на певну відстань (наприклад, 0,6 метра) третю від електровоза повністю наванжену вагонетку. Перші дві вже розвантажені. Тоді, згідно з виразами 1 і 2 для порожніх і повних вагонеток збільшення відстані між вагонетками для перших двох стыків шахтного поїзда становить

$$\Delta S = -0,00528 \cdot 1 + 0,0468 - 0,0528 \cdot 2 + 0,0468 - 0,0152 \cdot 3 + 0,137 = 0,217 \text{ м.}$$

Помилка позиціонування третьої вагонетки порівняно з модельним експериментом становить 2,2 см, що становить 3,65 % від повного переміщення вагонетки.

Це означає, що якщо потрібно перемістити третю вагонетку, наприклад, на 0,6 метра з помилкою 2,2 см, слід електровоз з обмеженням ривка передвинути на відстань  $0,06 + 0,217 = 0,817 \text{ м.}$

Оцінимо помилку позиціонування останньої вагонетки, при перших двох порожніх вагонетках

$$\Delta S = -0,00528 \cdot (1+2) + 2,0468 - 0,0528 \cdot (3+4+5+6+7+8) + 6 \cdot 0,137 = 0,4298 \text{ м.}$$

Помилка позиціонування останньої вагонетки порівняно з модельним експериментом становить 8 см, або 13 % від повного переміщення вагонетки. Іншими словами, щоб передвинути останню вагонетку на 0,6 метра з помилкою позиціонування 8 см, необхідно електровоз передвинути за тахограмою швидкості на відстань  $0,6 + 0,42984 = 1,02984 \text{ м.}$

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Розроблений і пропонується для практичної реалізації алгоритм управління ТЭП електропривода дозволяє здійснювати перестановку вагонеток під погрузкою з достаточним рівнем точності. Точність позиціонування вагонеток досить висока в голові поїзда, і спадає в кінці, досягаючи в розглянутому частному випадку 13% від повного переміщення вагонетки. Між тим, результат має силу для довільного частного випадку, а для подальшого рішення питання точного управління слід було б отримати функцію управління для максимального діапазону всіх можливих умов експлуатації шахтного електропоїзда.

#### Список літератури

1. Шидловський А.К. Геоэкономика та геополітика України / Шидловський А.К., Півняк Г.Г., Рогоза М.В., Випанасенко С.І. Навчальний посібник. – Д.: Національний гірничий університет. 2002. – 282 с.
2. Сборник технико-экономических показателей горнодобывающих предприятий Украины в 2009 – 2010 гг. Анализ мировой конъюнктуры рынка ЖРС 2004 – 2011 гг. / Е.К. Бабенко, Л.А. Штанько, В.А. Салганик и др. – Кривой Рог: Видавничий дім, 2011.
3. Азарян А.А., Вілкул Ю.Г., Капленко Ю.П., Караманич Ф.І., Колосов В.О., Моркун В.С., Пілов П.І., Сидоренко В.Д., Темченко А.Г., Федоренко П.Й. Комплекс ресурсо- і енергозберігаючих геотехнологій видобутку та переробки мінеральної сировини, технічних засобів їх моніторингу із системою управління і оптимізації гірничорудних виробництв – Кривий Ріг: Мінерал, 2006. – 219 с.
4. Волотковский С.А. Рудничная электровозная тяга / С.А. Волотковский. – М.: Недра, 1986. – 189 с.
5. Синчук О.Н. Перспективы развития шахтных (рудничных) электровозов с энергосберегающими видами тяговых электроприводов / О.Н. Синчук, С.В. Лебедин, И.О. Синчук, О.О. Удовенко, О.В. Пасько // Вісник

Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. Луганськ: СХУ ім. В. Даля. – 2006. – № 8 (102). – С. 83 – 92.

6. Динамика электромеханических систем с нелинейным трением: монография / В.Б. Клепиков. – Х.: Изд-во «Підручник НТУ «ХПІ»», 2014. – 408 с.

7. Шахтарь П.С. Рудничные локомотивы. М.: Недра. – 1982. – 272 с.

8. Синчук О.М. Шахтный электровозный транспорт. Теория, конструкции, электрооборудование / О.Н. Синчук, Э.С. Гузов, В.Л. Дебелый, Л.Л. Дебелый; под ред. докт. техн. наук, проф. О.Н. Синчука. – Кривой Рог - Донецк: ЧП Щербатых А. В., 2015. – 296 с.

9. Синчук О.Н., Беридзе Т.М., Гузов Э.С. Системы управления рудничным электровозным транспортом, – М.: Недра, 1993. – 255 с.

10. Чермалых В.М. Исследование оптимальных по динамичности систем подъема глубоких шахт: дис.. д-ра техн. наук / В.М. Чермалых. - Днепропетровск, 1970. – 420 с.

Рукопись поступила в редакцию 16.04.16

УДК 622.625.28-83

А.Б. СЕМОЧКИН, канд. техн. наук, доцент, В.А. ФЕДОТОВ, ст. преподаватель

Криворожский национальный университет

Л.В. СМЕЛОВА, ст. преподаватель

Украинская государственная академия железнодорожного транспорта

## АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ВАГОНЕТОК РУДНИЧНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОСОСТАВОВ ПРИ ПОГРУЗОЧНО-РАЗГРУЗОЧНЫХ ОПЕРАЦИЯХ

В статье рассмотрены вопросы уменьшения времени погрузки-разгрузки электровозосоставов в специфических условиях железорудных предприятий с подземными способами ведения горных работ.

Установлено, что при погрузочно-разгрузочных операциях, на которые приходится большая часть цикла движения электровозосоставов в подземных горных выработках, электропоезд передвигается рывками, при этом зазоры в сцепных устройствах ухудшают точность позиционирования вагонеток под погрузочными люками, а, следовательно, увеличивают время выполнения этой технологической операции и, кроме того, вызывают удары, снижающие срок службы слагаемых составов.

Проведен сравнительный анализ различных математических подходов для решения задачи минимизации этого вида ударов путем создания соответствующего алгоритма управления тяговой электромеханической системой электровоза. В числе анализируемых методы: длинноволнового приближения цепочки связанных осцилляторов, идентификации объекта управления, теории планирования экспериментов, нечеткого и нейросетевого регулирования.

Установлено, что из исследуемого перечня методов следует исключить метод нечеткого управления, а остальные подходы подлежат более глубокой проработке для достижения поставленной цели.

**Ключевые слова:** шахтный электропоезд, управление перемещением, математические подходы

**Проблема** и ее связь с научными и практическими заданиями. Электрический транспорт, как и прежде, - основной вид внутришахтного транспорта (ВШТ) горных предприятий с подземными способами ведения работ [1, 2]. В отличие от угольных, 100 % грузоперевозок железорудных предприятий (шахт, рудников) осуществляется электровозами с адресным закреплением составов, т. е. электровоз-вагонетка составляют единый модуль [3]. К сожалению, производительность электровозосоставов отечественных железорудных шахт в последнее десятилетие имеет тенденцию к снижению, что сказывается на себестоимости добываемого железорудного сырья, основного отечественного продукта для пополнения валютных запасов Украины [4]. Корни такого положения кроются, прежде всего, в увеличении длин подземных транспортных магистралей в связи с понижением уровня ведения работ. В силу этого изменяются и временные показатели цикла движения электровозосоставов: погрузка – движение с грузом – разгрузка – движение порожняком [5]. В табл. 1 представлены временные характеристики работы электровозосоставов по слагаемым цикла движения. Как следует из табл. 1, значительная часть времени – 35 – 50% цикла движения относится к процессу погрузки-разгрузки составов. Учитывая, что скорость движения электровозосоставов в магистральных подземных горных выработках - квершлагах строго ограничена соответствующими правилами [6] по величине тормозного пути состава и в переводе на скорость движения составляет 12-15 км/ч, т. е. не может быть увеличена для уменьшения времени цикла движения, то единственный реальный путь умень-

шения времени цикла движения - это сокращение сегмента времени погрузки-разгрузки состава. Последнее, в свою очередь, в значительной степени, определяется временем перестановки вагонеток во время этих процессов, и зависит, прежде всего от мастерства (навыков) машиниста электровоза по четкости установки вагонеток под погрузочным люком или в опрокиде при разгрузке.

Таблица 1

Укрупненные показатели распределения времени в цикле движения электровозосоставов по откаточным горизонтам шахт ПАО «Криворожжелезрудком» (г. Кривой Рог)

|                                  | Время, мин | Усредненные показатели в цикле одного рейса движения состава (%) |
|----------------------------------|------------|------------------------------------------------------------------|
| «Порожняк» по откаточному штреку | 15-25 мин  | 25%                                                              |
| С грузом по откаточному штреку   | 13-20 мин  | 20%                                                              |
| Погрузка                         | 10-30 мин  | 30-35%                                                           |
| Разгрузка                        | 5 мин      | 5-15%                                                            |
| Маневры                          | 3-5 мин    | 3-5%                                                             |

**Цель исследований.** Разработка предложений по выбору математического аппарата для строения алгоритма управления тяговым электромеханическим комплексом рудничного электровоза при функционировании электровозосостава в цикле погрузка-разгрузка.

**Результаты исследований.** Направление достижения вышеизложенной цели, а следовательно выбор тактики исследований, носит не однозначный характер. С одной стороны, для уменьшения времени погрузки (разгрузки) состава, а следовательно увеличения производительности функционирования всего комплекса ВШТ, следует увеличить скорость разгрузки-погрузки вагонеток, с другой - следует предотвратить упругие удары в сцепных устройствах вагонеток, которые естественны при ускоренном перемещении их на требуемые технологией погрузки-разгрузки короткие расстояния перестановки под погрузочным люком или в опрокиде. Установлено [7], что упругие удары в сцепных устройствах шахтных электровозосоставов могут достигать значительных величин из-за того, что соединительные звенья сцепных устройств, обеспечивая возможность переворота вагонетки для разгрузки руды, имеют для этого значительный люфт в десятки сантиметров [8]. Поэтому решение задачи точного позиционирования вагонеток в процессе разгрузки-погрузки актуальная научная задача, которую можно будет считать решенной, если перемещения вагонеток будут происходить максимально быстро, приемлемо точно, и с минимизацией или точнее оптимизацией предельных величин упругих ударов. Вместе с тем, решение этой задачи осложняется рядом обстоятельств:

Из-за того, что в рудничных составах для сочленения вагонеток применяются не автосцепки, а упрощенный вариант сцепок, то в последних наблюдаются значительные люфты в сцепных устройствах, что в общем случае приводит к системе с  $N$  степенями свободы (где  $N$  - число слагаемых единиц электровозосостава).

Просыпи на путях, которые в общем случае делают случайной функцию сопротивления движению единиц состава во времени и пространстве.

Разброс степени загрузки вагонеток рудой.

Наличие силы трогания, обусловленной свойствами скользящих пар трения (в подшипниках).

Отсутствие плавности регулирования скорости в релейно-контакторных схемах управления тяговым приводом постоянного тока, которым пока, что оснащены большинство шахтных электровозов, эксплуатируемых в отечественных шахтах и рудниках.

Перед изложением материалов дальнейших исследований отметим ряд небезынтересных для изыскательского процесса примечаний:

для перевода системы шахтного электровозосостава в систему с одной степенью свободы необходимо следить за тем, чтобы во время переходных процессов не происходило размыкания предварительно натянутых сцепных устройств.

Очевидно, что из-за значительных сил сопротивления движению это сравнительно легко обеспечить за счет неперевышения темпов движения электровоза выше некоторой величины (а именно ограничения рывков при разгоне и торможении).

Становится ясным, что предварительное осаживание состава, практикуемое в шахтах для облегчения дальнейшего разгона, можно исключить из дальнейшего рассмотрения;

формирование начальных условий переходного процесса при останове электровозосостава имеет определяющее значение для качества дальнейшего управления.

Это особенно касается детерминированных систем управления, которые обычно опираются на наперед известные сигналы.

Очевидно, если начальные условия переходного процесса электровозосостава представляют собой некоторое «вероятностное облако», в котором каждый исходный параметр имеет вероятностный разброс в некоторых пределах, то это автоматически приводит к увеличению неопределенности при формировании детерминированной системы управления электровозосоставом.

В шахтном электропоезде использование различных датчиков (скорости, силы упругости, относительного перемещения) для каждой вагонетки неприемлемо в силу следующих причин: затруднена передача информации с каждой вагонетки на центральный блок управления (даже самый примитивный проводной способ неприемлем из-за опрокида вагонетки); невысокая надежность эксплуатации всех этих датчиков из-за повышенных вибраций, трясек, опасности попадания на них кусков транспортируемого материала, и пр; высокая стоимость капиталовложений в систему управления с повышенными эксплуатационными расходами на поддержание всей автоматики в рабочем состоянии.

Для решения задачи управления аналитическими способами, с учетом вышеприведенных рассуждений, авторами была разработана программная модель электровозосостава с восемью вагонетками, общий вид которой приведен на рис. 1.

В этой модели на основании экспериментальных исследований были учтены все основные особенности шахтного электровозосостава: люфт в сцепных устройствах 0,2 м, наличие буферных пружин вагонеток жесткостью 50000 Н/м, сопротивление вязкого трения амортизаторов величиной 75000, начальное усилие сопротивления троганию 100 Н и т.д.

В качестве примера на рис. 2,3,4 приведены полученные графики переходных процессов упругих усилий, скоростей и перемещений вагонеток.

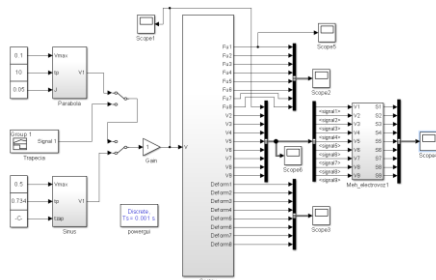


Рис. 1. Модель шахтного электровозосостава

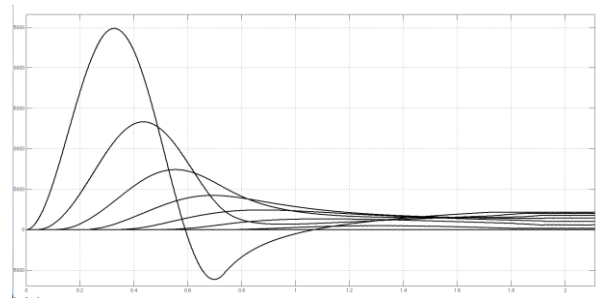


Рис. 2. Упругие усилия в сцепных устройствах

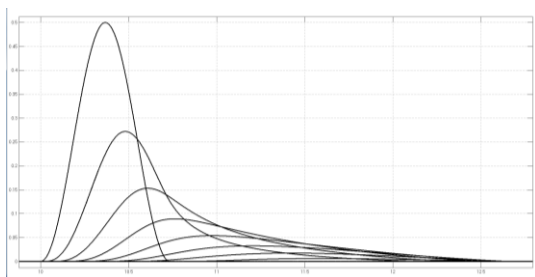


Рис. 3. Скорости электровоза и шахтных вагонеток

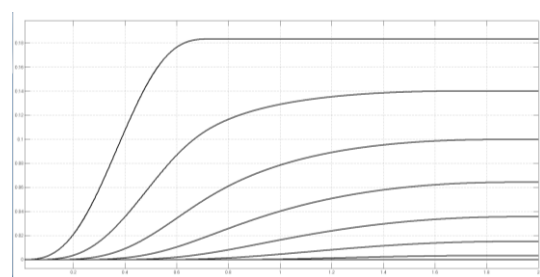
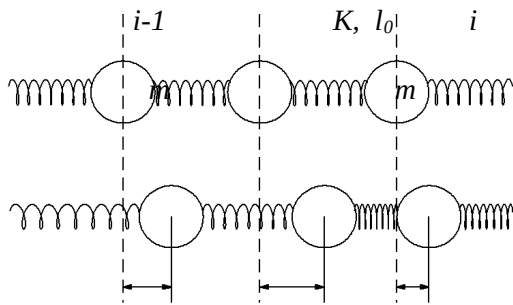


Рис. 4. Перемещения шахтных вагонеток

Для дальнейших исследований, необходимо разработать закон управления, который будет реализовывать точное и безударное перемещение вагонеток на требуемые расстояния с любого исходного положения.

Рассмотрим более подробно различные варианты математических подходов к решению этой задачи.

*Длинноволновое приближение системы связанных осцилляторов.* Представим шахтный электровозосостав как систему N-связанных осцилляторов, как показано на рис. 5.

Рис. 5. Система  $N$  связанных осцилляторов

$$\xi(x, t) = A \sin(\omega_0 t - kx + \varphi_0),$$

где  $\omega_0$  - циклическая частота волны,  $k = 2\pi/\lambda$  - волновое число,  $\lambda$  - длина волны,  $\omega_0 t - kx + \varphi_0$  - фаза волны.

Рассмотренное приближение является хорошей моделью для описания упругих волн в стержнях. При наличии силы трения гармоническая волна будет иметь несколько иной вид

$$\xi(x, t) = A e^{-\beta t} \sin(\omega_0 t - kx + \varphi_0),$$

то есть амплитуда колебаний будет затухать по экспоненциальному закону –  $A = A_0 e^{-\beta t}$ .

**При идентификации объекта управления.** При идентификации предполагается экспериментальное изучение и сопоставление входных и выходных процессов, и задача идентификации состоит в выборе соответствующей математической модели [10]. Модель должна быть такой, что ее реакция и реакция объекта на один и тот же входной сигнал должны быть, в известном смысле, близкими. Результаты решения задачи идентификации являются исходными данными для проектирования систем управления, оптимизации, анализа параметров систем и т. д. Использование математического аппарата идентификации систем самого начала предполагает наличие некоторого черного ящика, для которого нужно составить математическое описание, связывающее выходную координату (перемещение) со входной координатой (входное воздействие). Получив более или менее адекватную математическую модель «черного ящика», нет никакой гарантии, что мы сможем по заданному перемещению определять требуемое входное воздействие (решить задачу управления). Не стоит забывать, что математической моделью, реализованной на Матлабе, мы все-таки уже располагаем (то есть у нас уже не «черный ящик» - см. рис. 2), и нашу самую главную задачу – как по заданному перемещению определять требуемое входное воздействие, можно попытаться решить и с помощью указанной модели. Единственное, на что стоит рассчитывать - что полученный результат идентификации по форме будет намного проще исходной модели, и иметь приемлемую точность.

**Теория планирования экспериментов.** Эта теория [11] позволяет, располагая неким экспериментальным объектом (в нашем случае - моделью рис. 2), выполнить ряд экспериментов на этой модели при различных специально выбранных исходных условиях, и, обработав специальным образом полученные экспериментальные данные, получить в итоге функцию отклика – в нашем случае это зависимость величины перемещения вагонок в функции величин факторов эксперимента. Эта теория позволяет нам более осознанно по сравнению с процедурой идентификации определить набор факторов, влияющих на конечный результат, а значит вероятность получения адекватной функции отклика будет выше, чем с помощью методов идентификации. С другой стороны, количество значимых факторов может быть настолько большим, что придется выполнить слишком большое количество экспериментов, то есть процесс решения задачи управления может стать чересчур громоздким.

**Нечеткое управление.** Так как ранее было сказано о неопределенности начальных условий переходного процесса, при том, что поставленная нами задача управления предельно ясна, то, возможно, имеет смысл попробовать использовать нечеткие множества для построения регулятора, который, опираясь на вероятностный характер исходной информации, сможет реализовать достаточную точность позиционирования [12]. Однако, для построения базы нечетких правил требуются достаточно глубокие знания в явлениях механики, в том числе и волновой,

Если смещения тел из положения равновесия малы по сравнению с расстоянием между телами  $\xi_i \ll l_0$  для любого  $i$ , то эту систему можно описать в виде волнового уравнения [9]

$$\frac{d^2 \xi}{dt^2} = v^2 \frac{d^2 \xi}{dx^2},$$

где  $v = \omega l_0$ , то есть мы перешли от дискретного набора тел к непрерывному распределению – континуальное приближение.

В частности, решением волнового уравнения является гармоническая волна

которой мы, электротехники по образованию, не располагаем в достаточной мере, поэтому не можем выступить в качестве экспертов, способных предоставить информацию в базу знаний. Вторым не менее серьезным недостатком использования нечеткого регулятора есть необходимость использования каких-либо сигналов обратной связи – нечеткий регулятор не может работать «вслепую».

**Нейросетевое управления.** Этот способ управления довольно перспективен для решения данной задачи управления тяговыми электромеханическими комплексами рудничного электровозосостава [12]. Из литературы известно, что нейронные сети успешно применяются для синтеза систем управления динамическими объектами. Нейросети обладают рядом уникальных свойств, которые делают их мощным инструментом для создания систем управления: способностью к обучению на примерах и обобщению данных, способностью адаптироваться к изменению свойств объекта управления и внешней среды, пригодностью для синтеза нелинейных регуляторов, высокой устойчивостью к повреждениям своих элементов в силу изначально заложенного в нейросетевую архитектуру параллелизма.

Нейронные сети не программируются в привычном смысле этого слова, они обучаются. Возможность обучения — одно из главных преимуществ нейронных сетей перед традиционными алгоритмами. Технически обучение заключается в нахождении коэффициентов связей между нейронами. В процессе обучения нейронная сеть способна выявлять сложные зависимости между входными данными и выходными, а также выполнять обобщение. Это значит, что в случае успешного обучения сеть сможет вернуть верный результат на основании данных, которые отсутствовали в обучающей выборке, а также неполных и/или «зашумленных», частично искаженных данных.

Нейроуправление, в отличие от нечеткого управления, обладает двумя значительными преимуществами:

нейрорегулятор способен работать без сигналов обратной связи (обратные связи для него нужны только на период обучения, нечеткому регулятору обратные связи нужны всегда);

нейрорегулятор способен отрабатывать ситуации, которые отсутствовали при обучении, то есть вероятность правильного переходного процесса при работе нейрорегулятора выше, чем при работе нечеткого регулятора.

Приведенные результаты анализа возможных направлений аналитических исследований позволяют сделать следующие заключение.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Анализ возможностей различных математических подходов для решения задачи построения алгоритма управления тяговой электромеханической системой электровозов рудничных составов с требуемым уровнем точного безударного управления при погрузочно-разгрузочных операциях, позволяют сделать вывод, что наиболее перспективными математическими подходами для решения этой задачи являются: подход длинноволнового приближения, идентификации объекта управления и нейросетевого управления. Именно эти подходы следует принять в качестве ориентиров при решении задачи строения системы управления электровозосоставом – либо все вместе для дальнейшего сравнения, либо какой-то произвольно выбранный из них.

#### *Список литературы*

1. Волотковский С.А. Рудничная электровозная тяга. - М.: Недра, 1981. — 389 с.
2. Дебелый В.Л. Основные направления развития шахтного локомотивного транспорта / В.Л. Дебелый, Л.Л. Дебелый, С.А. Мельников // Уголь Украины. - 2006. - №6. - С.30-31.
3. Синчук О.Н. Системы управления рудничным электровозным транспортом / О.Н. Синчук, Т.М. Беридзе, Э.С. Гузов. - М.: Недра, 1993. - 254 с.
4. Сборник технико-экономических показателей горнодобывающих предприятий Украины в 2009-2010 гг.: Анализ мировой конъюнктуры рынка ЖРС 2004 – 2011 гг.: / Е.К. Бабец, Л.А. Штанько, В.А. Салганик, И.Е. Мельникова и др. – Кривой Рог: Видавничий дім. 2011. – 329 с.
5. Черная, В.О. К анализу псевдоаварийных режимов функционирования тяговых электротехнических комплексов рудничных электровозов / В.О. Черная // Проблемы недропользования: международный форум-конкурс молодых ученых: сборник научных трудов. Часть 1. – Санкт-Петербург, 2011. – С. 239–241.
6. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений подземным способом. – 3-е изд. – М.: Недра, 1987. – 223 с.
7. Шахтарь П.С. Динамические процессы в рудничных локомотивах и методика расчета параметров механической части. Диссертационная работа на соискание ученой степени доктора технических наук. – Донецк, 1974. – 224 с.



8. Сінчук О.М. Research of electromagnetic processes in traction electromechanical complexes with IGBT-converters at resistor braking of electric motors / Сінчук О.М., Сінчук І.О., Якимець С.Н., Лесной Н.И., Скапа Е.И // Наукові праці ДНТУ. Серія «Елетротехніка і енергетика» №11 (186) Донецьк, ДНТУ, 2011.С. 365 – 368.
9. Тарасевич Ю.Ю., Водолазская И.В. Колебания и волны / Тарасевич Ю.Ю., Водолазская И.В. Учебное пособие. – Астрахань: Астраханский государственный университет. 2004. – 79 с.
10. Крауфорд Ф. Волны. М.: Наука. – 2000. – 521 с.
11. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. М.: Наука, 1991. – 432 с.
12. Ивоботенко Б.А. Планирование эксперимента в электромеханике / Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П.. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.
13. Пупков К.А. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Пупков К.А., Егупов Н.Д., Зверев В.Ю. и др.: Учебник. Под ред. Н.Д. Егупова; издание 2-ое, стереотипное. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. - 744 с., ил.

Рукопись поступила в редакцию 20.04.16

УДК 681.513.6

В.О. КОНДРАТЕЦЬ, д-р техн. наук, проф., А.М. МАЦУЙ, канд. техн. наук, доц.  
Кіровоградський національний технічний університет

## МЕТОД АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ПОДРІБНЕННЯМ РУДИ КУЛЬОВИМ МЛИНОМ З ОПТИМІЗАЦІЄЮ ДИНАМІКИ РОЗРІДЖЕННЯ ПУЛЬПИ

Метою роботи є розробка методу автоматизованого керування подрібненням руди кульовими млинами з оптимізацією динаміки розрідження пульпи та включенням в продуктивну роботу початкової ділянки барабана технологічного агрегата. Поставлена мета досягається автоматизованим керуванням на двох ієрархічних рівнях. Перший ієрархічний рівень керування здійснюється в межах стабілізації загального розрідження пульпи в кульовому млині з заданою точністю.

Другий ієрархічний рівень керування реалізовано в межах першого використовуючи загальну витрату води у кульовий млин для досягнення заданого розрідження пульпи. Загальна витрата води розподіляється між адаптивними контурами керування витратою води на поверхню руди, що направляється в млин, в приймальний пристрій завиткового живильника та безпосередньо в технологічний агрегат. Обидва контури виконані оптимальними і реалізують релейний закон керування. Завдання на розрідження пульпи формується автоматично в кожному циклі керування, адаптованому до швидкості руху конвеєрної стрічки. Доведені всі положення і залежності, на які спирається даний метод, зокрема, критерії оптимальності, алгоритми визначення площі поверхні рухомої дробленої руди, витрати води у приймальний пристрій завиткового живильника та середньої крупності дробленого матеріалу.

Вперше запропоновані залежності для визначення крупності дробленої руди в потоці, площі поверхні рухомого дробленого матеріалу, а також спосіб автоматизованого керування подрібненням руди з оптимізацією динаміки розрідження пульпи.

Реалізація запропонованого методу керування забезпечує включення в продуктивну роботу початкової ділянки барабана млина, що дорівнює  $\frac{1}{4} \dots \frac{1}{2}$  його довжини. Це гарантує збільшення продуктивності за готовим продуктом до 7%, зменшення втрат корисного компонента без перевитрати електричної енергії, куль і футеровки.

**Ключові слова:** подрібнення руди, пульпа, оптимізація розрідження, адаптивне розподілене керування, поверхня твердого.

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Основною сировиною чорної металургії України є концентрат збагачених залізних руд. Підвищена вартість вітчизняного концентрату порівняно з зарубіжною сировиною значно зменшує конкурентоспроможність як самої продукції збагачувальної галузі, так і продукції чорної металургії. Такий стан склався в основному в наслідок великих втрат електроенергії, куль і футеровки в перших стадіях подрібнення, які необхідно терміново зменшувати. Тому дана стаття спрямована на розв'язання Галузевої програми енергоефективності та енергозбереження на період до 2017 р., затвердженої наказом Міністра промислової політики України №152 від 25.02.2009 року, в частині гірничо-металургійного комплексу, та держбюджетної теми «Оптимізація продуктивності кульових млинів по руді і готовому продукту при мінімальних енергетичних і матеріальних перевитратах» (державний реєстраційний номер 0115U003942) плану науково-дослідних робіт Кіровоградського національного технічного університету.

**Аналіз досліджень і публікацій.** На необхідність покращення керування даним технологічним процесом звертається увага в роботах [1-5]. Таке керування повинно спиратись на особливості цих технологічних процесів. Технологічні основи вирішення даної проблеми частково розглянуті в роботах останніх років [6, 7]. Аналіз підходів до автоматизації процесів подріб-

нення руд і систем керування за тривалий період розглянуто в працях [8-10]. Діючі системи у виробничих умовах описані і проаналізовані в колективній монографії [11]. У монографії [12] ця проблема розглянута найбільш детально. В ній викладені останні досягнення в розвитку автоматизації процесів керування подрібненням руди у перших стадіях. В той же час не розглядалося автоматичне керування розрідженням пульпи у кульовому млині, яке б сприяло створенню і підтриманню заданого співвідношення тверде/рідке у технологічному агрегаті при забезпеченні якісного перемішування матеріалів на початковій ділянці барабана, що значно підвищує ефективність роботи куль і не допускає перевитрати електричної енергії, куль і футеровки з одночасним підвищенням продуктивності по готовому продукту.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є розробка методу автоматизованого керування подрібненням руди кульовими млинами з оптимізацією динаміки розрідження пульпи та включенням в продуктивну роботу початкової ділянки барабана технологічного агрегата.

**Викладення матеріалу та результати.** Початкова ділянка барабана кульового млина включається в продуктивну роботу при якісному осередненні вихідної руди, пісків односпірального класифікатора та води як за крупністю, так і вмістом води в суміші матеріалів. Це можливо при передачі найбільшої частки води безпосередньо вихідній руді, максимальному розрідженню пісків класифікатора та найменшій подачі води безпосередньо в кульовий млин. Оптимальне розрідження пульпи в кульовому млині, як відомо, визначається крупністю руди. Оскільки при розвантаженні бункерів з вихідною рудою вона на конвеєрній стрічці розташовується циклічно з різною довжиною ділянок за крупністю, при завантаженні кульового млина також циклічно необхідно змінювати завдання на розрідження пульпи. Авторами даної роботи розроблено підхід визначення співвідношення тверде/рідке в кульовому млині в залежності від середньої крупності вихідної руди. Прогнозувати співвідношення тверде/рідке, яке складається в кульовому млині в залежності від ситуації на його вході, можливо відповідно залежності [13]

$$K_{(T/P)P} = \frac{A_{\delta}(Q_{VP} - Q_{VBG}) + Q_{PM}}{Q_{BM} + Q_{BGM} + K_n[A_{\delta}(Q_{VP} - Q_{VBG})]}, \quad (1)$$

де  $A_{\delta} = \delta_T \delta_B / (\delta_B + K_n \delta_T)$ ;  $\delta_B, \delta_T$  - відповідно густина води і руди;  $K_n$  - відносний вміст вологи в пісках класифікатора;  $Q_{PM}, Q_{BM}, Q_{BGM}$  - відповідно масова витрата вихідної руди, води в млин і води, що подається у пісковий жолоб;  $Q_{VP}, Q_{VBG}$  - відповідно об'ємна витрата пульпи у пісковому жолобі та води у пісковий жолоб.

Знаючи прогнозоване та задане значення співвідношення тверде/рідке, можливо здійснити автоматичне керування розрідженням пульпи у кульовому млині. Аналіз показує, що автоматичне керування слід здійснювати у вигляді двох ієрархічних рівнів. Перший ієрархічний рівень охоплює загальний процес підтримання заданого співвідношення руда/вода, а другий ієрархічний рівень буде здійснюватись в межах загальної витрати води в млин, адаптувати витрату до поверхні сипкого матеріалу, розрідження пульпи у приймальному пристрої завиткового живильника та безпосередньої подачі частини цієї води у кульовий млин.

Найбільш доцільно здійснити оптимальне керування розрідженням пульпи у кульовому млині. При оптимальному керуванні закон керування обирають за максимумом чи мінімумом того або іншого показника якості. При цьому необхідно враховувати обмеження, якщо вони виникають. Закон керування може бути або лінійним, або нелінійним. Більш широкими можливостями при оптимізації за конкретним критерієм якості володіють нелінійні закони керування. При оптимальному керуванні часто використовують релейний закон. Критерій оптимальності звичайно виражають або безпосередньо у вигляді функції від параметрів закону керування, які необхідно вибирати, або як результат розв'язку рівняння динаміки процесу, який необхідно оптимізувати. У даному випадку для першого ієрархічного рівня задачу оптимального керування можливо сформулювати таким чином: необхідно знайти таке керування, яке у разі дотримання обмежень переводить об'єкт з початкового стану у кінцевий так, що при цьому функціонал набуває мінімуму. Тобто, необхідно знайти оптимальне керування.

Керування першого ієрархічного рівня ґрунтується на операції прогнозування, яка визначає майбутнє значення співвідношення тверде/рідке у кульовому млині. Для отримання адекватних прогнозів технологічного параметра насамперед необхідно узгодити вхідні сигнали в часі. Вплив відставання за витратою води в пісковий жолоб виключено стабілізацією подачі води [14]. Сигнал витрати пульпи у пісковому жолобі класифікатора відстає в наслідок ємкісного і

транспортного запізнювання в завитковому живильнику. Цей сигнал необхідно фільтрувати як найменше впродовж 10,16 с. Оскільки спіральний класифікатор занадто інерційний технологічний агрегат, то в ньому дуже повільно змінюється режим і, як наслідок, витрата пісового продукту. Тому сигнал витратоміра пульпи в пісовому жолобі класифікатора без впливу на точність визначення параметра можливо фільтрувати значний час, наприклад, впродовж 60 с. Тоді це фактично буде постійна величина, яка від циклу до циклу може незначно змінюватись. За таких умов з незначним часом запізнювання порівняно з тривалістю фільтрування з запізнюванням можливо не рахуватись. Вода в млин в даній системі повинна подаватись без лотка – безпосередньо по трубі. Тоді запізнювання в подачі води не виникає, оскільки рідина не стискується і її витрата залежить лише від положення регулювального органа. Отже, відставання і час запізнювання буде виникати лише в лінії подачі руди в млин, але його можливо використати на користь процесу керування.

Конвеєрні ваги встановлюють на певній відстані  $L_K$  від завантажувальної горловини млина. Час транспортування буде  $\tau'_K = L_K/v_{KC}$ , де  $v_{KC}$  - швидкість руху конвеєрної стрічки. Запізнювання в лотку складе  $\tau_{P1} = L_{LP}/v_P$ , воно незмінне і незначне. Враховуючи, що сигнал витрати руди фільтрується тривалий час, доцільно здійснювати циклічне керування з тривалістю циклу, який дорівнює  $\tau_{CK} = \tau'_K + \tau_{P1}$ . Наприклад,  $\tau_{P1} = 1,0$  с = const,  $L_K = 10$  м,  $v_{KC} = 1$  м/с. Тоді  $\tau_{CK} = L_K/v_{KC} + 1 = 11$  с. В процесі руху конвеєрної стрічки впродовж 11 с буде визначена середня витрата руди, яка після закінчення встановленої тривалості вимірюватись не буде і лише поступатиме у кульовий млин. За цей же час визначиться середнє значення крупності руди  $D$  і встановиться відповідне задаюче діяння. Оптимальне керування повинне здійснити перехід з одного положення регулювального органа в інше, що відповідає новому незмінному значенню завдання  $K_{(T/P)Z}$ . При цьому критерій оптимальності керування першого ієрархічного рівня можливо подати залежністю

$$J_1 = K_{K_{(T/P)Z}}(t) - K_{K_{(T/P)P}}(t) \rightarrow \min, \quad (2)$$

Тобто, після закінчення циклу фільтрування крупності руди необхідно якомога швидше встановити нове значення задаючого діяння  $K_{(T/P)Z}(t)$ , оскільки після закінчення фільтрування процес відбувається в часі. Спочатку здійснюється перехід від попереднього до нового значення  $K_{(T/P)Z}$ , яке після цього залишається незмінним. Оптимальне керування першого ієрархічного рівня здійснює такий перехід. Забезпечивши швидке переведення задавача і регулювального органа в новий стан, гарантуємо точну відповідність в циклі поданої води в млин руді, що надійшла у нього і сформувала певну ділянку заповненням твердим. Далі розглянуті цикли фільтрування і подачі руди повторюються. Якщо при подачі руди поточного циклу в млин швидкість руху конвеєрної стрічки змінилась, то відповідно змінюються умови наступного циклу. Зростання швидкості  $v_{KC}$  приведе до скорочення тривалості циклу фільтрування сигналів, оскільки  $\tau'_K = L_K/v_{KC}$ . Зменшення швидкості руху конвеєрної стрічки збільшить тривалість фільтрування сигналу руди. Таким чином, для забезпечення високої точності розрідження пульпи у кульовому млині керування першого ієрархічного рівня повинно адаптуватись до швидкості руху конвеєрної стрічки, тобто, керування необхідно виконати адаптивним. Воно повинно автоматично змінювати тривалість фільтрування у відповідності з залежністю  $\tau_{CK} = 1 + L_K/v_{KC}$ , с.

У межах витрати води у кульовий млин, яка забезпечується керуванням першого ієрархічного рівня, необхідно реалізувати адаптивні керування витратою води на поверхню руди і в приймальний пристрій завиткового живильника. При цьому керування першого ієрархічного рівня забезпечує передумови необхідної точності розрідження пульпи, а адаптивні керування другого ієрархічного рівня - перерозподіл загальної витрати води за матеріальними потоками, тобто, саму цю точність. При цьому додатково вимірюють площу поперечного перерізу потоку руди на конвеєрній стрічці, а автоматичне керування здійснюють поділом повної витрати води в млин на три нерівні частини, першу з яких подають безпосередньо на руду, що направляється у технологічний агрегат, автоматично змінюючи кількість рідини за величиною площі поверхні твердого у рудному потоці, помноженій на товщину водяної плівки, що утримується молекулярними силами зчеплення, другу - за витратою доданої води на вході приймального пристрою завиткового живильника, а третю відповідно залишку від повної витрати води в млин, зменшеної на дві відмічені складові. Даний підхід автоматичного керування захищено патентом України [15]. Він різко підвищує ефективність роботи кульового млина, збільшуючи робочу ділянку барабана на  $1/4 \dots 1/3$  його початкової довжини.

Керування другого ієрархічного рівня також доцільно виконати оптимальними. Їх загальним критерієм оптимальності буде  $J_2 = \Delta Q_{bB} \rightarrow \min$ , тобто залишок загальної витрати води у кульовий млин (керуючого впливу) повинен бути мінімальним. Критерій оптимальності буде мати вигляд

$$J_2 = \Delta Q_{bB} = Q_{bB} - Q_{VS} - Q_{BD}, \quad (3)$$

де  $Q_{VS}$  - витрата води на поверхню руди;  $Q_{BD}$  - додаткова витрата води у приймальний пристрій завиткового живильника.

Загальна витрата води у кульовий млин залежить від продуктивності і крупності руди, тобто, є змінною величиною. Змінними величинами також є витрата води на поверхню руди і в приймальний пристрій завиткового живильника. Тому  $J_2 = \Delta Q_{bB}$  змінюється в часі і за цих умов його необхідно зменшувати до найменшого значення. Реалізація даної умови потребує забезпечення можливої найбільшої витрати води на поверхню руди і в приймальний пристрій завиткового живильника, розріджуючи пісковий потік до граничного значення.

Інформаційне забезпечення автоматизованої системи керування другого ієрархічного рівня зводиться до знаходження площі  $S_T(t)$  поверхні рухомого твердого та витрати додаткової води на вході приймального пристрою завиткового живильника  $Q_{BD}$ . Для визначення площі поверхні рухомого твердого отримана залежність

$$S_T(t) = \frac{6}{\delta_T g L} \frac{F(t) \cdot v(t)}{D}, \quad (4)$$

де  $g$  - прискорення земного тяжіння;  $L$  - базова відстань конвеєрних вагів (проміжок між несучими роликками конвеєрних вагів, який звичайно дорівнює 1м);  $F(t)$  - погонне навантаження руди на конвеєрній стрічці;  $v(t)$  - швидкість руху конвеєрної стрічки;  $D$  - середня крупність руди в потоці сипкого матеріалу.

Витрату додаткової води на вході приймального пристрою завиткового живильника знаходимо відповідно виведеній залежності

$$Q_{BD} = \frac{(Q_{VP} - Q_{VBG})}{\left( \frac{\delta_B}{\delta_T} + K_n \right)} \left[ \frac{1}{K_{(T/P)g}} - K_n \right] - Q_{VBG}, \quad (5)$$

де  $K_{(T/P)g}$  - співвідношення тверде/рідке в пісковому жолобі.

В залежностях (4) і (5)  $\delta_B$ ,  $\delta_T$ ,  $g$ ,  $L$ ,  $K_n$ ,  $K_{(T/P)g}$ ,  $Q_{VBG}$  - незмінні величини. Величини  $F(t)$  і  $v(t)$  - визначаються конвеєрними вагами, а об'ємна витрата пульпи у пісковому жолобі вимірюється багатоканальним скануючим пристроєм при прогнозуванні співвідношення тверде/рідке в кульовому млині. Для здійснення адаптивного керування витратою води необхідно виміряти лише середню крупність  $D$  руди в потоці сипкого матеріалу, визначити  $S_T(t)$  за залежністю (4) і помножити це значення на товщину плівки води на поверхні твердого.

Середню крупність руди в потоці сипкого матеріалу можливо знайти відповідно запропонованому виразу

$$D = \frac{\delta_T g L}{k_p} \cdot \frac{S_p(t)}{F(t)} - \frac{b}{k_p}, \quad (6)$$

де  $k_p$  - коефіцієнт пропорційності, що має розмір 1/м;  $b$  - вільний член, який дорівнює одиниці;  $S_p(t)$  - площа поперечного перерізу рудного потоку.

Оскільки  $k_p$  і  $b$  незмінні величини, середню крупність руди в потоці можливо знаходити, вимірюючи площу його поперечного перерізу тим же скануючим пристроєм.

Середню крупність дробленого матеріалу в різних виробничих умовах можливо також визначати, використовуючи досягнення в цьому напрямі досліджень наукової школи В.С. Моркуна, наприклад [16,17] та спільних наукових праць з О.В. Поркуян [18]. При відомому типі руди її середню крупність можливо виміряти, використовуючи експериментально отриману залежність, викладену в [19].

Розроблений підхід визначення задаючого діяння опирається на експериментально отримані на конкретному типі руди залежності і тому є достовірним. Алгоритм прогнозування співвідношення тверде/рідке у кульовому млині [13] отримано аналітичним шляхом і перевірено на практиці. Критерії оптимальності (2) і (3) логічно доводяться і не можуть мати багатоваріант-

ного тлумачення. Всі інші задачі запропонованого методу логічно доводяться і для цього використані відомі і добре перевірені наукові методи. Для забезпечення  $J_1 \rightarrow \min$  (2) необхідно обом керуванням надати максимальну швидкодію, що забезпечується використанням релейного закону. Обмеження тут можливо не накладати, оскільки витрата води змінюється в передбачених межах від  $Q_{bBmin}$  до  $Q_{bBmax}$  і їх не варто порушувати. Залежності (4), (5) і (6) отримані аналітично. Для їх реалізації використовуються вимірювальні засоби, які володіють високою швидкістю і достатньою точністю. Мікропроцесорні пристрої забезпечують високу точність і швидкість знаходження технологічних параметрів, а релейні закони керування – швидке переведення регулювальних органів в нове положення. Все це гарантує забезпечення необхідної якості функціонування системи автоматизованого керування подрібненням руди кульовим млином з оптимізацією динаміки розрідження пульпи. Достовірність запропонованого методу адаптивного керування подрібненням руди кульовими млинами підтверджується і видачею патенту на цей винахід [15].

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Отже, запропонований метод автоматизованого керування подрібненням руди кульовими млинами з оптимізацією динаміки розрідження пульпи, створює передумови як формування матеріальних потоків на вході технологічного агрегату, так і забезпечення заданого рівня технологічного параметра по всій довжині подрібнюючого агрегату, що гарантує збільшення продуктивності по готовому продукту до 7%, зменшення втрат корисного компонента без перевитрати електричної енергії, куль і футеровки.

Проведені дослідження відкривають перспективу розробки системи автоматизованого керування подрібненням руди у кульових млинах з оптимізацією динаміки розрідження пульпи.

#### Список літератури

1. **Моркун В.С.** Формирование робастного автоматизированного управления замкнутым циклом измельчения на основе  $H_\infty$ -нормы / **В.С. Моркун, Н.В. Моркун, В.В. Тронь** // Гірничий вісник: наук.-техн. зб. ДВНЗ «КНУ». - 2014.- Вип. 98.- С. 83-85.
2. **Купін А.І.** Інтелектуальна ідентифікація та керування в умовах процесів збагачувальної технології / **Купін А.І.** – Кривий Ріг: Видавництво КТУ, 2008.- 204с.
3. **Назаренко М.В.** Прогнозуюче адаптивне керування стохастичною системою для забезпечення раціональних техніко-економічних показників на прикладі залізрудного гірничо-збагачувального комбінату / **Назаренко М.В.** – Кривий Ріг: Діоніс (ФОП Чернявський Д.О.). – 2010. – 309 с.
4. **Азарян А.А.** Автоматизация первой стадии измельчения, классификации и магнитной сепарации – реальный путь повышения эффективности обогащения железных руд / **А.А. Азарян, Ю.Ю. Кривенко, В.Г. Кучер** // Вісник Криворізького національного університету: зб. наук. праць.- 2014.- Вип. 36.- С. 276-280.
5. **Тронь В.В.** Формування адаптивного керування процесом подрібнення залізрудної сировини в умовах невизначеності характеристик об'єкта / **В.В. Тронь, К.В. Маєвський** // Гірничий вісник: наук.-техн. зб. ДВНЗ «КНУ». - 2015.- Вип. 99.- С. 27-32.
6. **Маляров П.В.** Основы интенсификации процессов рудоподготовки / **Маляров П.В.**- Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004.- 320с.
7. **Науменко Ю.В.** Основы теории режимов работы барабанных млинов: [монографія] / **Науменко Ю.В.**- Рівне: Видавництво СПД Зелент, 2009.- 282с.
8. **Herbst J.A.** Model-based control of mineral processing operations / **J.A. Herbst, W.T. Pate, A.E. Oblad** // Powder Technology.- 1992.- Vol.69.- P. 21-32.-ISSN 0032-5910.
9. **Линч А. Дж.** Циклы дробления и измельчения / **Линч А. Дж.**: [пер. с англ.].- М.: Недра, 1981.- 342с.
10. Измельчение. Энергетика и технология / [Пивняк Г.Г., Вайсберг Л.А., Кириченко В.И. и др.].- М.: Изд. дом “Руда и Металлы”, 2007.- 296 с.
11. Разработка и применение автоматизированных систем управления процессами обогащения полезных ископаемых / [Морозов В.В., Топчаев В.П., Улитенко К.Я. и др.].- М.: Изд. дом «Руда и Металлы», 2013.- 512 с.
12. **Кондратец В.О.** Автоматизація процесів керування розрідженням пульпи при подрібненні руди барабанными млинами / **Кондратец В.О., Сербул О.М., Мацуй А.М.**; за ред. В.О. Кондратця.- Кіровоград: КОД, 2013.- 368с.
13. **Кондратец В.О.** Ідентифікація співвідношення руда/вода на вході кульового млина / **В.О. Кондратец, О.М. Сербул** // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць КНТУ.- 2006.- Вип. 17.- С. 265-272.

14. **Кондратець В.О.** Теоретичне дослідження розрідження пісків односпірального класифікатора джерелом з незмінною витратою води / **В.О. Кондратець, О.М. Сербул** // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць КНТУ.- 2013.- Вип. 26.- С. 173-180.
15. Пат. 90851 Україна, МКВ 7 В 03 В 11/00, В 02 С 25/00. Спосіб автоматичної стабілізації розрідження пульпи в млинах з циркулюючим навантаженням /**Кондратець В.О.**; заявник і патентовласник Кіровоградський національний технічний університет. – №u201400514; заявл. 20.01.14; опубл. 10.06.14, Бюл. № 11.
16. **Morkun V.S, Morkun N.V, Pikilnyak A.V.** (2014). Ultrasonic phased array parameters determination for the gas bubble size distribution control formation in the iron ore flotation, Metallurgical and Mining Industry, No3, p.p. 28-31.
17. **Morkun V.S, Morkun N.V, Pikilnyak A.V.** (2014). The gas bubble size distribution control formation in the flotation process, Metallurgical and Mining Industry, No4, p.p. 42-45.
18. **Моркун В.С.** Контроль гранулометрического состава железорудной пульпы на базе комбинированного использования объемных ультразвуковых волн и волн Лява /**В.С. Моркун, О.В. Поркуян** // Вісник Криворізького технічного університету: зб. наук. праць.- 2007.- Вип.17.- С.224-230.
19. **Гуленко Т.И.** Исследование стержневого датчика с пьезокерамическим преобразователем / **Т.И. Гуленко, В.А. Кондратец, В.И. Лопатин** // Контрольно-измерительная техника: респ. межвед. научн.-техн. сборник.- 1972.- Вып.12.- С.93-99.

Рукопис подано до редакції 18.04.16

УДК 621.3.011.712: 621.3.014.8

А.И. САВИЦКИЙ, А.Б. СЁМОЧКИН, С.В. СЁМОЧКИНА, кандидаты техн. наук, доц.,  
Криворожский национальный университет

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ КЛЕТЕЙ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

В данной статье проводится анализ коэффициента мощности, гармонического состава тока и напряжения, а также оценка их уровней на основе стандарта IEEE 519-1992. Целью работы является определение необходимости мониторинга параметров качества электрической сети и точек замеров в промышленных условиях за счет внедрения сетевых систем дистанционного сбора информации. Указаны последствия несоответствия реальных значений требуемым стандартам. Моделирование электроэнергетической системы выполнено в программной среде Matlab. Проводились исследования энергетических показателей для 12-пульсной и 6-пульсной схем неререверсивного тиристорного привода при управлении отдельной клетью прокатного стана. Рассмотрен случай управления прокатной линией из 21 клетки, при одинаковом угле отпирания для всех тиристоров и при согласованном управлении с помощью сдвига между углами отпирания тиристорных преобразователей для соседних клеток прокатного стана. Даны рекомендации по выбору значений углов управления, с учетом необходимости соблюдения технологических ограничений (согласование скоростей клеток). Кроме этого результаты работы будут положены в ряд мероприятий по эффективному фазовому управлению распределенными силовыми преобразователями прокатных приводов по промышленной информационной сети. Отмечена целесообразность применения методов нечеткой логики для согласованного энергоэффективного управления отдельными электроприводами.

**Ключевые слова:** тиристорный электропривод, прокатный стан, энергетические показатели, коэффициент искажения, промышленная информационная сеть

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Сети питания крупных промышленных цехов, включающих прокатные станы, в настоящее время характеризуются повышенным потреблением реактивной мощности и гармоническими составляющими напряжения и тока, образуемых силовым оборудованием с полупроводниками. Это ведет к определенным вредным последствиям в зависимости от прикладной области:

возникновение пиковых перенапряжений, перегрузок, что может вызвать отключение от сети;

увеличение действующих значений тока и напряжения ведет к увеличению потерь;

увеличение частоты в спектре тока приводит к механическим, тепловым нагрузкам и уменьшает жизненный цикл оборудования электрических систем, производит нагрев трансформаторов, кабелей, электродвигателей [1-3];

увеличиваются затраты реактивной мощности;

появляется мерцание освещения;

увеличивается количество сбоев в работе защиты сети;  
чаще происходят сбои в работе электронного точного оборудования и информационной сети [4].

В условиях непрерывного производства выполнять многократные эксперименты по управлению преобразователями практически, при прокатке, не возможно и экономически не оправдано.

Поэтому работа, направленная на оценку существующего уровня гармоник в электросети с помощью модели электроэнергетической системы, а затем в режиме реального времени, и разработку мероприятий для сохранения уровней этого искажения в пределах установленного диапазона согласно стандарта IEEE 519-1992, весьма актуальна.

**Анализ исследований и публикаций.** Моделированием на ЭВМ радиоэлектронных устройств занимались довольно давно [5].

Это позволяло определять наиболее приемлемые параметры электронных систем варьированием разных составляющих и самой конфигурации схем.

Анализ процессов сетей с тиристорами и компенсаторами реактивной мощности производился в сочетании метода макро моделирования [6] с модификациями итерационных методов решения нелинейных уравнений.

Как известно, одной из основных проблем при использовании преобразователей AC-DC является их электромагнитная совместимость (ЭМС) с сетью питания.

В последние годы наметилась тенденция комплексного подхода к созданию более совершенных топологий мощных выпрямителей и их систем управления для улучшения ЭМС преобразователей с питающей сетью.

Это позволяет одновременно решить несколько задач:

улучшить энергетические показатели системы (коэффициента мощности, к.п.д.);

уменьшить содержание высших гармоник входного тока преобразователя;

улучшить массогабаритные показатели преобразователей.

Перспективным является использование преобразователей на основе компенсированных управляемых выпрямителей (КУВ), несмотря на усложнение силового оборудования и сложность построения систем управления [7].

Для данного случая улучшение массогабаритных показателей преобразователей не столь важно, так как идет речь о модернизации систем контроля и управления.

**Постановка задачи.** На металлургических предприятиях в прокатных цехах имеется непрерывная прокатная линия, которая включает в себя несколько клеток, например, 21 прокатную клетку, схема которой показана на рис. 1.

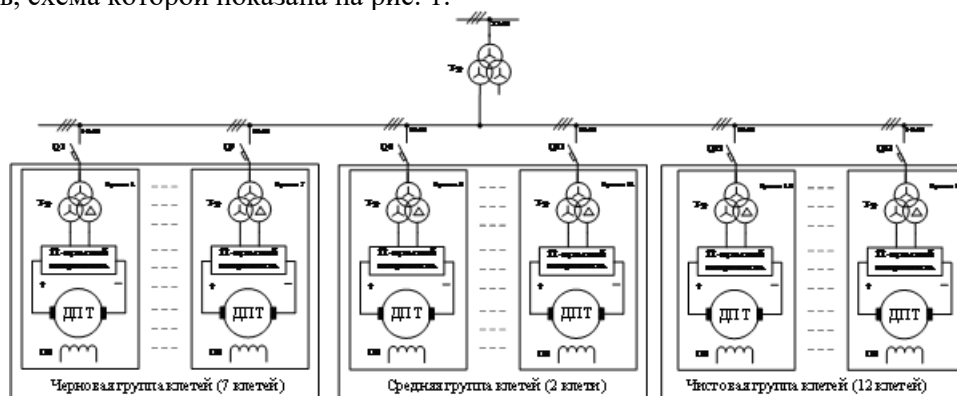


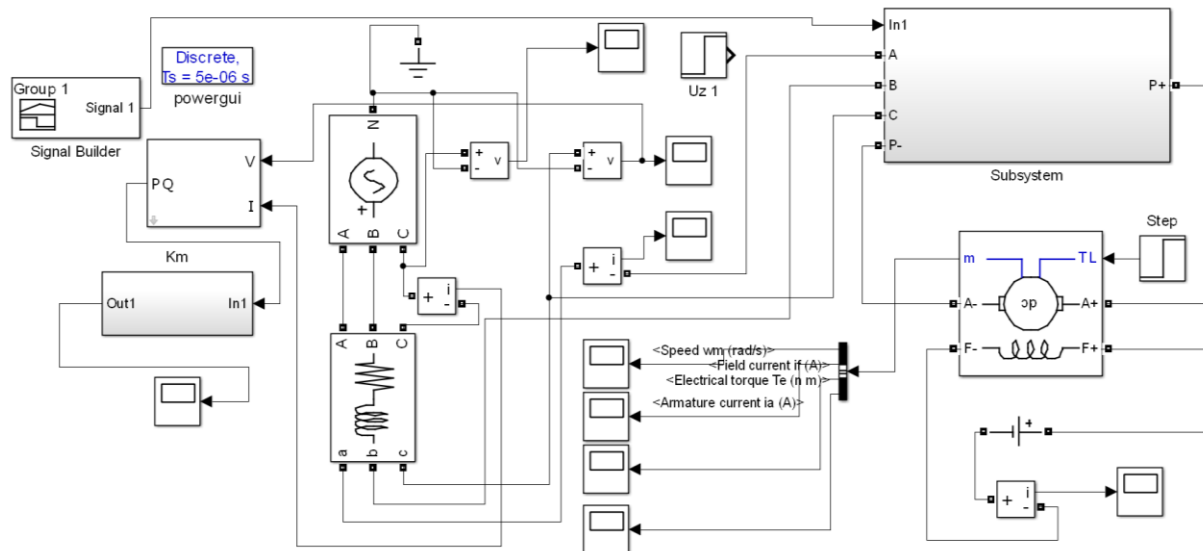
Рис. 1. Схема электроснабжения прокатной линии

К энергетическим показателям, которым уделяется внимание в данной статье, относятся коэффициент мощности и коэффициент нелинейных искажений для кривых тока и напряжения.

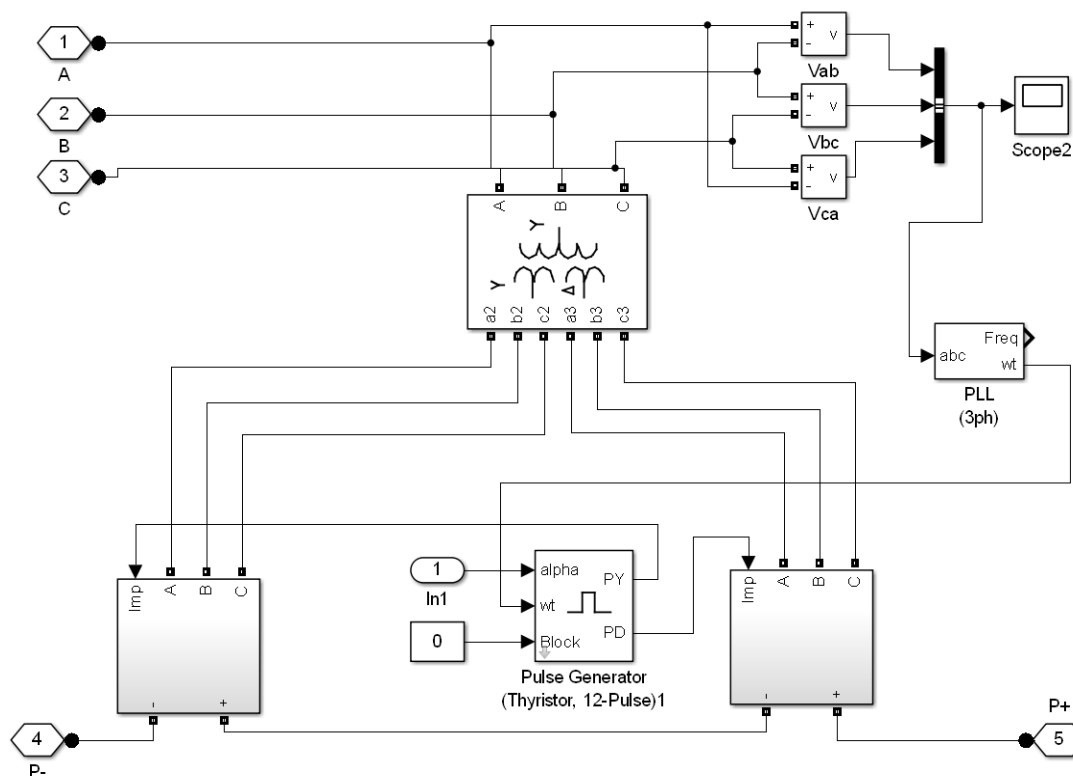
Проведено исследование этих показателей применительно к 12- и 6-пульсной схемам неревверсивного тиристорного привода.

**Изложение материала и результаты.** Анализ основных режимов работы осуществлялся с помощью моделирования в программной среде MATLAB.

Ниже представлены структурные схемы моделей для исследования энергетических показателей.



**Рис. 2.** Общая структура модели Матлаб для обоих 6-ти и 12-ти пульсных схем выпрямления



**Рис. 3.** Структура блока Subsystem для 12-пульсной схемы выпрямления

Структура блока Subsystem для 6-пульсной схемы выпрямления получается из структуры рис. 3, если исключить один мостовой выпрямитель (например, в правом нижнем углу) и заменить трехобмоточный трансформатор на двухобмоточный с аналогичными параметрами (за исключением увеличенного в 2 раза коэффициента трансформации).



Моделирование осуществлялось поэтапно, при следующих условиях: 1) пуск на полностью открытые выпрямители с моментом нагрузки 5000 Н·м, 2) на 0,5 сек осуществляется наброс полной нагрузки 15000 Н·м, 3) на 0,8 сек осуществлялось плавное снижение угла отпирания с 0 до 70 эл. град. С помощью быстрого преобразования Фурье (FFT (Fast Fourier Transform) из инструментария Matlab) были проанализированы графики первичных токов и напряжений трансформаторов на предмет искажений формы и появления сдвига фаз между ними (определяется отдельно, с помощью блоков PQ и Km). На рис. 4 представлены результаты моделирования коэффициента мощности для 6-пульсной и 12-пульсной схем выпрямления.

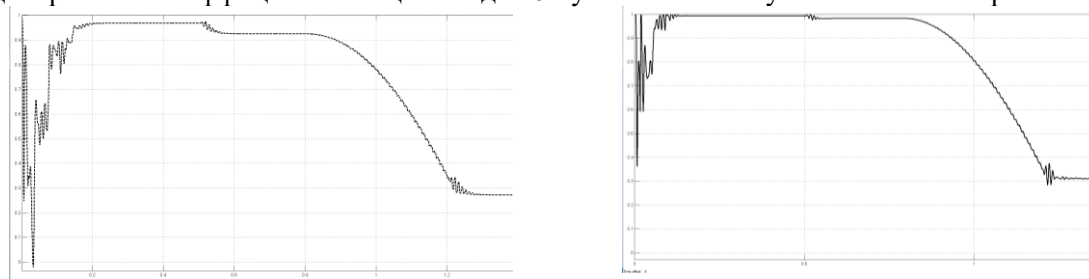


Рис. 4. Коэффициент мощности в 6-пульсной и 12-пульсной схемах питания ТП-Д (тиристорный преобразователь-двигатель)

Расчеты показывают, что при максимальном угле управления тиристорами и нагрузке 5000 Н·м коэффициент мощности 6-пульсной схемы составляет 0,969, при увеличении нагрузки до 15000 Н·м при том же угле он падает до 0,926, а при угле отпирания 70 эл. град. - до 0,272.

При питании МПТ от 12-пульсной схемы коэффициент мощности несколько улучшается, при прочих равных условиях: соответственно 0,994, 0,983 и 0,311.

Последующий анализ гармонического состава для токов и напряжений первичной обмотки трансформатора был произведен для интервала времени от 0,2 до 0,5 с (угол отпирания 0 эл. град., нагрузка 5000Н·м), от 0,6 до 0,8 с (тот же угол отпирания 0 эл. град., но в три раза увеличенный момент 15000Н·м), от 1,25 до 1,45 с (увеличенный до 70 эл. град. угол при полном моменте нагрузки 15000 Н·м). Результаты анализа были сведены в табл. 1.

Таблица 1

Гармонический состав токов и напряжений

| Тип схемы                |       | 12-пульсная |       |          |      |             |       | 6-пульсная |       |          |       |             |       |
|--------------------------|-------|-------------|-------|----------|------|-------------|-------|------------|-------|----------|-------|-------------|-------|
| Величина угла отпирания  |       | 0 эл.град.  |       |          |      | 70 эл.град. |       | 0 эл.град. |       |          |       | 70 эл.град. |       |
| Величина нагрузки        |       | 5000 Нм     |       | 15000 Нм |      | 15000 Нм    |       | 5000 Нм    |       | 15000 Нм |       | 15000 Нм    |       |
| Коэффициент искажений, % |       | THDU        | THDI  | THDU     | THDI | THDU        | THDI  | THDU       | THDI  | THDU     | THDI  | THDU        | THDI  |
|                          |       | 1,17        | 11,88 | 1,99     | 9,63 | 5,24        | 14,89 | 0,94       | 26,94 | 1,82     | 18,98 | 3,36        | 29,56 |
| Амплитуды, % от первой   | 5 –я  | 0,01        | 0,48  | 0,05     | 0,68 | 0,02        | 0,24  | 0,64       | 24,47 | 1,33     | 17,02 | 2,19        | 27,46 |
|                          | 7 –я  | 0,01        | 0,24  | 0,05     | 0,45 | 0,00        | 0,02  | 0,30       | 8,28  | 0,84     | 7,68  | 0,54        | 4,75  |
|                          | 11 –я | 0,52        | 9,31  | 1,28     | 7,64 | 2,10        | 12,37 | 0,34       | 5,85  | 0,40     | 2,33  | 1,33        | 7,57  |
|                          | 13 –я | 0,39        | 5,94  | 1,06     | 5,37 | 0,81        | 4,02  | 0,26       | 3,75  | 0,34     | 1,69  | 0,75        | 3,59  |

Анализ коэффициентов табл. 1 показывает, что во всех рассматриваемых режимах THDU в 6-пульсной схеме всегда лучше, чем в 12-пульсной. И наоборот, THDI в 6-пульсной схеме всегда хуже, чем в 12-пульсной. Далее, амплитуды 5-й и 7-й гармоник напряжения и тока действительно практически подавляются (уменьшаются в несколько десятков раз) в 12-пульсной схеме, по сравнению с 6-пульсной. То же самое можно сказать и о 11, 13 гармониках тока – они в 12-пульсной схеме значительно ниже, чем в 6-пульсной. А вот 11, 13 гармоники напряжения в 12-пульсной схеме наоборот, увеличиваются по сравнению с 6-пульсной схемой.

Для дальнейшего развития исследования энергетических показателей особый интерес представляет собой моделирование гармонического состава напряжений и токов в системе из 21-й прокатной клетки (рис. 1). Модель этой системы приведена на рис. 5.

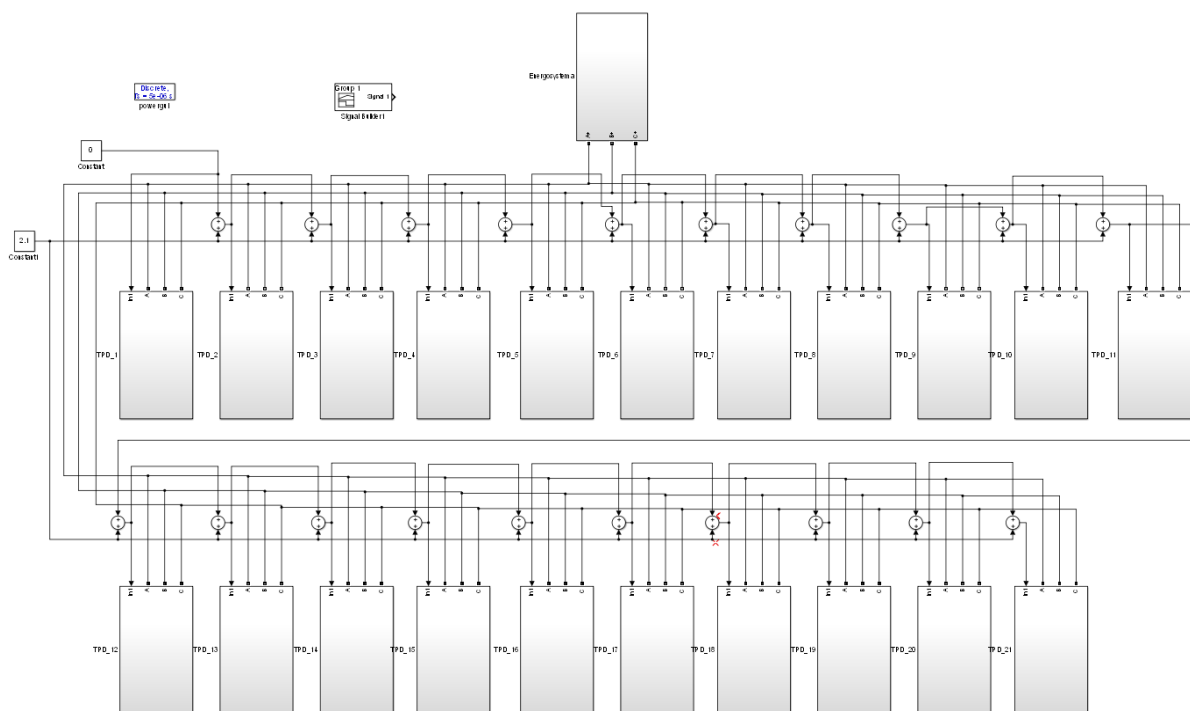


Рис. 5. Модель системи з 21-ї прокатної клітки

В этой модели в блоках TPD\_1÷ TPD\_21 реализованы модели электроприводов, аналогичные рис. 2,3, в блоке Energosystema - трансформатор 32 МВА с кабельной линией, ведущей к прокатным клетям, со средствами измерения энергетических показателей. В усилителях реализованы коэффициенты сдвига углов управления между соседними клетями прокатного стана. Моделированием установлено, что если сдвиг углов между соседними углами управления составляет 3 эл. град. (для самой быстрой клетки угол - 5 эл. град., для самой медленной - почти 70 эл. град.), получаются неплохие показатели [8], соответствующие IEEE Standard 519-2014: THDu = 1,25% при амплитуде первой гармоники 7806 В, и THDi = 0,92% при амплитуде первой гармоники 1049 А.

Для сравнения приведены аналогичные параметры для одинаковых углов управления 5 эл. град. для всех 21 прокатных клеток: THDu = 3,23% при амплитуде первой гармоники 7656 В, и THDi = 10,47% при амплитуде первой гармоники 1047 А. Детальные результаты моделирования обоих вариантов для удобства сравнения сведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительный анализ для разных и одинаковых углов управления отдельными клетями

Результаты моделирования при углах управления 5, 8, 11, ... 68 эл. град. соответственно для 1-й, 2-й, 3-й, ... 21-й прокатных клеток

Результаты моделирования при углах управления 5 эл. град. для всех 21 прокатных клеток

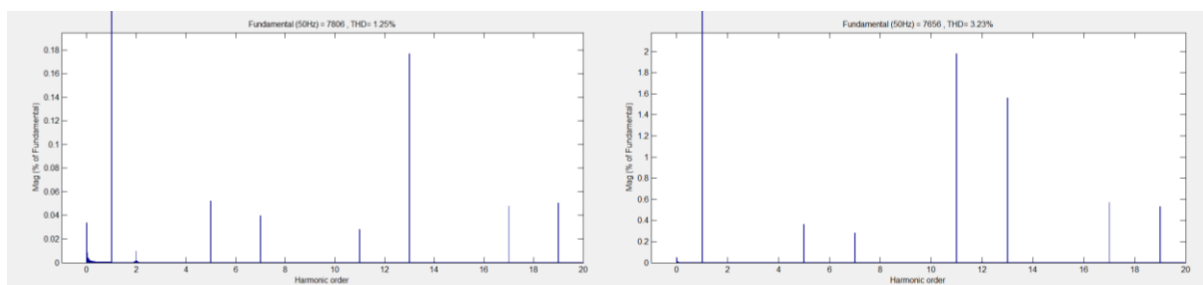


Рис. 6. Спектральный состав напряжения на шинах проката

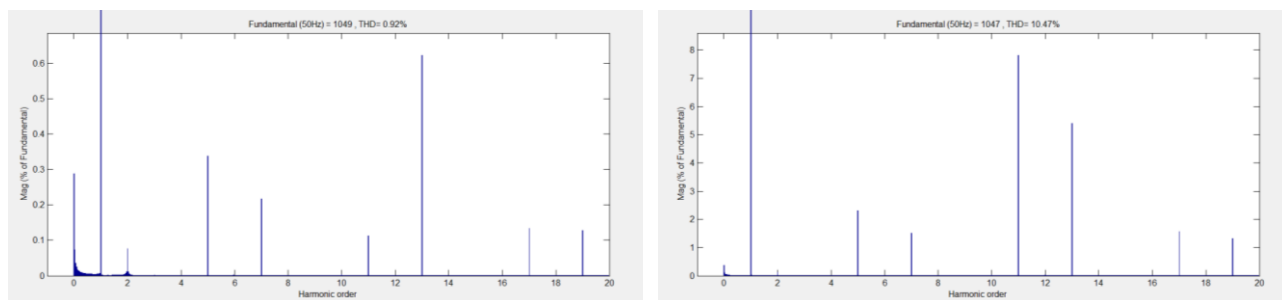


Рис. 7. Спектральный состав первичного тока трансформатора 32 МВА

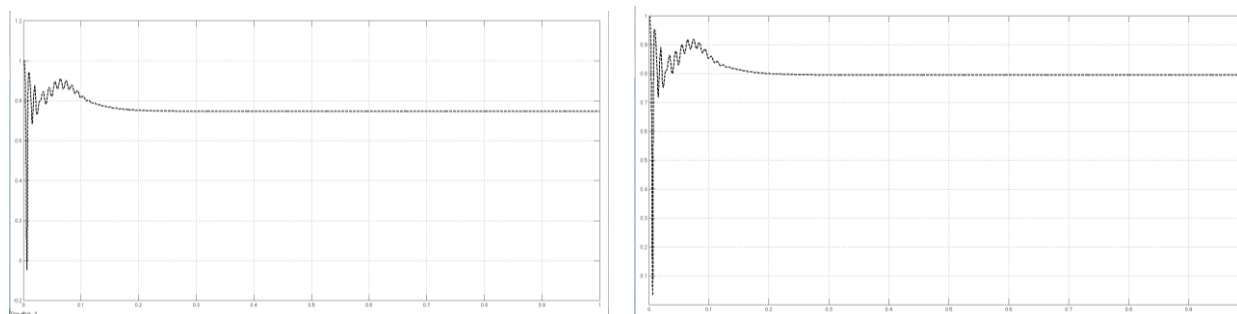


Рис. 8. Коэффициент мощности (0,75 и 0,795 соответственно)

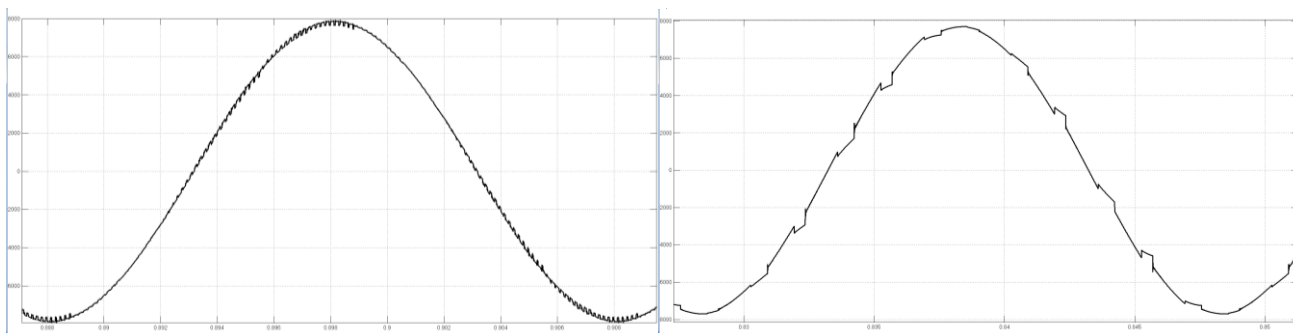


Рис. 9. График напряжения на шинах проката

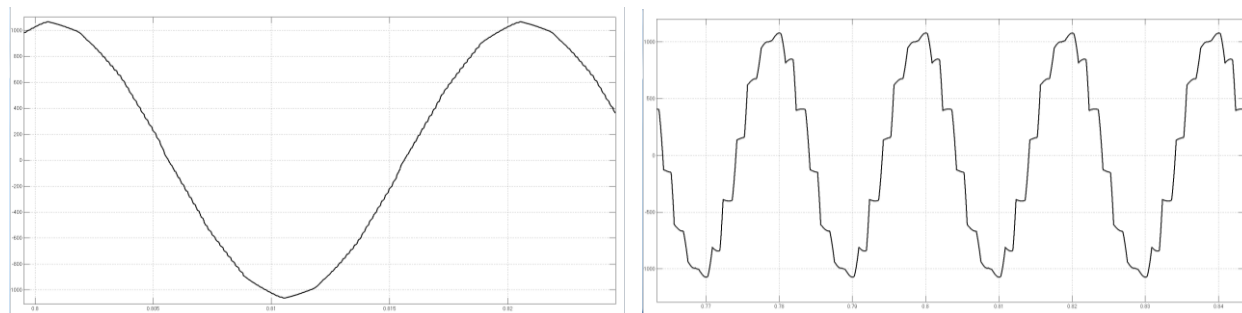


Рис. 10. График первичного тока трансформатора 32 МВА

**Выводы и направление дальнейших исследований.** В непрерывном прокате каждая последующая клетка работает со все более и более высокой скоростью. Результаты моделирования указывают на то, что можно в рамках ограничений технологических карт управлять углом управления в электроприводе каждой клетки с тем, чтобы улучшать гармонический состав напряжений и токов. К сожалению, глубокое регулирование скорости систем ТП-Д также приводит к заметному снижению коэффициента мощности. Поэтому в дальнейшем следует определиться, в пользу улучшения какого энергетического параметра (коэффициента гармоник или коэффициента мощности) следует отдать предпочтение, или же, определить наиболее экономичный режим работы системы приводов с учетом обоих этих ограничений. Все это, и учет технологических требований к распределению скорости, а значит

и углов управления отдельных приводов, требует более сложных алгоритмов управления фильтрами [8] сети в целом с нечеткой [9] логикой.

#### Список литературы

1. IEEE Standard 519-1992 Application in Industrial Power Distribution Networks with a New Monitoring Approach **João Pedro Trovão, Paulo Pereirinha, Humberto Jorge**, Proceeding of the 6th WSEAS International Conference on Power Systems, Lisbon, Portugal, September 22-24, 2006 244-249 pp.
2. **W. Mack Grady**, The University of Texas at Austin Robert J. Gilleskie, San Diego Gas & Electric Harmonics and how they relate to power factor. Proc. of the EPRI Power Quality Issues & Opportunities Conference (PQA'93), San Diego, CA, November 1993.
3. **Dugan R., Mcgranaghan M., Wayne H.**, 1999, Electrical Power Systems Quality, 265 pp., McGraw-Hill, NewYork, USA.
4. **Trovão J.P.**, Harmonic Distortion Monitoring and Analysis Integrated System a Systematic Approach for the Industrial Sector M.Sc Thesis, Faculty of Science and Technology of the University of Coimbra, Portugal, 2004.
5. Моделирование и оптимизация на ЭВМ радиоэлектронных устройств. Под ред. **З.М.Бененсона**. – М. Радио и связь, 1981, 272с.
6. **Ягуп В.Г.** Построение и использование макромоделей автономных тиристорных преобразователей. – Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт 1983, №4, с.78-83.
7. **Сокол Е.И., Бутова О.А., Шишкин М.А.**, НТУ «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина, Matlab-модель 12-ти пульсного параллельного КУВ с разделенным управлением. Системы управления и контроля преобразователями электроэнергии № 9 (128) сентябрь 2014, спец. выпуск, Том 2, Энергосбережение • Энергетика • Энергоаудит.
8. Расчет параметров универсального фильтра высших гармоник для систем с многопульсными выпрямителями. **И.В.Волков, Д.П.Каршенов, С.В.Подольный**, Техн. электродинамика. 2014. № 2, С.17-21
9. **Усков А.А.** Принципы построения систем управления с нечеткой логикой // Приборы и системы. Управление, Контроль, Диагностика. 2004. № 6. С. 7-13.

Рукопись поступила в редакцию 17.04.16

УДК 681.3

Ю.Г. ОСАДЧУК, канд. техн. наук, доц., І.А. КОЗАКЕВИЧ, ст. викладач,  
Р.А. ІЛЬЧЕНКО, студент, Криворізький національний університет

### ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АСИНХРОННИХ, СИНХРОННИХ МАШИН З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ ТА ВЕНТИЛЬНИХ РЕАКТИВНИХ ДВИГУНІВ ДЛЯ ГІБРИДНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Внаслідок підвищеної енергетичної ефективності та низького значення показника вартість/шлях, електричні та гібридні транспортні засоби привертають до себе все більшу увагу. Для задоволення вимог щодо електроприводу двигуни цих механізмів повинні задовольняти специфічні вимоги щодо продуктивності та ефективності. Це призводить до необхідності відпрацювання чітких критеріїв вибору електричних двигунів. У роботі виконано розробку критеріїв порівняння, що можуть бути використані при аналізі синхронних двигунів з постійними магнітами з розподіленими обмотками та зосередженими обмотками, асинхронних двигунів та вентильних реактивних двигунів для електричних та гібридних транспортних засобів. Для проектування конструкції асинхронного двигуна використовувався метод кінцевих елементів. Для урахування нелінійних параметрів машини та досягнення високого рівня ефективності двигунів, оптимальні траєкторії струму отримані для розширеної моделі синхронних двигунів з постійними магнітами та асинхронних. Додаткові критерії порівняння з урахуванням показників шуму та вібрацій також враховано при узагальненому аналізі.

**Ключові слова:** гібридні транспортні засоби, електромеханічна система, вентильний реактивний двигун, асинхронний двигун, синхронний двигун з постійними магнітами, коефіцієнт корисної дії, струм статора

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Інтенсивне впровадження електромеханічних тягових систем призводить до необхідності відпрацювання чітких критеріїв вибору електричних двигунів. В даний час, окрім широко використовуваних у гібридних транспортних засобах синхронних двигунів з постійними магнітами, все більше поширення отримують нові типи електричних машин, серед яких найбільш популярними є вентильні реактивні двигуни. Тому розробка та дослідження нових електромеханічних систем з асинхронними, синхронними та вентильними двигунами є актуальною й важливою науково-технічною задачею.

**Аналіз досліджень та публікацій.** У [1], [2] представлено карти ефективності асинхронного двигуна, вентильного реактивного двигуна та синхронного двигуна з постійними магнітами для електроприводів загальнопромислового призначення. У [3] автори проаналізували синхронний двигун з постійними магнітами другого покоління Prius-IPMSM у порівнянні з альтернативними типами асинхронних та синхронних машин з постійними магнітами. Проте, аналіз проводився за умови фіксованого кута фазного керування на усьому діапазоні зміни кутової швидкості та електромагнітного моменту, що може призводити до неоптимального оперативного керування. У [4] представлено порівняння синхронних двигунів з постійними магнітами та асинхронних двигунів з позиції вихідної потужності та ефективності в розрізі нового європейського приводного циклу (NEDC). Подібна робота пророблена авторами у [5]. У [6] автори після порівняння синхронних двигунів з постійними магнітами, асинхронних двигунів та вентильних реактивних двигунів стверджують, що вплив розподілу ефективності на енергоефективність системи є малим. Тим не менш в літературі дуже мало уваги приділяється поетапному всебічному порівнянню різних типів електродвигунів для електричних та гібридних транспортних засобів.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розробка критеріїв порівняння електричних машин, що використовуються у гібридних транспортних засобах, та проведення відповідного аналізу по відношенню до синхронних двигунів з постійними магнітами, асинхронних двигунів та вентильних реактивних.

**Викладення матеріалу та результати.** До недавнього часу синхронні двигуни з постійними магнітами домінували в якості тягових двигунів для електричних та гібридних транспортних засобів завдяки здатності працювати у широкому діапазоні зміни кутової швидкості та моменту з надзвичайно високою щільністю крутного моменту та потужності. Обмеженнями даного типу двигунів є вартість та доступність рідкоземельних матеріалів, що використовуються для виготовлення постійних магнітів. До інших типів часто використовуваних електричних двигунів відносяться асинхронні та вентильні реактивні двигуни. Асинхронні двигуни не містять постійних магнітів і характеризуються як надійні. Обмеженнями для даного типу двигунів може бути розробка системи охолодження, оскільки тепло виділяється як у статорі, так і у роторі. Вентильні реактивні двигуни не містять постійних магнітів і є надзвичайно надійними, що створює можливості для його використання в сурових умовах транспортних засобів. Тим не менш, високі акустичні шуми і низький коефіцієнт потужності відносять до основних проблем при його використанні. Крім того, приводи з вентильними реактивними двигунами вимагають наявності специфічного інвертора та підвищеної кількості силових кабелів для підключення кожної незалежної обмотки на статорі.

Для вирішення зазначених проблем є необхідною розробка та детальне порівняння різних типів двигунів. Тим не менш, є недоцільним побудова прототипів усіх типів машин та виконання порівняння експериментальним шляхом, тому для проведення аналізу використано пакет програм ANSYS для моделювання методом кінцевих елементів. Проектування тягових двигунів для електричних та гібридних транспортних засобів виконується виходячи з таких критеріїв, як профіль зміни кутової швидкості та електромагнітного моменту, вимог щодо пульсацій електромагнітного моменту, вихідної потужності інвертора, змін напруги ланки постійного струму, загальної ваги та вартості. Необхідні пікові та довготривалі показники електромагнітного моменту та кутової швидкості повинні бути визначені у відповідності до різних циклів керування транспортним засобом, таких як UDDS, US06 і т.д., механічних обмежень транспортного засобу, включаючи масу, момент інерції коліс, передаточний коефіцієнт та ККД. Для порівняння обрано чотири типові топології тягових двигунів, включаючи 8-полосний 48-пазний синхронний двигун з інкорпорованими постійними магнітами, синхронний двигун з 8 полюсами та 12 пазами, асинхронний двигун з 48 пазами та 36 стержнями ротора та 12/8 вентильний реактивний двигун. У даній роботі 48/8 синхронний двигун з інкорпорованими постійними магнітами, що використовується у другому поколінні Toyota Prius обрано в якості базового двигуна де механічна тягова характеристика представлена на рис.1.

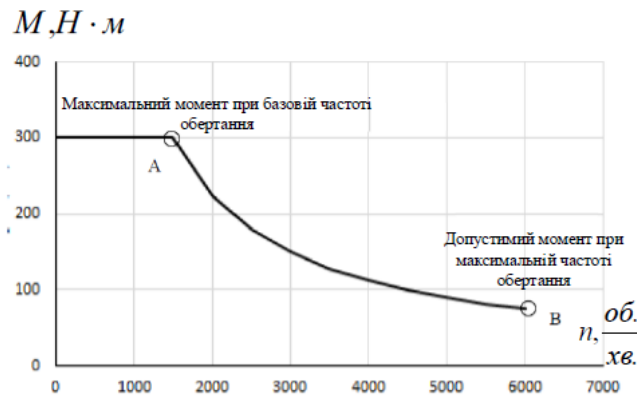


Рис.1. Цільова тягова механічна характеристика для порівняльного аналізу

Максимальний електромагнітний момент 300 Н·м на базовій швидкості 1500 об./хв. (точка А) визначає продуктивність транспортного засобу при запуску або при русі на пагорб, а допустимий електромагнітний момент, який складає 60 Н·м, на максимальній швидкості 6000 об./хв. (точка В) обмежує швидкість транспортного засобу на шосе. Інші три двигуна, що приймають участь у порівнянні, розраховані виходячи з вимог, що створюють розумні та справедливі умови щодо порівняння цих типів двигунів.

Для досягнення високої енергоефективності, використовуємо векторне керування для різних типів двигунів. Оскільки тягові двигуни для електричних транспортних засобів працюють в дуже нелінійних умовах, таких як насичення, наявність перехресних зв'язків, використання пошукових таблиць може бути оптимальним рішенням. Побудова пошукової таблиці для знаходження оптимальної траєкторії струму включає в себе декілька кроків: Подача струму в обмотки з метою визначення параметрів двигуна, особливо потокозчеплення. Базуючись на інформації щодо потокозчеплення, складається оптимальна робоча площа, як показано на рис. 2а. Ця площа обмежена колом, що відображає обмеження струму, кривою максимального співвідношення момент - струм та кривою максимального співвідношення момент - напруга. На графіку також показані ізокриви за моментом (чорні лінії) та напругою (сині криві). 3) Для кожної точки момент-кутова швидкість, оптимальні значення струмів  $i_d$  та  $i_q$  можуть бути визначені за допомогою методів екстраполяції та інтерполяції.

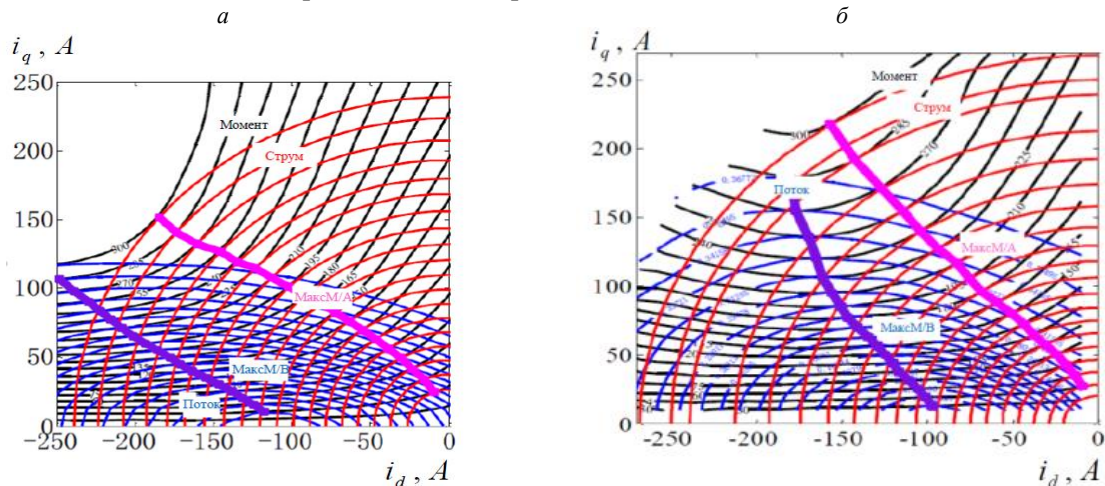


Рис.2. Криві вибору оптимального значення струму для синхронного двигуна 48/8 та 12/8

48/8 Prius синхронний двигун з постійними магнітами має декілька унікальних конструктивних особливостей: Статорні зубці є глибокими та широкими для усунення насичення та підвищення анізотропності. Постійні магніти розташовані в V-подібній формі для отримання максимального використання електромагнітного моменту та зменшення втрат холостого ходу. Двигун Prius має домінуючий порядок гармоніки вібрацій (яка є найбільшим спільним дільником між числом пазів та числом полюсів), що є досить високим, тому резонанс із низькочастотними статорними коливанням є усуненим.

Синхронний двигун 12/8 з постійними магнітами, що розглядається, має такий же зовнішній діаметр статора, як і двигун приводу Prius. Він має наступні особливості, що враховувалися при його виборі: Номінальною робочою точкою обрана (120 Н·м; 2500 об./хв.). Щільність потоку у зубцях статора та його ярмі розраховані так, щоб знаходитися нижче коліна кривої намагнічення В-Н. Це дозволяє уникнути насичення при роботі зі значними навантаженнями за моментом. Щільність струму зберігається на рівні 6 А/мм<sup>2</sup> для номінальної робочої точки. Додаткові постійні магніти використовуються для підвищення електромагнітного моменту, при цьому постійні магніти організовані у V-подібні форми для оптимальної мінімізації пульсацій електромагнітного моменту. Геометрія пазів статора оптимізована для зниження сумарних втрат шляхом балансування втрат у міді та сталі. Число витків котушки оптимізоване для забезпечення пікових значень електромагнітного моменту та кутової швидкості.

На рис. 2б представлено оптимальну робочу площину для синхронного двигуна 12/8 з постійними магнітами. Його характеристичний струм є вищим за 100 А та близьким до показника двигуна Prius, що складає 105 А. Для синхронного двигуна 12/8 лінія максимального співвідношення момент–струм зсувається в область  $i_q > i_d$ , як показано на рис. 2б, що означає домінування електромагнітного моменту. Рівняння електромагнітного моменту для синхронного двигуна з постійними магнітами може бути записано так

$$M = \frac{m}{2} p (\psi_d i_q + (L_d - L_q) i_d i_q), \quad (1)$$

де  $m$  - число фаз двигуна;  $p$  - число пар полюсів;  $\psi_d$  - потокозчеплення по вісі  $d$ , створюване постійними магнітами.

Перша частина даного рівняння представляє собою електромагнітний момент, а друга - реактивний момент або момент явнopolюсності. У випадку синхронних двигунів з дробною зосередженою обмоткою, як у випадку синхронного двигуна 12/8 з постійними магнітами, що має низьку явнopolюсність, це означає низьке значення співвідношення  $L_d/L_q$ , що означає можливість швидкого насичення при роботі з високими струмами. Отже, реактивний момент є досить низьким, а домінуючою складовою є електромагнітний момент.

Для асинхронного двигуна аналіз виконувався з використанням методу кінцевих елементів Проте, розрахунок процесів у двигуні з використанням даного методу є досить тривалим. Тому у роботі використано введення замість напруги до статорних обмоток величин статорних та роторних струмів до обмоток статора та мідних стержнів ротора окремо. У системі відліку, що пов'язана з роторним потокозчепленням, при використанні векторного керування існує тільки складова потокозчеплення по вісі  $d$ , в той час як складова по вісі  $q$  дорівнює нулю.

Швидке моделювання з використанням методу кінцевих елементів при введенні струмів складається з двох частин: 1) Вирішення магнітостатичної задачі з використанням методу кінцевих елементів. Струм до статорних обмоток та мідних роторних стержнів вводиться окремо. Струм по вісі  $q$  ітеративно коригується до тих пір, поки не буде задовольнятися умова векторного керування. Параметри машини, включаючи індуктивність статора  $L_s$ , індуктивність ротора  $L_r$ , взаємну індуктивність  $L_m$  можуть бути знайдені з використанням величин струму та потокозчеплення. Частота ковзання з урахуванням співвідношення складових статорних струмів ( $i_{sq}/i_{sd}$ ) та постійної часу ротора ( $L_r/R_r$ ) також може бути розрахована. Очевидно, що цінністю такого моделювання є урахування властивості насичення. 2) Моделювання перехідного процесу. Статор та ротор залишаються нерухомими. До статорних обмоток вводиться статорний струм з частотою  $f_e$ , а роторні струми з частотою  $f_e$  вводяться до мідних роторних стержнів. Зміна статорних, роторних та взаємних індуктивностей зі струмом може бути розрахована при вирішенні магнітостатичної задачі методом кінцевих елементів. Вимагається обчислення декількох ітерацій для вилучення параметрів асинхронного двигуна з використанням задачі магнітостатики. Тим не менш, цей метод швидкого моделювання з використанням методу кінцевих елементів дозволяє істотно заощадити час обчислень при знаходженні ККД асинхронного двигуна у всьому діапазоні зміни кутової швидкості та потокозчеплення. При максимальній кутовій частоті, що складає 6000 об./хв., індуктивний опір намагнічення  $X_m \gg R_s$ , а індуктивний опір статорної обмотки  $X_\infty \gg R_s$ , отже величиною статорного опору  $R_s$  можна знехтувати, тоді критичний момент асинхронного двигуна може бути визначено так



$$M_{кр} = \frac{3}{2} p \frac{U^2}{\omega(R + \sqrt{R^2 + (X + X_{\sigma})^2})} \approx \frac{3}{2} p \frac{U^2}{\omega^2(L_{\sigma} + L_{\pi})}, \quad (2)$$

де  $U$  - напруга живлення,  $L_{\sigma}$  - індуктивність розсіяння статора,  $L_{\pi}$  - індуктивність розсіяння ротора,  $p$  - число пар полюсів.

У відповідності з (2) при наближенні значення кутової швидкості до максимального, критичний момент буде обернено пропорційним до квадрату швидкості. Таким чином, для підвищення ефективності використання машини за електромагнітним моментом необхідно робити пази ротора більш широкими, але більшої кількості, що призводить до зменшення числа витків обмотки відповідно. Це призводить до зниження індуктивності розсіяння ротора та підвищення величини критичного моменту.

На рис. 3 представлено, криві оптимальних струмових траєкторій, що отримані за тією ж процедурою, що і для синхронного двигуна з постійними магнітами.

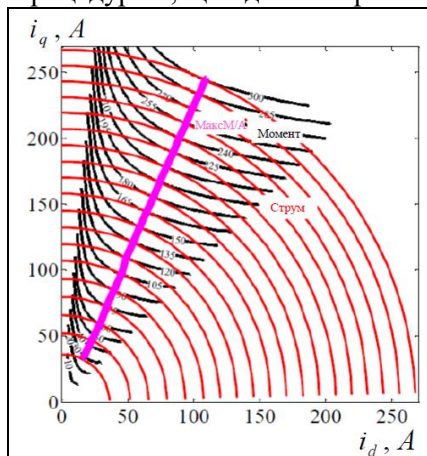


Рис. 3. Оптимальні режими роботи асинхронного двигуна

При розрахунках оптимальної конструкції вентильного реактивного двигуна необхідно враховувати наступні критерії: Номінальна робоча точка обрана на рівні 100 Н·м; 3000 об./хв.

Величина магнітного потоку статорних зубців та ярма обрана нижче точки згину кривої намагнічення В-Н.

Число витків котушки оптимізоване для задовільнення вимог щодо формування необхідної механічної характеристики, що повинна мати певний максимальний момент на основній швидкості (1500 об./хв.) та високий момент на максимальній швидкості (6000 об./хв.).

Кути відкриття та закриття ключів, а також амплітуда імпульсів струму, що живить двигун, можуть змінюватися для оптимізації енергоефективності двигуна у широкому діапазоні зміни кутової швидкості та електромагнітного моменту.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** У роботі виконано поетапне порівняння та оцінку чотирьох популярних типів електроприводів для застосування у тягових електромеханічних системах та гібридних транспортних засобах. Розглянуто топології на базі синхронного двигуна з постійними магнітами, асинхронними двигунами та вентильними реактивними.

В результаті проведеного дослідження були встановлені наступні суттєві висновки:

Синхронні двигуни з постійними магнітами мають ККД вище за 97%.

Синхронний двигун з 12 пазами та 8 полюсами має трохи більш високий ККД при низькій кутовій швидкості, але на швидкості вищій за 5000 об./хв. ця перевага втрачається, оскільки вихрові струми зростають у 50 разів, а втрати, що провокуються ними перевищують 1000 Вт.

Асинхронний двигун має найвищий ККД (близько 96%) на високій кутовій швидкості, проте він має найширший діапазон низької ефективності на низькій кутовій швидкості через втрати в міді.

Вентильний реактивний двигун має зосереджені обмотки з низьким опором, проте, як правило, необхідно створити більш високе значення струму для створення того ж моменту.

Синхронний двигун з постійними магнітами, що має зосереджену обмотку з низьким опором, проте вимагає більшої кількості матеріалу постійних магнітів для задоволення вимог відносно моменту.

Асинхронний двигун та вентильний реактивний двигун мають найнижчу щільність потужності, тобто 55 кВт/52 кг та 55 кВт/45 кг відповідно у порівнянні з показниками 55 кВт/32 кг для синхронного двигуна з постійними магнітами.

Геометрія статора, комбінація пазів та полюсів, а також спосіб керування впливають на показники вібрації та шуму. Вібрація є тим нижчою, чим більшим є час дискретності вхідних впливів.

Наприклад, за однієї й тієї ж топології вентильний реактивний двигун має набагато сильнішу вібрацію, ніж синхронний двигун з постійними магнітами, що працює в режимі переривчастого струму.



## Список літератури

1. **Зинченко Е.Е.** Сравнение характеристик вентильного реактивного двигателя при его питании от коммутаторов по схемам Миллера и асимметричного моста / **Е.Е. Зинченко, В.Б. Финкельштейн** // *Електротехніка і електро-механіка*. – 2012. – № 1. – С. 33-35.
2. **Нестеренко В.И.** Экспериментальное определение динамических параметров тягового привода транспортного средства // *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. – 2005. – Вип. 8. – С. 86-87.
3. **Дембіцький В.М.** Дослідження приводу гальмівної системи транспортного засобу з гібридною силовою установкою та рекуперацією енергії / **В.М. Дембіцький** // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Сер.: Автомобіле- та тракторобудування. – 2013. – № 29. – С. 28-33.
4. **Сітовський О.П.** Обґрунтування та вибір критеріїв оцінки процесу електродинамічного гальмування під час руху гібридного транспортного засобу на затяжних спусках / **О.П. Сітовський, В.М. Дембіцький** // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Сер.: Автомобіле- та тракторобудування. – 2013. – № 30. – С. 10-15.
5. **Тімков О.М.** Поява гібридних силових установок на транспортних засобах / **О.М. Тімков, О.В. Григорашенко** // *Вісник Донецької академії автомо-більного транспорту*. – 2014. – № 1. – С. 42-47.
6. **Сітовський О.П.** Електродинамічне гальмування гібридного транспортного засобу на дорогах з низьким коефіцієнтом зчеплення / **О.П. Сітовський, В. М. Дембіцький** // *Автомобильний транспорт*. – 2013. – Вип. 33. – С. 13-18.
7. **Zeraouia M., Benbouzid M., Diallo D.** Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: a comparative study // *IEEE Transaction on ve-hicle technologies*. – Vol. 55, no. 6. – pp. 1756-1764.

Рукопис подано до редакції 18.04.16

УДК 681.3

І.А. КОЗАКЕВИЧ, ст. викладач, Криворізький національний університет

## СИСТЕМА РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ ВЕНТИЛЬНИМ ДВИГУНОМ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

Вдосконалення електромеханічних систем транспортних засобів в даний момент направлено на підвищення рівня їх енергоефективності. Синтез раціональних способів реалізації рекуперативного гальмування є одним з актуальних шляхів збільшення автономності електромобілів через те, що дозволяє суттєво зменшити рівень споживаної електроенергії за цикл руху. Безщіткова машина, в основі якої є синхронний двигун, відноситься до найбільш популярних типів двигунів, що використовуються в електроприводах транспортних засобів. Векторний простір системи керування ділиться на шість секторів, кожен з яких відповідає одному з шести станів сигналу датчика Холла. У той же час, безщіткова машина постійного струму при роботі на низькій кутовій частоті не створює достатню величину протиЕРС обмоток для заряду акумулятора, тобто в такому режимі відсутні умови для відновлення його заряду. Через наявність індуктивності обмоток в двигуні існують можливості для створення підвищуючого ланцюга. Для відновлення заряду акумулятора в такому режимі необхідно підняти напругу ланки постійного струму за допомогою індуктивності акумулятора. З цією метою необхідно закрити всі силові ключі, які підключені до позитивної шини ланки постійного струму, а управління ключами, підключеними до негативної шини, здійснювати за допомогою широтно - імпульсної модуляції. У роботі виконано вирішення наукової задачі, що пов'язана з розробкою системи керування рекуперативним гальмуванням електричного транспортного засобу на базі безщіткової машини постійного струму. Розроблена система керування містить блоки розділення гальмівного моменту, що виходить з позицій безпеки руху, енергоефективності та балансування координат електромобіля. За рахунок застосування нечіткого керування та ПД-регулятора система виконує розділення зусилля механічного гальмування та електричного рекуперативного. Використання ПД-регулятора є досить поширеним методом у теорії автоматичного керування, проте воно не враховує такі параметри, як заряд батареї, швидкість, інтенсивність гальмування і т.д. У розробленій системі використовується нечітке керування з трьома входними параметрами: швидкість, заряд батареї та інтенсивність гальмування.

**Ключові слова:** рекуперативне гальмування, безщіткова машина, система керування, генераторний режим, коефіцієнт модуляції, синхронний двигун, пошук екстремуму

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Розвиток електромеханічних систем транспортних засобів багато в чому направлений на підвищення рівня їх енергоефективності. Пошук раціональних способів реалізації рекуперативного гальмування є одним з актуальних шляхів збільшення автономності електромобілів, оскільки дозволяє суттєво зменшити частку споживаної електроенергії протягом циклу руху. Одним з найбільш популярних типів двигунів, що використовується в електроприводах транспортних засобів, є безщіткова машина постійного струму на базі синхронної машини з постійними магнітами. Отже, розробка

заходів ефективної реалізації рекуперативного гальмування вентиляним двигуном є актуальною задачею сьогодення.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розробка методів реалізації рекуперативного гальмування безщіткової машини постійного струму в широкому діапазоні швидкостей та навантажень.

**Викладення матеріалу та результати.** В останні роки електричні транспортні засоби отримали гідне визнання в якості альтернативи системам з традиційним двигуном внутрішнього згоряння. Це пояснюється екологічними та економічними причинами, а в умовах серйозного прогресу технологій, пов'язаних з виготовленням акумуляторних батарей, електричний транспорт, що перевершує по багатьом істотним характеристикам паливний, готується до прориву в області пересувних засобів. Рекуперативне гальмування, що використовується в електричному транспорті як спосіб повернення кінетичної енергії при уповільненні, неможливий для реалізації засобами системи з двигуном внутрішнього згоряння. Суть рекуперативного гальмування полягає в передачі енергії, запасеної в інерційній масі автомобіля, назад в батарею за рахунок переведення двигуна в генераторний режим. У даному режимі двигун є джерелом енергії, а батарея - навантаженням, тим самим створюється гальмівний момент електромобіля.

Проведені раніше дослідження доводять, що використання рекуперативного гальмування дозволяє збільшити шлях, що долається автомобілем від одного заряду акумулятора, до 15 %. Тим не менш, даний тип гальмування не може бути використаний в деяких режимах, наприклад, коли батарея повністю заряджена. У цьому випадку воно може здійснюватися розсіюванням енергії на резисторах. Отже, необхідність установки механічного гальма зберігається в приводах електротранспорту. Його наявність також важлива з міркувань безпеки.

Як правило, керування рекуперативним і механічним гальмуванням здійснюється однією педаллю: перша частина шляху педалі керує рекуперативним гальмуванням, а друга частина – механічним. Це дозволяє реалізувати плавний перехід від рекуперативного гальмування до механічного, що не може бути досягнуто при використанні двигуна внутрішнього згоряння.

Безщіткова машина постійного струму, що отримала в літературі назву вентиляного двигуна, ідеально підходить для електромобілів, завдяки високій щільності потужності, задовільним механічним характеристикам, високому ККД, широкому діапазону зміни кутової швидкості, низьким експлуатаційним витратам.

Основою безщіткової машини постійного струму є синхронний двигун, що означає рівність частоти обертання ротора і частоти обертання поля, створюваного статором і ротором. У той же час, вентиляний двигун відносно складний в плані керування. Як правило, на роторі такої машини розташовуються постійні магніти, а якірні обмотки - на статорі, який містить пакований сталевий сердечник. Обертання створюється і підтримується за рахунок підключення до джерела енергії протилежних полюсів обмотки, званих фазами. Інформація про поточний стан ротора необхідна для правильної комутації обмоток машини і може бути отримана за допомогою датчиків Холла або вимірюванням ЕРС обмоток. Керування безщітковою машиною постійного струму здійснюється за допомогою комутатора, в ролі якого виступає інвертор, а перемикання обмоток виконується шляхом чергування порядку включення його плечей.

Для ефективного керування вентиляним двигуном необхідно знати інформацію відносно положення ротора, виходячи з якої визначається послідовність комутації обмоток. Векторний простір системи керування ділиться на шість секторів, кожен з яких відповідає одному з шести станів сигналу датчика Холла. Виходячи з силової схеми приводу, кожна з фаз двигуна може бути підключена до високого або низького потенціалу ланки постійного струму. В той же час в кожній фазі машини генерується протиЕРС.

Рекуперативне гальмування може бути здійснено шляхом реверсування струму в ланцюзі двигун - батарея під час уповільнення, коли двигун переходить в генераторний режим. За рахунок зміни напрямку струму відбувається заряд акумулятора, а робота системи керування залишається такою ж.

У той же час, безщіткова машина постійного струму при роботі на низькій кутовій частоті не створює достатню величину протиЕРС обмоток для заряду акумулятора, тобто в такому режимі відсутні умови для відновлення його заряду. Через наявність індуктивності обмоток в двигуні існують можливості для створення підвищуючого ланцюга. Для відновлення заряду акумулятора в такому режимі необхідно підняти напругу ланки постійного струму за допомо-

гою індуктивності схеми. З цією метою необхідно закрити всі силові ключі, які підключені до позитивної шини ланки постійного струму, а управління ключами, підключеними до негативної шини, здійснювати за допомогою широтно - імпульсної модуляції. На рис. 1 представлено фазові залежності протиЕРС, якірного струму безщіткової машини постійного струму, а також сигналів перемикання двонаправленого перетворювача енергії, в якому здійснюється керування тільки одним силовим ключем на кожному періоді комутації. Шляхом керування силовим ключем увесь перетворювач грає роль підвищуючого ланцюга.

із

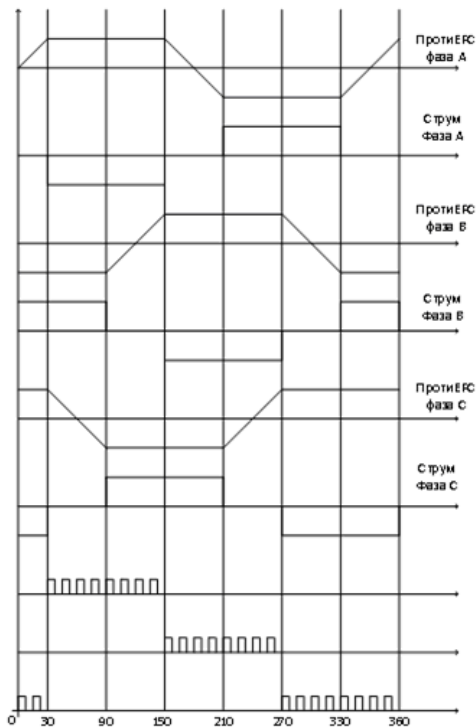


Рис. 1. Криві струмів та протиЕРС при рекуперативному гальмуванні застосуванням керування одним ключем

рішній опір якоря

Виходячи з принципу вольточасового балансу, можна зробити висновок, що чиста зміна величини напруги на індуктивності дорівнює нулю на одному електричному періоді, тобто

$$\int_t^{t+T_k} v_l dt = m T_k (2U_{epc} - 2Ri_a) + m T_k (2U_{epc} - 2Ri_a - U_{nocm}) = 0 \quad (1)$$

$$i_a = \frac{2U_{epc}}{m^2 R_b + 2R} \quad (2)$$

де  $T_k$  - період комутації,  $U_{epc}$  - протиЕРС,  $i_a$  - струм якоря.

Виходячи з умов балансу заряду ємності ланки постійного струму, можна записати

$$\int_t^{t+T_k} i_{nocm} dt = m T_k \left( -\frac{U_{nocm}}{R_b} \right) + m T_k \left( i_a - \frac{U_{nocm}}{R_b} \right) = 0,$$

де  $m$  - відносна тривалість включення активного стану ключів,  $m + m' = 1$ . Підставляючи (2) в (3), отримуємо залежність зарядної напруги  $U_{nocm}$  через відносну тривалість включення  $m$ , еквівалентний опір навантаження  $R_b$  і внут-

$$k(m') = \frac{U_{nocm}}{U_{epc}} = \frac{2}{m' + \frac{2R}{R_b m'}} \quad (4)$$

Для знаходження максимального значення зарядної напруги в залежності від величини відносної тривалості включення необхідно продиференціювати (4) по  $m'$

$$\frac{dk}{dm'} = \frac{2 \left( \frac{2R}{R_b} - m'^2 \right)}{\left( m'^2 + \frac{2R}{R_b} \right)^2} \quad (5)$$

Прирівнюючи похідну до нуля, знайдемо значення відносної тривалості включення  $m'$  при якому спостерігається максимальне значення зарядної напруги:

$$k_{\max}(m') = k_{\max} \left( \sqrt{\frac{2R}{R_b}} \right) = \frac{1}{\sqrt{\frac{2R}{R_b}}} = \frac{\sqrt{R_b}}{\sqrt{2R}} \quad (6)$$

Співвідношення  $\frac{2R}{R_b}$  може змінюватися від 0 до 1. Слід зауважити, що максимальний кое-

фіцієнт передачі менше 1 для випадку, коли  $\frac{2R}{R_b} > 0.5$ . Іншими словами, в такій ситуації вихід-

на напруга генератора, що перетворилася в інверторі, буде менше величини ЕРС джерела, тобто енергія динамічного гальмування електромобіля буде перетворена в гальмівний момент і теплову енергію замість повернення в батарею.

Для дослідження режимів роботи електромобіля була складена математична модель в середовищі Matlab/Simulink. Управління здійснюється впливом на сигнал завдання електромагнітного моменту, який передається через компоненти трансмісії системи та здійснює рух транспортного засобу. Моделі окремих компонентів системного рівня були складені за допомогою емпіричних даних, які засновані на технічній документації, що надається виробниками компонентів або розрахунками, заснованих на основі паспортних даних, отриманих з літературних джерел.

Досліджено роботу системи рекуперативного гальмування вентильним двигуном. Блок датчика системи керування здійснює формування необхідного крутного моменту або заданого значення гальмівного моменту шляхом впливу на педаль прискорення або педаль гальма відповідно. Якщо водій бажає прискорити рух транспортного засобу, він впливає на педаль прискорення, а в залежності від рівня впливу на цю педаль формується відповідний сигнал крутного моменту. Рекуперативне гальмування починається тільки при натисканні на педаль гальма, а інтенсивність гальмування залежить від ступеня натискання педалі, яка пропорційна величині створюваного гальмівного моменту. Після того, як сигнал завдання гальмівного моменту сформований він відповідно до налаштування алгоритму гальмування поділяється на рекуперативне гальмування і механічне. Сумарна механічна енергія, споживана транспортним засобом під час руху, складається з трьох складових: аеродинамічних втрат на тертя, втрат на тертя кочення, а також енергії, що розсіюється на гальмах. Рівняння, що описує динаміку транспортного засобу, може бути записано так

$$m \frac{dv(t)}{dt} = F_{\text{тяг}}(t) - F_{\text{аер}}(t) + F_{\text{кач}}(t) - F_{\text{зр}}(t), \quad (7)$$

де  $m$  – маса транспортного засобу,  $v$  – швидкість транспортного засобу,  $F_{\text{аер}}$  – аеродинамічний опір,  $F_{\text{кач}}$  – опір тертя кочення, а  $F_{\text{зр}}$  – сила тяжіння, яка створює опір руху при горизонтальних ділянках дороги.

Тягове зусилля  $F_{\text{тяг}}$  створюється приводом автомобіля і враховує енергію, затрачену на прискорення обертових частин внутрішніх елементів, а також втрати енергії на трансмісії.

Аеродинамічні втрати на тертя. Як правило, дані втрати  $F_{\text{аер}}$  апроксимуються шляхом спрощення корпусу автомобіля у вигляді призматичного корпусу з площею передньої поверхні  $A_f$ . Сила, створювана тиском гальмування, множиться на коефіцієнт аеродинамічного опору  $C_d$  для моделювання реальних умов повітряного потоку.

$$F_{\text{аер}}(v) = \frac{1}{2} \rho_a A_f C_d v^2, \quad (8)$$

де  $v$  – швидкість руху автомобіля;  $\rho_a$  – щільність навколишнього повітря.

За допомогою датчика натискання педалі система отримує від водія про необхідне гальмівне зусилля. У відповідності до системи керування на базі нечіткої логіки ми отримуємо величину зусилля рекуперативного гальмування. Гальмівне зусилля рекуперативного гальмування перераховується в гальмівний струм за допомогою залежності

$$I_{\text{гал}} = k_1 F_{\text{рек}}, \quad (9)$$

тобто гальмівний струм  $I_{\text{гал}}$  пропорційний зусиллю рекуперативного гальмування  $F_{\text{рек}}$ , а  $k_1$  є коефіцієнтом пропорційності.

Розглянемо роботу блоку розподілу гальмівного зусилля. У системах рекуперативного гальмування електричного транспорту основне гальмівне зусилля розділяється між колісним гальмівним зусиллям  $F_{nep}$  і гальмівним зусиллям задніх коліс  $F_{зад}$ . Для передньої осі електромобіля гальмівне зусилля передньої осі розділяється на дві складові: гальмівне зусилля механічного гальма і гальмівні зусилля рекуперативного гальмування.

Отже, сумарне гальмівне зусилля  $\sum F$  розподіляється між передніми і задніми колесами, враховуючи наявність механічного гальма задніх коліс, розподіл зусилля рекуперативного гальмування і з урахуванням координації. Розподіл гальмівного зусилля між передніми і задніми колесами електромобіля в ідеальному випадку виконується так

$$F_{зад} = \frac{1}{2} \left( \frac{mg}{h} \sqrt{b^2 + \frac{4hL}{mg} F_{nep}} - \left( \frac{mgb}{h} + 2F_{nep} \right) \right), \quad (10)$$

де  $g$  - відстань від центру ваги до задньої вісі по центральній дистанції,  $h$  - висота центру ваги електромобіля,  $L$  - відстань між передньою та задньою віссю автомобіля,  $m$  - маса електричного транспорту.

Стратегія розподілу гальмівного зусилля передніх та задніх коліс електромобіля виглядає наступним чином: при  $z < 0.1$ , сумарне гальмівне зусилля прикладається до приводного колеса, а переднє колесо не бере участі у гальмуванні транспортного засобу. При  $0.1 < z < 0.7$  гальмівне зусилля створюється електромеханічним гальмом. У відповідності з (10), можна визначити моменти, коли передні та задні колеса електромобіля заблоковані

Розглянемо роботу підсистеми нечіткого гальмування. Розподіл гальмівних зусиль в автомобілі поряд з рекуперативним гальмуванням залежить від багатьох факторів, значна частина параметрів постійно змінюється, тому розробити чітку модель розподілу досить важко. Застосування системи нечіткого керування розподілом гальмівного зусилля електромобіля може врахувати вплив усіх цих факторів. Отже, для розподілу гальмівного зусилля використовується теорія нечіткого керування.

Система нечіткого керування розподілом гальмівного зусилля представлена на рис. 8, в ній використовується три води: гальмівне зусилля передніх коліс електромобіля, швидкість та заряд батареї. У системі нечіткого керування вхідні змінні включають гальмівне зусилля передніх коліс, заряд батареї та швидкість електромобіля. Вихідними змінними є співвідношення, що пропорційне зусиллю рекуперативного гальмування, враховуючи зусилля гальмування передніх коліс. Гальмівна сила передніх коліс повинна враховувати вимоги, що висуваються до безпечного водіння. Величина гальмівної сили визначає гальмівний шлях та час, що вимагається водієм. У системі вважається, що зміна швидкості може бути низькою, середньою і високою.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** У роботі виконано вирішення наукової задачі, що пов'язана з розробкою системи керування рекуперативним гальмуванням електричного транспортного засобу на базі безщіткової машини постійного струму. Розроблена система керування містить блоки розділення гальмівного моменту, що виходить з позицій безпеки руху, енергоефективності та балансування координат електромобіля. За рахунок застосування нечіткого керування та ПІД-регулятора система виконує розділення зусилля механічного гальмування та електричного рекуперативного. Керування за допомогою ПІД-регулятора є досить поширеним методом у теорії автоматичного керування, проте воно не здатне створити необхідні умови по урахуванню таких параметрів, як заряд батареї, швидкість, інтенсивність гальмування і т.д. У розробленій системі використовується нечітке керування з трьома вхідними параметрами: швидкість, заряд батареї та інтенсивність гальмування.

В результаті проведеного дослідження були встановлені наступні суттєві висновки:

1. Розроблена система керування, що базується на нечіткому керуванні розділенням гальмівного зусилля, здатна розраховувати необхідне значення гальмівного струму для створення необхідного моменту.

2. Розроблена система з ПІД-регулятором широтно-імпульсної модуляції інвертора безщіткової машини постійного струму для отримання величини гальмівного моменту, відповідній заданій.

3. В результаті проведеного математичного моделювання доведено, що ПД-керування для реалізації поставленої задачі демонструє більш високу швидкодію, ніж нечітке керування.

4. Система керування рекуперативним гальмуванням, що розроблена у роботі, здатна значно покращити енергоефективність приводу та забезпечити безпечне гальмування в усіх режимах роботи, що є важливим результатом для функціонування подібних систем.

#### Список літератури

1. **Смотров Е.А.** Оптимизация процесса торможения в электроприводах малых электротранспортных средств // **Е.А. Смотров, Д.В. Вершинин, В.Г. Герасимьяк** // Электротехнические и компьютерные системы. – К.: Техника, 2012. -- №05(81). – С. 5-11.
2. **Бурков А.Т.** Сберегающие технологии тягового электроснабжения с рекуперацией энергии торможения поездов [Текст]: тез. док. / **А.Т. Бурков, В.М. Варенцов, А.Н. Марикин** и др. // II Евроазиатская конференция по транспорту. – С-Пб.: ЦНИИТ СЭТ, 2000. – С. 93.
3. **Черемисин В.Т.** Влияние рекуперативного торможения на систему тягового электроснабжения / **В.Т. Черемисин, В.Л. Незевак, А.С. Вильгельм, В.А. Кващук** // Локомотив. – 2013. -- №8. – С. 5-9.
4. **X. Nian** Regenerative braking system of electric vehicle driven by brushless DC motor / **X. Nian, F. Peng, H. Zhang** // IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 61, no. 10, 2014. – pp. 5798-5808.
5. **F. Wang** A series regenerative braking control strategy based on hybrid-power / **F. Wang, X. Yin, H. Luo, Y. Huang** // International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring, 2012. – pp. 65-69.
6. **Висин Н.Г.** Функциональная схема системы автоматического управления рекуперативным торможением для электропоездов постоянного тока со статическими преобразователями / **Н.Г. Висин, Б.Т. Власенко, А.И. Кийко** // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2003. – Вип. 1. – С. 36-40.
7. **Смотров Е.А.** Оптимизация процесса рекуперативного торможения в электроприводах малых электротранспортных средств / **Е.А. Смотров, Д.А. Вершинин, В.Г. Герасимьяк** // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2012. – №7. – С. 18-21.

Рукопис подано до редакції 18.04.16

УДК 681.3

І.А. КОЗАКЕВИЧ, ст. викладач, Криворізький національний університет

### СИСТЕМА КЕРУВАННЯ СИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ФІЛЬТРУ КАЛМАНА

Синхронні двигуни з постійними магнітами широко використовуються у електромеханічних системах з високими вимогами щодо якості керування завдяки високому коефіцієнту потужності, високим показникам керування кутовою швидкістю і т.д. Для сервосистем з синхронними двигунами з постійними магнітами необхідні сигнали зворотного зв'язку за положенням ротора та кутовою швидкістю. Традиційні підходи до вирішення цього завдання передбачають використання оптичного інкрементального, абсолютного або комбінованого енкодера. Проте, використання енкодерів в якості датчиків швидкості має свої особливості, що пов'язані з роботою на низьких кутових швидкостях, оскільки в даному режимі існуючі методи не дають достатньої точності. Тому питання покращення властивостей сервоприводів з синхронними двигунами з постійними магнітами є актуальною й важливою науково-технічною задачею. Здійснено теоретичне узагальнення й розв'язання актуальної науково-технічної задачі підвищення точності керування синхронними машинами з постійними магнітами при наявності абсолютного чи інкрементального енкодера. Суть виконаних досліджень полягає в впровадженні у систему керування самоадаптивного спостерігача Калмана, що дозволяє суттєво покращити показники якості керування. Застосування адаптивного спостерігача Калмана на відміну від існуючих способів виміру кутової швидкості здатний оцінювати одночасно положення ротора та швидкість з високою точністю та без часової затримки. Керування синхронним двигуном на базі системи з адаптивним спостерігачем Калмана дозволяє суттєво підвищити показники якості керування, зменшити пульсації кутової швидкості, а також коливання струму  $i_d$  при пуску двигуна. Шляхом математичного моделювання доведено, що застосування спостерігача Калмана для таких систем дозволяє підвищити швидкодію системи.

**Ключові слова:** фільтр Калмана, синхронний двигун, спостерігач стану, абсолютний енкодер, кутова швидкість, положення ротора

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Синхронні двигуни з постійними магнітами широко використовуються у електромеханічних системах з високими вимогами щодо якості керування завдяки високому коефіцієнту потужності та показникам якості керування кутовою швидкістю і т.д. Для сервосистем з даними типами двигунів необхідні

сигнали зворотного зв'язку за положенням ротора та кутовою швидкістю. Традиційні підходи до вирішення цього завдання передбачають використання оптичного інкрементального енкадера, абсолютного енкадера або комбінованого. Для реалізації векторного керування системою приводу з синхронним двигуном з постійними магнітами, необхідно виконувати перетворення координат з трифазної системи до системи координат, що обертається.

Для здійснення такого перетворення необхідно використання абсолютного положення ротора, особливо при пуску двигуна. Таким чином, гарним рішенням є обладнання двигуна абсолютним енкадером, що здатний працювати з необхідною точністю та є зручним та надійним шляхом виміру поточного положення ротора. Крім того, абсолютний енкадер не тільки має очевидні переваги, що полягають в захищеності від впливу перешкод, зручності монтажу, але й здатний видавати двійковий код абсолютного положення ротора, що робить його використання придатним для високоточних електромеханічних систем.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Останнім часом дослідження, що стосуються методів вимірювання швидкості та засобів підвищення її точності в основному стосуються інкрементальних енкадерів [1], а дослідження, що стосуються абсолютних енкадерів в основному сфокусовані на питаннях проектування та аспектах аналізу конструкцій [2]. У зв'язку з наявністю шуму квантування, неідеальністю виробництва оптичних датчиків та з інших причин положення ротора, що вимірюється за допомогою оптичного енкадера, має вимірювальний шум, що викликає певні помилки в обчисленні швидкості за допомогою сигналу положення ротора. Крім того, традиційні методи вимірювання кутової швидкості, що базуються на підрахунку кількості імпульсів за період часу, періоду одного імпульсу або комбінації названих підходів, створюють умови для розрахунку середньої швидкості на основі сигналу положення та призводять до підвищення часової затримки й помилки визначення кутової швидкості, що називається шумом сигналу. Шум кутової швидкості впливає в певній мірі як на статичні, так і на динамічні показники, стійкість сервосистеми з синхронним двигуном з постійними магнітами. Хоча фільтри низької частоти, як правило, використовуються для обмеження шуму кутової швидкості, проте таке рішення не здатне зменшити час затримки під час роботи системи.

Високоточний енкадер здатний підвищити точність методів вимірювання швидкості, проте його вартість є досить високою. Для усунення недоліків традиційних методів вимірювання кутової швидкості дослідниками запропонована низка методів оцінки кутової швидкості шляхом використання нелінійних спостерігачів [4], спостерігачів з використанням ковзних режимів [5]. Серед них заслуговує на увагу підхід, що описано у [6], де автори доводять, що чисельне інтегрування може забезпечити більш стійкий та точний результат, ніж чисельне диференціювання в умовах наявності шумів. Крім того, пропонується структура розширеного диференціатора для поліпшення якості оцінювання кутової швидкості в низькочастотному діапазоні. У [7] автори пропонують систему на основі нейронних мереж з використанням адаптивного спостерігача повного порядку Люенбергера для бездатчикового лінійного асинхронного двигуна, лінійна швидкість якого оцінюється нейронною структурою TLS EXIN. Представлена структура адаптивного взаємопов'язаного спостерігача для бездатчикового керування синхронною машиною, що використовується для оцінювання кутової швидкості, положення ротора та моменту навантаження. Оскільки швидкість не розраховується у кожному періоді вибірки, коли двигун працює на низькій кутовій швидкості, з метою забезпечення оновлення її значення на кожному періоді вибірки використовується спостерігач, що дозволяє виконувати ідентифікацію у кожному періоді дискретності та коригувати помилку оцінювання при оновленні положення. Також представлено спостерігачі повного порядку та пониженого порядку, що потребують точної математичної моделі двигуна для оцінювання кутової швидкості, запропоновано робастний цифровий диференціатор, що забезпечує визначення першої похідної сигналу датчика положення для оцінки кутової швидкості. Оскільки алгоритм фільтру Калмана є оптимальним методом оцінювання в плані мінімізації відхилень, то він може використовувати рекурсивний метод для безпосередньої обробки випадкових шумів та має низьку залежність від точності параметрів моделі. Отже, спостерігачі на базі фільтру Калмана широко використовуються для оцінювання кутової швидкості електромеханічних систем.

**Постановка завдання.** Оскільки сигнал помилки оптичного енкадера можна розглядати як білий гауссовський шум, оптимальне оцінювання кутової швидкості та моменту навантаження можна отримати за допомогою фільтру Калмана з послідовних сигналів положення, що містять

шум. Метою роботи є розробка запропонованого самоадаптивного спостерігача Калмана для підвищення точності сервоприводу на базі синхронного двигуна з постійними магнітами шляхом визначення положення ротора, кутової швидкості та моменту навантаження. Аналізуючи помилку квантування абсолютного енкодера, у системі розраховується вимірювальний шум системи на основі зміни положення ротора для відображення реального процесу. Спостерігач миттєвої швидкості та спостерігач Калмана використовуються разом для зменшення впливу шумів вимірювання на сигнал оцінки кутової швидкості при невідповідності часу дискретності періоду оновлення сигналу положення. Величини, що отримані в результаті оцінювання, в подальшому використовують в якості сигналів зворотного зв'язку за швидкістю та компенсаційного сигналу моменту навантаження при керуванні за збуренням, підвищуючи стійкість системи як при зміні керуючих сигналів, так і при зміні сигналів збурення.

**Викладення матеріалу та результати.** Кодований диск  $n$ -розрядного абсолютного енкодера містить  $n$  кіл, що представляють собою рівномірно розподілені канавки, які є провідними або непровідними для світла. Значення кодових каналів сформовані у відповідності з певними правилами, що дозволяє поставити у відповідність кожному кутовому положенню тільки один двійковий код, що асоціюється з ним, тому діапазон зміни кодів складає  $0 - (2^n - 1)$ . Тоді роздільна здатність  $n$ -розрядного енкодера складає  $1/2^n$ . Це свідчить про те, що довжина окружності, яка складає  $2\pi$  рад розкладається в набір сигналів положення з кроком дискретності, що дорівнює  $2\pi/2^n$  рад.

З аналізу форми сигналів абсолютного енкодера можна зробити висновок, що він змінюється при зміні величини положення ротора на значення, що є рівним величині помилки квантування, тобто  $\Delta = 2\pi/2^n$  рад; проте, нове положення зчитується цифровим сигнальним процесором тільки тоді, коли настає наступний період дискретності, що створює помилку вимірювання між фактичним значенням положення та тим, що зчитується за допомогою цифрового сигнального процесора. Максимальна помилка вимірювання спостерігається тоді, коли зміна періоду дискретності відбувається якраз перед визначенням нового положення і вона дорівнює помилці дискретизації  $\Delta = 2\pi/2^n$  рад, в той час як мінімальне значення спостерігається тоді, коли зміна періоду дискретності збігається з моментом зміни сигналу абсолютного енкодера, і її значення дорівнює нулю.

При роботі двигуна на низькій кутовій швидкості, положення ротора змінюється повільно, тому проміжок часу між двома послідовними оновленнями положення, що визначено за допомогою абсолютного енкодера  $T_{\text{дискр}}$  стає більшим за час дискретності  $T_s$ , який є постійним за величиною. У цьому випадку часовий інтервал між двома послідовними оновленнями сигналу положення, визначеного за допомогою цифрового сигнального процесора  $T_1$  є більшим за  $T_s$ . При роботі двигуна з високою кутовою швидкістю положення ротора змінюється досить швидко,  $T_{\text{дискр}} < T_s$ , а  $T_1 = T_s$ .

Сигнал швидкості обчислюється шляхом диференціювання положення ротора, що зчитується за допомогою цифрового сигнального процесора. Крім того, традиційні методи вимірювання швидкості, такі як метод Ейлера, метод змінного періоду, метод перекриття періодів розраховують швидкість з використанням прямої апроксимації диференціювання замість безпосереднього алгоритму диференціювання.

Метод Ейлера базується на алгоритмі знаходження середньої швидкості з використанням зміни положення та моменту часу, що відповідає періоду вимірювання, що є рівним до  $T_1$ , а рівняння розрахунку має наступний вигляд

$$\omega(m) = \frac{\theta(m) - \theta(m-1)}{T_m}, \quad (1)$$

де  $T_m$  – інтервал часу між  $(m-1)$ -ю та  $m$ -ю змінами положення ротора,  $T_m = T_1$ . Похибка визначення кутової швидкості  $e_{EM}(m)$  може бути оцінена так

$$e_{EM}(m) = \frac{\Delta\theta(m) - \Delta\theta(m-1)}{T_m}. \quad (2)$$



Оскільки похибка вимірювання є випадковою величиною, яка не має жодного відношення до  $T_s$ , цей процес можна розглядати як рівномірний розподіл ймовірностей в межах від 0 до  $\Delta$ , його щільність розподілу обернено пропорційна часовому вікну. З метою порівняння похибки різних методів вимірювання швидкості інтервал часу між двома послідовними оновленнями положення за допомогою цифрового сигнального процесора  $T_1$  приймається постійною величиною. Діапазон зміни, математичне очікування та щільність розподілу  $e_{EM}(m)$  можна записати

$$\begin{aligned} e_{EM}(m) &\in \left( -\frac{\Delta}{T_1}; \frac{\Delta}{T_1} \right); \\ E(e_{EM}) &= 0; \\ f(e_{EM}) &= \frac{T_1}{2\Delta}. \end{aligned} \quad (3)$$

Варіація помилки може бути визначена так

$$R_{EM} = E[(e_{EM} - E[e_{EM}]) \cdot (e_{EM} - E[e_{EM}])^T] = \frac{\Delta^2}{3T_1^2}. \quad (4)$$

Відповідно до (3) та (4), метод Ейлера використовує зміну положення та часовий інтервал у періоді вимірювання для розрахунку кутової швидкості. Отже, швидкість, що обчислюється за допомогою методу Ейлера, містить значну помилку.

Розглянемо метод зміни періоду. З метою зменшення помилки за кутовою швидкістю методу Ейлера, відхилення між першим та останнім положенням та інтервали часу за декілька періодів вимірювань використовуються для обчислення швидкості. Іншими словами, помилка швидкості зменшується за рахунок збільшення періодів вимірювання. Цей метод носить назву методу зміни періоду та може бути математично записаний так

$$\omega(m) = \frac{\sum_{h=j+1}^m \theta(h) - \theta(h-1)}{\sum_{h=j+1}^m T_h} = \frac{\theta(m) - \theta(j)}{\sum_{h=j+1}^m T_h}, \quad (5)$$

де  $j$  – та зміна положення, що зчитується цифровим сигнальним процесором, значення якого є цілим позитивним числом, що є менше за  $m$ ; значення  $m - j$  обирається в залежності від кутової швидкості, тобто при низькій кутовій швидкості вибирається менше значення, а при високій кутовій швидкості – більше, а  $T_h$  – це часовий інтервал між  $(m-1)$ -ю та  $h$ -ю зміною положення ротора. Крім того, діапазон зміни  $e_{3П}(m)$  та варіація помилки  $R_{3П}$  методу зміни періоду можуть бути записані так

$$\begin{aligned} e_{3П}(m) &\in \left[ -\frac{\Delta}{(m-j)T_1}; \frac{\Delta}{(m-j)T_1} \right]; \\ R_{3П} &= \frac{\Delta^2}{3((m-j)T_1)^2} \end{aligned} \quad (6)$$

Судячи з (6), можна зробити висновок, що метод зміни періоду підвищує точність визначення кутової швидкості за рахунок збільшення періоду вимірювання, проте він викликає більшу часову затримку.

Розглянемо метод накладання періодів. Для зменшення часової затримки в методі зміни періоду, кутова швидкість, розрахована за допомогою методу зміни періоду, знаходиться у поточному та декількох попередніх періодах, усереднюється як значення швидкості у поточному періоді. Цей метод називається методом накладання періодів, а математично записати його суть можна так

$$\omega(m) = \frac{1}{v} \sum_{z=0}^{v-1} \left( \frac{\theta(m-z) - \theta(j-z)}{\sum_{h=j-z+1}^{m-z} T_h} \right), \quad (7)$$

де  $j$  – додатне ціле, що є меншим за  $m$ ;  $v$  – додатне ціле, що є меншим за  $m - j + 1$ .

Аналогічно до попередніх методів діапазон зміни помилки  $e_{\text{нп}}(m)$  та дисперсія помилки  $R_{\text{нп}}$  визначаються так

$$e_{\text{нп}}(m) \in \left[ -\frac{\Delta}{(m-j)T_1}; \frac{\Delta}{(m-j)T_1} \right];$$

$$R_{\text{нп}} = \frac{\Delta^2}{3v((m-j)T_1)^2}. \quad (8)$$

Компромісом між точністю визначення кутової швидкості та часовою затримкою є використання методу накладання періодів при відповідному підборі параметрів. Вищевказані три методи розрахунку кутової швидкості дозволяють виконувати послідовний розрахунок за умови, що цифровий сигнальний процесор послідовно зчитує нові сигнали положення, а не в кожному періоді вибірки. Таким чином, розрахунок швидкості з використанням розглянутих методів містить певні помилки та часові затримки.

Рівняння, що описують динаміку процесів у синхронному двигуні з постійними магнітами, мають наступний вигляд

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ M_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{c}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ M_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_M}{0} \\ 0 \\ M_n \end{bmatrix} i_q,$$

де  $\omega$  - механічна кутова швидкість,  $i_q$  - проекція вектору струму статора на вісь  $q$ ;  $J$  - момент інерції механічної частини приводу;  $c$  - коефіцієнт в'язкого тертя;  $K_M$  - коефіцієнт передачі за електромагнітним моментом;  $M_n$  - момент навантаження, що вважається постійним на інтервалі дискретності системи, тобто

$$\frac{dM_n}{dt} = 0.$$

Після дискретизації спостерігач Калмана може бути розроблений на основі наступних рівнянь

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + w(k),$$

$$y(k) = Cx(k) + r(k),$$

де  $k$  - номер періоду дискретності;  $x = \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ M_n \end{bmatrix}$  - вектор стану системи;  $u = [i_q]$  - сигнал керування системи;  $y = [\theta]$  - сигнал спостерігача;  $w$  - шум процесу, що представляє собою вплив помилок параметрів системи на якість оцінювання;  $r$  - шум вимірювання, що представляє собою похибки вимірювання та інші причини, що впливають на точність ідентифікації вхідних та вихідних змінних стану системи.

При роботі з низькою кутовою швидкістю цифровий сигнальний процесор не може оновлювати значення положення ротора на кожному інтервалі дискретності, тобто  $T_1 > T_s$ . У тих випадках, коли цифровий сигнальний процесор не має змоги оновити значення положення ротора, значення попереднього періоду, що залишається актуальним, має велику похибку по відношенню до реального значення. Це означає, що цифровий сигнальний процесор отримує недостовірну інформацію щодо кута повороту ротора. Тому виміряне значення  $\theta(k)$ , що представляє собою положення ротора на  $k$ -му інтервалі дискретності, повинно бути проігнороване системою керування. Існує два способи ігнорування значення виміру  $\theta(k)$  при зміні вектору стану системи. Один з цих способів передбачає наявність дуже точної моделі системи, а другий передбачає використання підвищення матриці фільтру Калмана при наявності вимірюваного сигналу.

У традиційній системі векторного керування використовуються зворотні зв'язки за швидкістю та струмом, що обробляються ПІ-регуляторами, регулятор швидкості не може створювати умови для точного відпрацювання сигналу завдання за умови впливу моменту навантаження під час його різкої зміни. Для успішного вирішення поставленого завдання необхідно побудувати систему за збуренням та відхиленням, розглядаючи момент навантаження, що оцінюється фільтром Калмана, як сигнал збурення.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Здійснено теоретичне узагальнення й розв'язання актуальної науково-технічної задачі підвищення точності керування синхронними машинами з постійними магнітами при наявності абсолютного чи інкрементального енкодера. Суть виконаних досліджень полягає в впровадженні у систему керування самоадаптивного спостерігача Калмана, що дозволяє суттєво покращити показники якості керування. Найбільш суттєві наукові і прикладні результати, висновки і рекомендації полягають у наступному: 1. Застосування адаптивного спостерігача Калмана на відміну від існуючих способів виміру кутової швидкості здатний оцінювати одночасно положення ротора та швидкість з високою точністю та без часової затримки. 2. Керування синхронним двигуном на базі системи з адаптивним спостерігачем Калмана дозволяє суттєво підвищити показники якості керування, зменшити пульсації кутової швидкості, а також коливання струму  $i_d$  при пуску двигуна. 3. Шляхом математичного моделювання доведено, що застосування спостерігача Калмана для таких систем дозволяє підвищити швидкодію системи. 4. Реалізація у системі принципів керування за збуренням з використанням адаптивного спостерігача Калмана для оцінки моменту навантаження дозволяє надати системі можливостей своєчасного реагування на його зміну. Точність відпрацювання заданого сигналу кутової швидкості суттєво підвищується за рахунок оцінки поточного значення навантаження у системі. 5. Реалізація запропонованої системи можлива як при застосуванні абсолютного, так і інкрементального енкодера, оскільки алгоритм визначення положення ротора та кутової швидкості є ідентичним.

#### Список літератури

1. S.-K. Sul Control of Electric Machine Drive Systems, Wiley-IEEE Press, 2010.
2. Zhou H., Wen X., Zhao F., Zhang J., Meng J. An improved flux-weakening strategy for field-oriented-controlled PMSM drives // IEEE 7<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference, 2012.
3. Кобрин А.В. Оценка задержки с помощью робастного фильтра Калмана / А.В. Кобрин, Б.С. Тур // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Техніка та електрофізика. – 2013. – № 27. – С. 76-82.
4. Братусь О.В. Побудова багатовимірної моделі на основі фільтра Калмана й аналіз алгоритмів оцінювання її параметрів / О.В. Братусь, В.М. Подладчиков // Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2013. – № 5. – С. 28-34.
5. Кіку А.Г. Покращення калмановської фільтрації змінних стану / А.Г. Кіку, В.М. Аглоткова, О.С. Бурлаков // Адаптивні системи автоматичного управління. – 2003. – № 6. – С. 38-43.
6. Лимонов А.С. Экстраполяция дискретных сигналов с использованием фильтров Калмана / А.С. Лимонов, Т.М. Пустовит, А.А. Лимонов // Український гідрометеорологічний журнал. – 2011. – № 9. – С. 26-37.
7. Зарицкая Е.И. Оптимизационный расчет тихоходного синхронного генератора на постоянных магнитах для безредукторных электрогенерирующих установок / Е.И. Зарицкая, Л.Н. Канов, А.М. Олейников // Проблемы техники. – 2013. – № 2. – С. 103-118.

Рукопис подано до редакції 18.04.16

УДК 621.3

А.Б. СЬОМОЧКІН, канд.техн.наук, доц., В.В. ШЕВЧУК, студент  
Криворізький національний університет

## ЗАСТОСУВАННЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ В ГІБРИДНИХ СИСТЕМАХ

Суперконденсатор здатний функціонувати як пристрій для зберігання електричної енергії, викликає зростаючий інтерес серед фахівців. В даний час в багатьох роботах відзначаються позитивні якості суперконденсаторів (СК), які можуть ефективно застосовуватися для згладжування пікових струмів, що виникають в системах енергоживлення. Істотна увага приділяється застосуванню СК в системах з електрохімічними джерелами живлення (зокрема з АКБ), що використовуються в якості основних у автономних транспортних засобах. Іоністори являють собою висо-

ко ємнісні конденсатори із подвійним електричним шаром. На відміну від звичайних конденсаторів, іоністори мають характеристики, які дозволяють поєднувати велику потужність і значну енергію. Відомо, що максимальну потужність в навантаженні (споживачі електроенергії) можна отримати за однакової кількості її резистивного опору внутрішньому активному спротиву джерела або накопичувача електричної енергії, в тому числі і СК. Внутрішній активний опір сучасних суперконденсаторів може становити 0,11 ... 1,5 мОм, а максимальна щільність потужності може бути більше 90 кВт / кг, що в 3 тис. разів більше, ніж у пускового свинцевого акумулятора автомобілів.

Дослідження основних властивостей та переваг суперконденсаторів для застосування в електромеханічних системах і є основою даної роботи. Метою даної роботи є складання оптимального алгоритму роботи суперконденсаторів у складі тягової системи ЕМ.

Розглянуто нові технології виготовлення іоністорів на основі деревної тріски, які значно зменшують вартість даних елементів. Проаналізувавши властивості іоністорів були визначені основні напрямки їхнього застосування.

**Ключові слова:** іоністор, електрична енергія, суперконденсатор, батарея, потужність

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** У зв'язку із розвитком потужних силових конденсаторів (іоністорів) та відносно невисокою їх вартістю у відношенні із іншими накопичувачами, перспективним є ємнісні накопичувачі енергії.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Суперконденсатори - нові типи енергоємних конденсаторів з щільністю енергії в 10 разів вище, ніж в традиційних конденсаторах, а потужність імпульсного розряду до 10 разів вище потужності акумуляторних батарей.

Властивості суперконденсаторів:

найвища щільність ємності;

найнижча вартість в розрахунку на 1 фараду;

надійний, тривалий термін служби;

високий ККД циклу (95% і вище);

безперебійна експлуатація;

екологічна безпека;

широкий діапазон робочих температур;

висока питома потужність і досить висока питома енергія;

дуже висока швидкість заряду / розряду;

велика кількість (тисячі) циклів з незначним погіршенням параметрів;

знижена токсичність використовуваних матеріалів;

низький еквівалентний послідовний опір [11].

**Постановка завдання.** Визначення області застосування ємнісних накопичувачів, в якій можна отримати значний економічний ефект від впровадження даного виду накопичувача.

**Викладення матеріалу та результати.** Група дослідників з університету Вандербілта (VanderbiltUniversity), Нашвілл Теннесі, розробила суперконденсатори нового типу, велика частина конструкції яких виготовлена з кремнію. Ці суперконденсатори, що демонструють досить високий показник щільності зберігання енергії, дозволяють інтегрувати джерела енергії прямо всередину електронних чіпів, дозволяючи їм виконувати свою роботу протягом тривалого часу навіть при відсутності енергії [6].

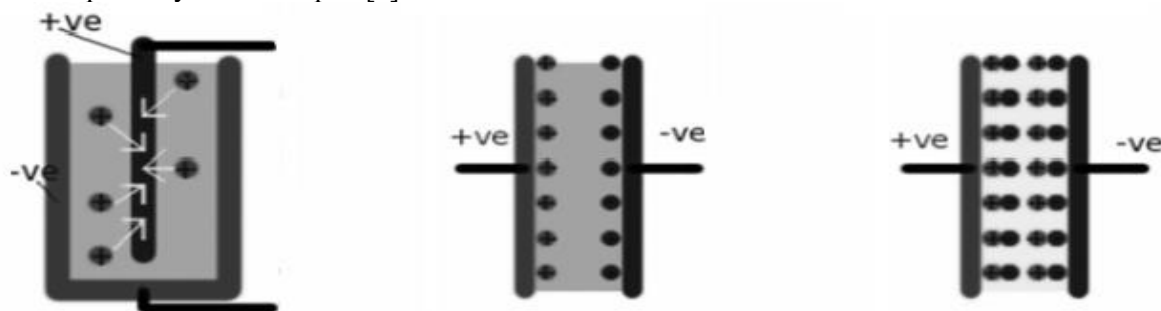


Рис.1. Акумуляторна батарея, конденсатор та суперконденсатор

*Технологія роботи суперконденсаторів на основі деревної тріски.*

Співробітники Центру стійких технологій при університеті спробували використовувати в якості електродів для суперконденсатора вугілля, отримане при спалюванні деревних відходів. Для цього фрагменти деревини берези, сосни і червоного кедра нагрівали до 750 градусів за Цельсієм, причому без додаткової обробки. Отримані шматочки вугілля використовувались в експериментах повністю і за їх допомоги вдалося побудувати суперконденсатор, який накопичував достатньо енергії для світіння світлодіодного ліхтаря. Вимірювання показали, що прос-

тий шматок деревного вугілля може стати електродом для конденсатора з ємністю близько 14 фарад на грам маси. Якщо ж вугілля обробити слабким розчином азотної кислоти,  $HNO_3$ , то верхня межа питомої ємності виростає в вісім разів, до 115 фарад на грам. Крім того, попередні випробування, в ході яких суперконденсатори з вугілля перезарядили більше п'яти тисяч раз без значного зниження їх ємності, показали придатність нового методу до довготривалої експлуатації.

Вчені не уточнили назву видів, деревину яких використовували в досліджах: і якщо з сосною і березою особливих різночитань не виникає, то ось під «червоним кедром», red cedar, позначається як вірджинський ялівець, так і складчаста туя, причому в Австралії зростає ще один «кедр» *Toona ciliata*, який відноситься до сімейства Мелієва [8].



Рис.2. Експериментальний суперконденсатор

Дослідники підкреслюють, що вагомою перевагою їх методу є не просто дешевизна сировини, а поєднання низької вартості матеріалів з простотою обробки. В даний час суперконденсатори з електродами на основі активованого вугілля серійно виробляються з використанням кокосової стружки, але для активації вугілля потрібно обробляти різними хімікатами, які потім підлягають утилізації [5].

Використана винахідниками промивка слабкою азотною кислотою теж передбачає отримання розчину зол в кислоті (ефект підвищення ємності вчені пов'язали з вимиванням з вугілля солей кальцію та інших домішок), однак подібний розчин, за словами авторів нової технології, є готовою сировиною для виробництва добрив, а не небезпечними хімічними відходами.

Дослідження характеристик акумуляторних батарей (АКБ), як базового елементу тягової системи електромобіля (ЕМ), показало, що АКБ характеризуються великою енергоємністю, яку можна дискретно нарощувати, і обмеженням по максимальному піковому струму. Це дуже важливо на етапі пуску, прискорення, а також в стандартному циклі руху [11].

Основною перевагою є можливість досить швидко накопичувати заряд та віддавати його, витримуючи велику кількість циклів заряду-розряду без втрат робочих властивостей. Також до переваг слід віднести більше значення щільності запасованої енергії у розрахунку на одиницю об'єму. Енергія, яка запасється в конденсаторі, безпосередньо залежить від його ємності. Якщо ємність звичайного електролітичного конденсатора кілька мікрофарад, то іоністор такого ж розміру має ємність в кілька фарад [6].

Чи ефективно застосування суперконденсаторів в автомобілях? Кращим рішенням для автономного електротранспорту є використання комбінованого джерела електроживлення з паралельним з'єднанням акумулятора і СК. Суперконденсатор повинен забезпечувати запуск двигуна автомобіля і інші короткочасні (імпульсні) режими споживання великої потужності (зокрема, його розгін і підйом на піднесення, посилення низькочастотних звуків в аудіосистемі і т.п.), а акумулятор - тривале споживання електроенергії двигуном і іншим електроустаткуванням автомобіля без багаторазового збільшення споживаної потужності [10].

При заряді СК позитивно заряджені катіони в його електролітичному розчині рухаються до негативного електроду - катода, а негативно заряджені аніони - до позитивного електроду - анода. Таким чином, позитивні і негативні заряди накопичуються на кордоні розділу поверхонь обкладок СК (катода і анода) і електролітичного розчину і утворюють подвійний електричний шар.

При прикладанні більш високої напруги область накопичення зарядів в електродах СК розширюється за рахунок проникнення зарядів в їх розвинені нанопори меншого діаметру. Такий процес викликає збільшення накопичується в СК заряду, нелінійне щодо збільшення напруги. При розряді СК, навпаки, - позитивно заряджені катіони електролітичного розчину рухаються до анода, а негативно заряджені аніони - до катода [2].

Завдяки унікальним технічним характеристикам СК, насамперед високій питомій потужності, практично необмеженій кількості циклів заряд/розряд, роботі в широкому діапазоні температур, найперспективніші для них сфери застосування:

побутова електроніка - стільникові телефони, цифрові фотоапарати, слухові апарати тощо (для згладжування пікових навантажень і продовження цим терміну служби акумуляторів);

побутові і промислові електротехнічні пристрої - переносні електродрилі, портативні зварювальні апарати, джерела безперебійного живлення тощо.

автомобілебудування - гібридні автомобілі, електромобілі, системи старт-стоп [9];

Іоністори застосовуються в гібридній установці міських автобусів. Характерною особливістю даної установки є те, що в транспортному засобі використовуються два джерела живлення – двигун внутрішнього згоряння і накопичувач енергії. Комп'ютерне управління в фазі гальмування передає крутний момент на генератори, які заряджають іоністори. У момент руху автобуса або під навантаженням іоністори розряджаються, покращуючи динаміку руху і знижуючи витрату палива [1].

Одним з рішень є застосування суперконденсаторів (СК), які мають перевагу в порівнянні з АКБ при забезпеченні великих сплесків споживаної потужності завдяки їх високій питомій потужності і можливості швидкої зарядки. Отже, додавання СК до складу тягової системи ЕМ буде розвантажувати АКБ під час запуску електродвигуна (ЕД) і руху під ухил.

Алгоритм роботи:

при рівномірному русі електромобіля єдиним джерелом енергії є акумуляторні батареї;

при розгоні електромобіля потужність до коліс підводиться тільки від суперконденсатора; для внутрішньоміського ЕТ в разі повторного прискорення після набору постійної швидкості джерелом енергії є акумуляторні батареї, оскільки це пов'язано з певним обмеженням, що накладається на відношення маси гібридної енергоустановки до маси самого ЕМ; в разі реалізації комбінованої енергоустановки для електробуса і вантажного ЕМ при повторному прискоренні після набору постійної швидкості єдиним джерелом енергії є блок СК;

при гальмуванні електромобіля кінетична енергія руху рекуперується в СК, акумулятор не бере участі в процесі рекуперації;

при зниженні запасу енергії СК до критичного рівня відбувається його повна зарядка постійною потужністю від АКБ [3].

До складу перетворювача СК входить блок ПІ - регулятора, який обмежує і підтримує струм АКБ на заданому рівні шляхом зміни вихідної напруги перетворювача СК.

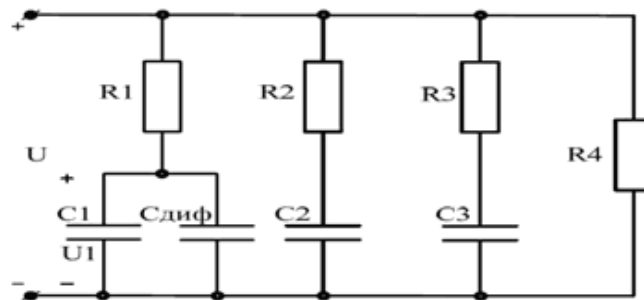


Рис. 3. Схема заміщення СК із трьома паралельними RC гілками

Схема досить точно відображає енергетичні і динамічні характеристики суперконденсаторів при тривалості перехідних процесів  $\tau \leq 30$  хв і визначенні параметрів СК за результатами вимірювань на його затискачах.

Гілки схеми мають різні постійні часу  $\tau = RC$  для отримання хорошої точності моделювання режимів роботи СК в зазначеному діапазоні часу.

Перша гілка складається з незмінних елементів  $R_1$  і  $C_1$  і елемента  $C_{диф}$ , значення якого залежить від напруги  $U$  на обкладинках СК. Її постійна часу  $\tau_1 = R_1(C_1 + C_{диф})$  найменша, і її конденсатори  $C_1$  і  $C_{диф}$  заряджаються за кілька секунд. Постійна часу другої гілки



$\tau_2 = R_2 C_2$  дорівнює декільком хвилинах, а в третій  $\tau_3 = R_3 C_3 > 10$  хв. Для обліку саморозряду СК паралельно розглянутим гілкам додавався резистор  $R_4$ , за допомогою якого враховувалися струми витоку СК і пов'язані з ними втрати електричної енергії [8].

Суперконденсатор допоможе при функціонуванні пристроїв, які в короткий проміжок часу споживають велику кількість енергії. Такі навантаження виникають, наприклад, при роботі серйозних аудіосистем або лебідки на позашляховому автомобілі. Такі ударні навантаження завдають шкоди АКБ. За рахунок більш низького внутрішнього опору і здатності приймати на себе імпульсну навантаження суперконденсатор забезпечує комфортний режим експлуатації для акумулятора і продовжить термін його служби [13].

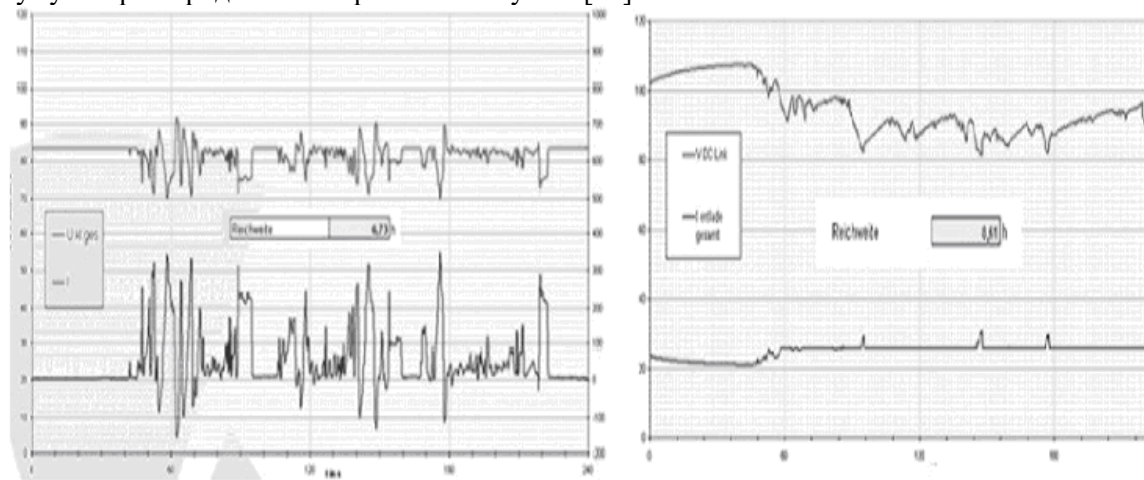


Рис.4. Струм та напруга АКБ без СК та із суперконденсатором

Ефект застосування:

- збільшення пускової потужності;
- зменшення струму А, збільшення терміну служби АБ;
- надійний пуск при значному зниженні ємності АБ;
- покращення якості напруги бортової мережі [12].

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Ємнісні накопичувачі можуть бути використані в системах динамічного навантаження електричних машин при їх випробуваннях. Застосування накопичувачів, встановлених в силовому ланцюзі між перетворювачем і електричної машиною, в перспективі дозволить вирішити проблему компенсації реактивної потужності, коливання якої негативно впливають на інших споживачів мережі і вимагають установки силового обладнання завищеною потужності. Тому побудова систем регулювання, енергетика приводу в режимі заряду-розряду - питання практичного застосування системи динамічного навантаження з ємнісним накопичувачем.

Таким чином, суперконденсатори вельми перспективна розробка тому вони здатні запасати стільки ж енергії, скільки зберігається в нікель - металогідридних батареях. Головна перевага запропонованого пристрою полягає в тому, що заряджати та розряджати воно може за лічені хвилини. Створений конденсатор володіє найбільш високою щільністю збереженої енергії серед усіх нановуглецевих пристроїв.

Енергозбереження в різних галузях із застосуванням суперконденсаторів:

- тягові підстанції (економія електроенергії 15 %, економія обслуговування 2 рази);
- електричний транспорт (економія електроенергії - 25 %, зниження навантаження на мережу - 15 %, автономне переміщення);
- гібридний транспорт (економія палива - 50 %, зниження емісії - 10 раз) [11].

Для набуття високих ємності й енергії матеріал повинен мати велику питому поверхню, доступну для частинок органічного електроліту. Для збільшення електропровідності (рухливості) електроліту в нанопорах електрода і зменшення, таким чином, внутрішнього опору СК необхідне певне співвідношення нанопор і транспортних каналів - головним чином макропор більших від 50 нм. При цьому нанопори обумовлюють високу ємність СК, а транспортні канали служать для швидкого введення/виводу заряджених частинок при заряді/розряді електрода; ма-

теріал повинен мати досить високу електронну провідність навіть без спеціальних струмопровідних добавок.

#### Список літератури

1. Астахов Ю.Н., Веников В.А., Тер-Газарян А.Г. Накопители энергии в электрических системах: Учеб. пособие для электроэнергет. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1989. – 159 с.
2. Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Мизюрин С.Р., Васюкевич П.В. Накопители энергии: Учеб. пособие для вузов. Под ред. Д.А. Бута. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.
3. Щерба А.А., Третьяк М.В., Иващенко Д.С. Анализ переходных и установившихся электрических режимов аккумуляторной батареи и суперконденсаторов, включенных параллельно в системах питания электромобилей // Техн. електродинаміка. Темат. вип. "Силовая електроніка та енергоефективність". – 2011. – Ч. 2. – С. 93–98.
4. Кузнецов, В. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): разработка и производство [Текст] / В. Кузнецов, О. Панькина, Н. Мачковская, Е. Шувалов, И. Востриков // Компоненты и технологии. – 2005. – № 6. – С. 29 – 34.
5. Conway B. Electrochemical supercapacitors: scientific fundamentals and technological applications. — New York: Kluwer Academic Plenum Publishers, 1999. — 698 p.
6. Beguin F., Frackowiak E. Supercapacitors: Materials, Systems and Applications. // First Edition, 2013. — Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. — 527 p.
7. Zubietta L., Bonert R. Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications // IEEE Trans. On Industry Applications. – Vol. 36. – No. 1, January-February 2000. – P. 199–205.
8. Ізотов В.Ю., Громадський Д.Г., Рудницька Г.А. Дослідження роботи суперконденсатора в рамках дволанкової RC-моделі // Техн. електродинаміка. – 2011. – № 2. – С. 70–75.
9. Burke A., Miller M., Zhao H. Ultracapacitors in Hybrid Vehicle Applications: Testing of New High Power Devices and Prospects for Increased Energy Density // Research Report – UCD-ITS-RR-12-06. – Institute of Transportation Studies, University of California, May 2012.
10. Смотров, Е. А. Оптимизация процесса торможения в электроприводах малых электротранспортных средств. [Текст]. / Е. А. Смотров, Д. В. Вершини, В. Г. Герасимьяк // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – К. : Техніка, 2012. – №05(81). – С. 5–11.
11. Adam M. Ragheb and Magdi Ragheb. Wind Turbine Gearbox Technologies. University of Illinois at Urbana-Champaign, 216 Talbot Laboratory, USA. Fundamental and Advanced Topics in Wind Power. 20, June, 2011, 422 p., pp. 189-206.
12. Wind Turbine Doubly-Fed Induction Generator (Phasor Type) – Simulink Library Element. Matlab and Simulink 2014 Edition. The MathWorks, Inc.
13. Dudurych O., Conlon M. Impact of reduced system inertia as a result of higher penetration levels of wind generation. Power Engineering Conference (UPEC), 2014 49th International Universities Publication Year: 2014 , Page(s): 1 - 6
14. Nikolic, D. ; Negnevitsky, M. ; de Groot, M. ; Gamble, S. ; Forbes, J. ; Ross, M. Fast demand response as an enabling technology for high renewable energy penetration in isolated power systems . PES General Meeting | Conference & Exposition, 2014 IEEE DOI: 10.1109/PESGM.2014.6939282 Publication Year: 2014 , Page(s): 1 – 5.

Рукопис подано до редакції 18.04.16

УДК 629.349:62-182

Ю.Б. ФІЛІПП, канд. техн. наук, доц., А.В. БЕЛОУС, магістрант  
Криворізький національний університет

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ТЯГОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ ТРОЛЕЙБУСІВ КРИВОГО РОГУ

Визначення енергетичних показників тягової підстанції в районі підстанції Ленинская-2, що обслуговує маршрути тролейбусів №3, 17 наукове обґрунтування і розробка методів розрахунку показників якості електроенергії, що дозволяють підвищити енергоефективність тягових підстанцій міських тролейбусів. Підвищити енергетичну ефективність роботи тягового електроприводу можливо за рахунок використання енергії гальмування великовантажних кар'єрних самоскидів, застосувавши рекуперативне гальмування, як основний спосіб електричного гальмування. визначення енергетичних показників тягової підстанції в районі підстанції Ленинская-2, що обслуговує маршрути тролейбусів №3, 17 наукове обґрунтування і розробка методів розрахунку показників якості електроенергії, що дозволяють підвищити енергоефективність тягових підстанцій міських тролейбусів.

**Ключові слова:** підстанція, тяговий, енергетичні показники, потужність, тролейбус

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Найбільше зниження витрат електроенергії у міському електротранспорті можна забезпечити за рахунок підвищення ефективності роботи транспортних засобів. Втрати енергії в системі електропостачання електротранспорту сягають 25% загального обсягу електроенергії, що ним споживається.



Технічний стан експлуатуємого рухомого складу значно впливає на витрати електроенергії. На переборення рухомим складом опору його руху витрачається більше 30% загальних витрат електроенергії. В згаданий опір руху включається внутрішнє тертя в вузлах і механізмах трамваю і тролейбуса, їх взаємодія з рельсами чи дорожнім покриттям. Тому важливо підтримувати в доброму стані всі деталі, що обертаються, підшипники, а також гальмівну систему.

Одним із найбільш ефективних способів значної економії електроенергії на електричну тягу – це впровадження рекуперативного гальмування, коли накопичена вагоном кінетична енергія перетворюється при його гальмуванні в електричну, що повертається в контактну мережу. Енергія рекуперації в залежності від конкретних умов, що характеризують лінію і рухомий склад, може складати у міському електротранспорті 10-25% енергії, що витрачається на електричну тягу.

Серед інших напрямів зниження споживання електроенергії у міському транспорті слід відмітити:

Впровадження в трамваях і тролейбусах автоматики керування режимами роботи систем опалення. Встановлення автоматики режимів опалення в залежності від температури повітря навколишнього середовища дає зниження витрат електроенергії на обігрів пасажирських салонів і робочих місць на 10-25 % споживаємого рухомим складом електроенергії.

Зниження пускових (реостатних) втрат електроенергії в трамваях і тролейбусах (в старих системах електроприводів, в яких пуск здійснюється реостатним способом) можливе при здійсненні наступних заходів:

- ліквідація лишніх зупинок на трасі трамваю та тролейбуса;
- скорочення додаткових зупинок на перегоні між основними зупинками.

Використання частотно регульованого електроприводу в сучасних трамвайних та тролейбусних вагонах дозволяє відмовитись від резисторно-контакторного пуску, де відбуваються непродуктивні втрати електроенергії на нагрів пускових резисторів.

Оптимізацію пасажирських маршрутів з метою уникнення частих зупинок на трасі через перевантаження вулиць транспортом, побудову окремих ліній (ліній швидкісного трамваю) для міського електротранспорту. Важливо визначити оптимальну довжину перегонів і кількість зупинок. Розміщувати зупинки перед світлофорами чи на верхніх точках профілю маршруту.

Економне водіння поїздів трамваїв та тролейбуса значно скорочує витрати електроенергії на рух (максимальне використання вибігу і доведення до мінімуму гальмівних втрат). З метою зниження витрат електроенергії розробляються режими водіння (маршрутні карти) для кожного перегону. При складанні маршрутних карт необхідно максимально використовувати вибіг і доводити до мінімуму гальмівний шлях.

В тягових електроприводах постійного і змінного струму на тягових підстанціях обов'язково використовуються випрямлячі постійного струму, який в подальшому використовується або для живлення двигунів постійного струму, або після інвертування для живлення двигунів змінного струму.

Тому виникає необхідність вивчення дослідження енергетичних показників тягових підстанцій міського електротранспорту з метою встановлення шляхів раціонального використання електроенергії, а також розробка заходів щодо енергозбереження, що є важливою науково-технічною задачею [1,2].

**Аналіз досліджень і публікацій.** Інформація автоматизированной системи енегопідрахунку ПАТ «Кривбасзалізрудком» по фідерам тягових підстанцій [3].

**Постановка завдання.** Підвищити енергетичну ефективність роботи тягового електроприводу можливо за рахунок використання енергії гальмування великовантажних кар'єрних самоскидів, застосувавши рекуперативне гальмування, як основний спосіб електричного гальмування. визначення енергетичних показників тягової підстанції в районі підстанції Ленинская-2, що обслуговує маршрути тролейбусів №3, 17 наукове обґрунтування і розробка методів розрахунку показників якості електроенергії, що дозволяють підвищити енергоефективність тягових підстанцій міських тролейбусів.

Для досягнення зазначеної мети в роботі необхідно розв'язати такі задачі:

Аналіз добових і місячних графіків активної та реактивної електроенергії тягової підстанції.

Розрахунок і аналіз енергетичних показників ефективності використання електроенергії: коефіцієнта реактивної потужності і втрат активної потужності в силовому трансформаторі.

**Викладення матеріалу та результати.** Втрати енергії в системі електропостачання електротранспорту сягають 25% загального обсягу електроенергії, що ним споживається. Технічний стан рухомого складу, що експлуатується, значно впливає на витрати електроенергії. На переборення рухомим складом опору його руху витрачається більше 30% загальних витрат електроенергії

Використання регульованого електроприводу змінного та постійного струму в сучасних тролейбусах дозволяє суттєво підвищити надійність їх роботи, комфортність перевезення пасажирів та забезпечити енергозбереження.

На тягових тролейбусних підстанціях використовуються випрямлячі постійного струму, який в подальшому використовується або для живлення двигунів постійного струму, або після інвертування для живлення двигунів змінного струму. В якості випрямлячів для тягових підстанцій міського електричного транспорту застосовується комплект з перетворювальної секції випрямляча серії В -ТПЕД виробництва ЗАТ «Плутон».

З метою аналізу енергоспоживання був проведений аналіз добових графіків активної і реактивної потужності тягової підстанції "Гвардійська". На отриманих за допомогою АСКУЕ REALNET графіків, спостерігаються ранішні, денні і вечірні максимуми навантаження, які пов'язані з рухом тролейбусів.

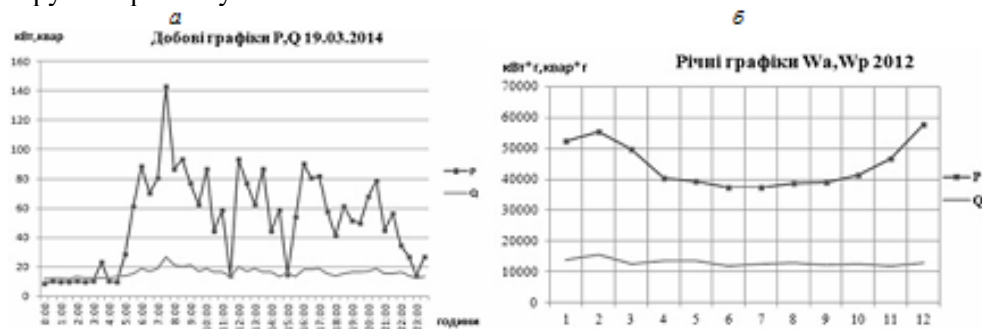


Рис. 1. Добові та річні графіки споживання активної та реактивної енергії відповідно

Встановлено зростання втрат холостого ходу у зимовий час, що пов'язано з використанням нагрівальних приборів у приміщенні тягової підстанції. Можна бачити наявність зростання інтенсивності руху тролейбусів у нічний час для перевезення пасажирів ( $2^{30}$ - $4^{00}$ ).

Порівняльний аналіз річних графіків за 2012–2014 роки показав, що спостерігається зменшення у кожний місяць 2014 року у порівнянні з попередніми 2012 і 2013 роки. Це може бути пов'язано з використанням більш сучасних тролейбусів, оптимізацією їх руху, розробкою і впровадженням заходів з енергозбереження і таке інше

На річних графіках видно мінімальне споживання активної електроенергії у теплий час з квітня по вересень місяць і зростання її споживання у період з жовтня по березень місяць. Максимум споживання приходить на період з грудня по лютий місяць. На розрахованих графіках спостерігається зменшення споживання активної електроенергії у період з березня по вересень призводить до зменшення і втрат активної електроенергії. Але зміна втрат незначна через те, що перша складова, що визначається втратами в сталі, відносно постійна і значно більша ніж друга складова, яка визначається коефіцієнтом завантаження силового трансформатора. Цей коефіцієнт незначний і складає  $k_3=0,026\div0,040$  через те, що трансформатор встановлений зі значним запасом по потужності. При експлуатації тролейбусів з тяговим електроприводом як постійного, так і змінного струму необхідно впроваджувати заходи з енергозбереження на основі енергоаудиту [5,6].

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** У роботі здійснене дослідження енергетичних показників тягової підстанції тролейбусів КП «Міський тролейбус» Кривого Рогу.

Для дослідження використовувалася технічна документація на тягову підстанцію тролейбусів маршруту № 3,17, підключеної до знижувальної підстанції 154/6 кВ Ленінська - 2, та інформація автоматизованої системи енергообліку ПАТ «Кривбасзалізрудком», яка обслуговує п/с Ленінська -2. При аналізі також розглядалися розрахункові параметри коефіцієнта реактив-

ної потужності  $\text{tg}\varphi$ , що дозволяє зробити оцінку ефективності використання електроенергії тягової підстанції.

Найбільш суттєві наукові і прикладні результати, висновки і рекомендації полягають у наступному.

Встановлено, що добові графіки споживання активної і реактивної потужностей мають декілька інтервалів максимумів і мінімумів споживання електроенергії. Нічний мінімум пов'язаний з відсутністю руху тролейбусів і наявністю споживання трансформатором перетворювача потужностей холостого ходу.

Максимум споживання активною потужності спостерігається в ранішні часи перевезення пасажирів о 7:30. Ще три максимума мають місце - в 13:00, 16:00, 21:00, що обумовлено перевезенням робочих і дачників.

Коливання реактивної потужності відповідають коливанням активної потужності, ще пов'язано з залежністю активної і реактивної потужностей з струмом перетворювача підстанції.

Нічний мінімум активної і реактивної потужностей визначається втратами холостого ходу перетворювального трансформатора. Як видно з графіків, він становить близько 12 кВт і 10 квар відповідно.

Був проведений порівняльний аналіз добових графіків активної потужності тягової підстанції для різних пор року (19.03.2014, 18.06.2014, 17.12.2014). Встановлено, що мають місце більші амплітуди активної потужності в зимовий час, що може бути пов'язано як з більшою інтенсивністю руху тролейбусів, так із зростанням їх завантаження пасажирями.

Можна бачити зростання втрат холостого ходу у зимовий час, що може бути пов'язано з використанням нагрівальних приборів у приміщенні тягової підстанції. Можна бачити наявність зростання інтенсивності руху тролейбусів у нічний час для перевезення пасажирів (2:30 - 4:00).

На недільних графіках спостерігаються незначні коливання активної і реактивної електроенергії. Також видно незначне підвищення споживання електроенергії у вихідні дні, що пов'язано зі зростанням пасажиропотоку людей на дачні ділянки.

Були проаналізовані річні графіки активної і реактивної електроенергії за 2012 рік. На цих графіках видно мінімальне споживання активної електроенергії у теплий час з квітня по вересень місяць і зростання її споживання у період з жовтня по березень місяць. Максимум споживання приходить на період з грудня по лютий місяць. Реактивна потужність при цьому змінюється незначним чином.

Порівняльний аналіз річних графіків за 2012-2014 рр. показав, що спостерігається зменшення у кожний місяць 2014 р. порівняно з попередніми 2012 і 2013 роками. Це може бути пов'язано з використанням більш сучасних тролейбусів, оптимізацією їх руху, розробкою і впровадженням заходів з енергозбереження і таке інше.

При експлуатації тролейбусів з тяговим електроприводом як постійного, так і змінного струму необхідно впроваджувати заходи з енергозбереження на основі енергоаудиту.

### *Список літератури*

1. Основи електричного транспорту: посібник для студ. вищ.навч.закладів/ під заг. ред. М.А. Слецова. – М.: Видавничий центр «Академія», 2006. – 464 с.
2. Константинов Б.А., Зайцев Г.З. Компенсация реактивной мощности. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. Мокін Б.І., Розводюк М.П., Розробка розкладу руху електротранспорту // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2005. – №3 – С. 35-38.
4. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах. М.: Энергоиздат, 1981, –197 с.
5. Електричне устаткування для «ASLOM TV PROGRES» транспортних засобів. Каталог родуції. – Прага: ASLOM industry, 2006, – 24с.
6. Носков В.И., Шпика Н.И., Стан та перспективи впровадження тягових електроприводів змінного струму. // Гідроенергетика України. – 2006. – №2. – С. 63-68.
7. Енергозберігаюча технологія народного господарства / Під ред. В.А. Венікова. Кн.2. Енергозбереження в електроприводі./ Н.Ф. Лльїнський, Ю.В. Рожанковський, А.О. Горнов. – М.: Висш. Шк., 1989, – 217 с.
8. Корягина Е.Е., Коськин А.А. Электроустаткування трамваїв и тролейбусів. Посібник для технікумів міського транспорту. – М.: Транспорт. 1982. – 296 с.
8. Литвинський Л.Б., Федорченко Н.Л., Федорченко Е.И. Энергосберегающие технологии на транспорте./ Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. Випуск 2/2008 (49). Частина 2. С.92-97.

9. Хворост М.В., Шпіка М.І., Бесараб А.І. Тяговий асинхронний електропривод для міського електротранспорту./Енергосбереження, енергетика, енергоаудит. – 2012, №3(97). С.7 – 10.

Рукопис подано до редакції 28.04.16

УДК 622.272:004.051

І.О. СІНЧУК, канд. техн. наук, доц., А.С. САМОХІНА, магістрант  
Криворізький національний університет

## ДО ПИТАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВИДОБУТКУ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ ПІДЗЕМНИМ СПОСОБОМ

Напрями підвищення електроенергоефективності видобутку корисних копалин відомі, більш того, в останні 5-10 років їх кількість збільшилася. Однак, як правило, це відноситься до знову проєктованим або глобально переобладнаним гірничим підприємствам. Щодо діючих, то це проблема ще далеко не вирішена. Між тим, з огляду на те, що в найближчі 35 - 45 років будівництво нових залізрудних підприємств в Україні не планується, то саме в напрямку вдосконалення комплексу: системи електропостачання - системи електроспоживання діючих гірничорудних виробництв необхідно вести наукові дослідження. Викликано це, перш за все, факторами підвищення сегмента енерговитрат взагалі і електроенергозатрат, зокрема, в загальному обсязі собівартості видобутого ЗРС. Найбільш енергоємними споживачами електричної енергії залізрудних шахт і раніше є стаціонарні установки - водовідлив, вентиляція, підйом, компресорні - разом споживають понад 80% всієї електроенергії, споживаної шахтою. Особливо великі електроенергозатрати на вироблення стисненого повітря центральними компресорними станціями, які становлять близько 30% від всієї споживаної комбінованої електроенергії.

**Ключові слова:** енергоефективність, собівартість, оптимізація, потужність, енергія

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** В даний час в Україні обсяги видобутку ЗРС відкритим способом перевершують обсяги видобутку в шахтах. Однак зростання, а точніше відновлення обсягів виробництва товарної залізної руди підземним способом в вітчизняних шахтах, відбувається набагато більшими темпами, ніж в кар'єрах. Пов'язано це з тим, що для цього існує ряд визначальних цю тенденцію об'єктивних чинників [1] у т.ч те, що підземний спосіб видобутку, на відміну від відкритого - кар'єрного, характеризується досить щадним впливом на навколишнє середовище і високим вмістом заліза в сирій руді - до 62% на відміну від 37% кар'єрного. Це практично виключає необхідність енергоємного і трудомісткого процесу збагачення при підземному способі видобутку ЗРС.

Між тим, обом способам видобутку ЗРС, в силу природних причин (зниження рівня ведення гірничих робіт в області проєктних значень), властива негативна і стійка тенденція збільшення енергоємності, видобутку ЗРС, яка в загальному сегменті собівартості ЗРС за останні 10 років становить близько 30% [1], а, отже, ускладнює і без того непросту тенденцію зростання вартості вітчизняного ЗРС, що, в свою чергу, ставить під сумнів конкурентоспроможність даного виду сировини на світовому ринку [1]. У свою чергу, як встановлено, близько 90% від загальних енерговитрат складають електроенергетичні, тобто завдання зменшення собівартості добувної ЗРС по суті зводяться до задачі зменшення або точніше оптимізації електроенергозатрат [2].

**Аналіз досліджень і публікацій.** Напрями підвищення електроенергоефективності видобутку корисних копалин відомі, більш того, в останні 5-10 років їх кількість збільшилася [3-5]. Однак, як правило, це відноситься до знову проєктованим або глобально переобладнаним гірничим підприємствам. Щодо діючих, то це проблема ще далеко не вирішена.

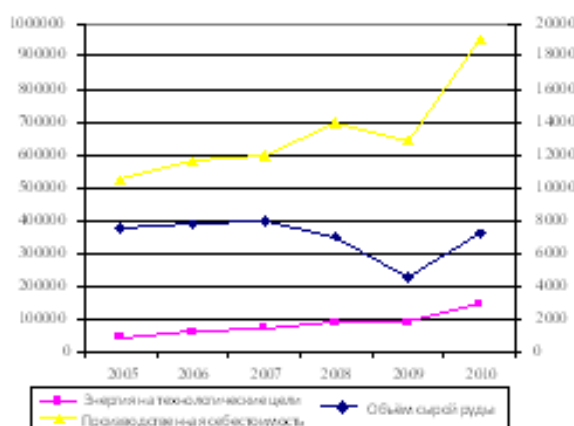
Між тим, з огляду на те, що в найближчі 35 - 45 років будівництво нових залізрудних підприємств в Україні не планується, то саме в напрямку вдосконалення комплексу: системи електропостачання - системи електроспоживання діючих гірничорудних виробництв необхідно вести наукові дослідження. Викликано це, перш за все, факторами підвищення сегмента енерговитрат взагалі і електроенергозатрат, зокрема, в загальному обсязі собівартості видобутого ЗРС.

**Постановка завдання.** Як показують результати досліджень реальними напрямками підвищення електроенергоефективності діючих залізрудних шахт є: модернізація систем електропостачання та оптимізація процесів електроенергоспоживання з можливістю адаптивного управління цим процесом [2].

**Викладення матеріалу та результати.** Перший напрямок в тій чи іншій мірі досліджено і містить дієві, але швидше за технічні і дуже обмежені аспекти свого дозволу, особливо в умовах діючих гірничорудних підприємствах [3-6]. А тому, не заперечуючи, а точніше поряд з вищевикладеним напрямком пошуку шляхів підвищення ефективності самих СЕ, актуальним є все ж питання проведення комплексу досліджень з акцентом саме на другому напрямку - оптимізація і управління цим процесом в конкретних умовах чинного того чи іншого залізрудного підприємства [2].

У практиці відомих досліджень даного напрямку найближче стоять дослідження стосовно підземним вугільним підприємствам [6]. Але значна відмінність технологій ведення гірничих робіт, а головне типи і види використаного устаткування в вугільних і залізрудних шахтах не дозволяє навіть в першому наближенні перенести результати досліджень з «вугілля» на «руду».

Графіки зміни вартості спожитої енергії і виробничої собівартості в тис. грн. та обсягів видобутку руди в тис. т по ПАТ «Криворізький залізрудний комбінат» наведені на рис. 1.



**Рис.1.** Графіки зміни виробничої собівартості, вартості споживаної енергії і обсягів видобутку сирої руди (останній побудований по осі 2у) по ПАТ «Криворізький залізрудний комбінат»

Як бачимо, за період 2005-2015 років частка електроенергозатрат при видобутку 1 т сирої руди підземним способом збільшилася на 18% і має тенденцію подальшого підвищення.

Найбільш енергоємними споживачами електричної енергії залізрудних шахт і раніше є стаціонарні установки - водовідлив, вентиляція, підйом, компресорні - разом споживають понад 80% всієї електроенергії, споживаної шахтою. Особливо великі електроенергозатрати на вироблення стисненого повітря центральними компресорними станціями, які становлять близько 30% від всієї споживаної комбінатом електроенергії.

Тобто, очевидно, що найбільш перспективним шляхом зниження енерговитрат на залізрудних шахтах є зниження електроспоживання і енерговитрат в стаціонарних установках і особливо в центральних компресорних установках.

У зв'язку з цим великі можливості зниження енерговитрат відкриває заміна пневматичного приводу електричним, мають ККД на порядок вище, - для вантажних і бурових машин, пневмоударного інструменту. Це дасть можливість скоротити або взагалі відмовитися від застосування стисненого повітря, від центральних компресорних станцій і довгих пневматичних трубопроводів. Разом з тим, при необхідності можна використовувати пересувні компресорні установки невеликої продуктивності безпосередньо в місцях споживання стисненого повітря - в підземних виробках шахт і на поверхні.

Енергоефективність може бути також істотно підвищена шляхом застосування регульованого електроприводу для таких споживачів як конвеєри, вентиляційні установки та ін. Так, вентилятори головного провітрювання споживають до 20 % електроенергії, що показує низьку енергоефективність вентиляційних систем. Застосування регульованого електроприводу дозволить регулювати подачу повітря відповідно до потреб провітрювання.

Витрати на електричну енергію можуть бути істотно знижені шляхом регулювання електроспоживання за тарифними зонами доби. З огляду на, що в нічні години ціна електроенергії в 4,8 рази нижче, ніж в години максимуму енергосистеми, розробляються плани-графіки регулювальних заходів, впровадження яких дозволить знизити навантаження в години ранкового і ве-

чірного максимумів навантаження енергосистеми. В умовах шахт як споживачів-регуляторів найбільш ефективно використовувати водовідливні установки, які повинні працювати головним чином в години мінімального ціни електроенергії - в нічні години. Ємності водозбірників зазвичай мають достатній запас, при необхідності вони можуть бути збільшені.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Залишається актуальним питання компенсації реактивної потужності для підвищення ефективності систем електропостачання. Розглянуто особливості компенсації реактивної потужності в умовах залізрудних комбінатів з використанням синхронних машин з урахуванням їх режимів роботи і додаткових втрат енергії, обумовлених генерацією реактивної потужності.

Силові трансформатори на головних підстанціях залізрудних комбінатів мають низький коефіцієнт завантаження (20-40%) в силу чого працюють в неекономічних режимах. Визначено, що висновок в «холодний» резерв одного з трансформаторів економічно доцільний при результативному коефіцієнті завантаження менше 0,6.

Серед підземних споживачів найбільш складним і енергоємним електротехнічним комплексом є електровозний транспорт, який має низьку ефективність енерговикористання. Застосування реостатних систем управління призводить до того, що 30-40% електроенергії марно втрачається в регулювальних реостатах тягових електротехнічних комплексів електровозів. Сучасний розвиток промислової електроніки дозволяє значно поліпшити технічні характеристики електровозів і в 1,5 рази скоротити витрату електроенергії.

Вищенаведені рекомендації при їх реалізації дозволять кожній конкретній залізрудній шахті підвищити енергоефективність видобутку залізної руди на 20-30 %.

#### *Список літератури*

1. Сборник технико-экономических показателей горнодобывающих предприятий Украины в 2009–2010 гг. Анализ мировой конъюнктуры рынка ЖРС 2004–2011 гг. / **Е.К. Бабец, Л.А. Штанько, В.А. Салганик** и др. – Кривой Рог: Видавничий дім, 2011 – 329 с.
2. **Синчук И.О.** Потенциал электроэнергоэффективности и пути его реализации на производствах с подземными способами добычи железорудного сырья. Монография / **И.О. Синчук, Э.С. Гузов, А.Н. Яловая, С.Н. Бойко** // Под ред. докт. техн. наук, проф. **О.Н. Синчука**. – Кременчук: Изд. ЧП Щербатых А.В. – 2015. – 296 с.
3. Електрифікація гірничого виробництва: Підручник для ВНЗ. – Вид. 2-ге, перероб. та допов. / За ред. **Л.О. Пучкова** і **Г.Г. Півняка**. – Д.: Нац. гірн. ун-т, 2010. – Т.1. – 503 с.
4. **Синчук О.Н.** Оценка состояния и определения тактики повышения эффективности работы участковых подстанций железорудных шахт [Текст] / **О.Н. Синчук, Р.А. Лесной, Р.А. Пархоменко, А.Н. Яловая** // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Збірник наукових праць кіровоградського національного технічного університету. – Кіровоград, 2012. - Випуск 25, частина II. – С.248 – 254.
5. **Синчук О.Н.** Оценка потенциала и тактика повышения электроэнергоэффективности подземных железорудных производств [Текст] / **Синчук О.Н., Синчук И.О., Гузов Э.С., Баулина М.А., Яловая А.Н.** // Технологический аудит и резервы производства. – Харьков: ЧП «Технологический центр». – 2014. – с.34 – 39.
6. **Праховник А.В.** Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий [Текст] / **А.В. Праховник, В.П. Розен, В.В. Дегтярев** – М.: Недра, 1985 - 232 с.

Рукопис подано до редакції 18.04.16

УДК 629.423.2-52

**И.О. СИНЧУК**, канд. техн. наук, доц., **А.С. САМОХИНА**, магистрант  
Криворожский национальный университет

#### **ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ПРИВОДА В ЭЛЕКТРОВОЗАХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТЯГОВЫХ СВОЙСТВ**

В настоящее время электровозный транспорт является наиболее распространенным видом транспорта на горных предприятиях. Так на шахтах с его помощью осуществляется до 70% перевозок, а на рудниках до 100%. Столь широкое распространение электровозного транспорта обусловлено тем, что последний наиболее экономичен при больших длинах транспортировки более чем другие виды рудничного транспорта [1]. Электровозы могут применяться при различных условиях эксплуатации, в том числе на шахтах опасных по газу и пыли. Данный вид транспорта отличается сравнительно малой энергоемкостью, хорошей приспособляемостью к автоматизации, практиче-

ски отсутствует вредное влияние на окружающую природную среду. Для электровозного транспорта характерны также относительные мобильность и надежность, обусловленная тем, что неисправность одного локомотива не ведет к существенному снижению производительности транспортной системы, в отличие, например, от конвейерного транспорта. Имеется возможность использования электровозного транспорта в качестве средства усреднения горной массы [2].

**Ключевые слова:** автоматизация, электровоз, привод, комбинированный, мощность

**Проблемы та их связь с научными и практическими заданиями.** Преимущества электровозного транспорта способствовали чрезвычайно широкому его распространению как в качестве основного (используемого непосредственно для транспортирования горной массы), так и в качестве вспомогательного (используемого для доставки людей и оборудования) на горных предприятиях при открытой и подземной разработке месторождений. Экономичность, надежность и безопасность функционирования электровозного транспорта в значительной мере сказывается на эффективности работы всего горного предприятия в целом, следовательно, совершенствование электромеханического оборудования, тяговой сети, систем диспетчерского управления, средств автоматизации является актуальным.

Несмотря на ряд достоинств, электровозный транспорта, в его существующем состоянии, характеризуется рядом неблагоприятных явлений, а именно:

Электромеханическое оборудование часто выходит из строя и срок службы его ниже нормативного [2], в частности:

срок службы тяговых двигателей с в среднем составляет (4-5) мес. при гарантийном сроке службы 6 лет [3];

бандажи колес электровозов истираются за 0,5 года вместо положенных 3 лет;

контакты прямого действия служат 1 год, вместо положенных 5 лет;

сцепные устройства на предприятиях горнорудной промышленности служат не более 0,5 года.

Реальное количество поездов на откаточном горизонте в 1,5-2 раза превышает расчетное, загрузка транспортных ветвей не равномерна и подвижной состав используется не оптимально [3].

Существующие методы расчета контактной сети несовершенны, в связи с чем, часто вместо положенного по ПБ одностороннего питания на горных предприятиях применяется двухстороннее питание контактной сети.

Уровень травматизма достаточно высок, на электровозный транспорт приходится примерно 40 % от общего числа несчастных случаев на горном предприятии [4].

Токи при пуске значительно превышают расчетные [5].

Наблюдается пробуксовка колес электровозов, когда разница угловой скорости колес электровоза приведенной к ободу колеса и скорости поезда составляю до 40 % при пуске и до 5 % при установившемся движении [6].

Указанные факторы приводят к увеличению эксплуатационных затрат, снижают надежность и безопасность работы электровозного транспорта.

**Анализ исследований и публикаций.** В результате анализа имеющегося опыта использования линейных двигателей на транспорте, можно сделать вывод, что использование линейного привода в качестве основного и единственного привода транспортных средств с относительно низкой скоростью движения (к которым относятся в том числе и рудничные электровозы) не целесообразно, особенно при больших длинах транспортировки и относительно большой величины воздушного зазора между индуктором и реактивным элементом.

**Постановка задания.** Таким образом, представляется разумным использование комбинированной системы привода рудничных электровозов состоящей из основного привода традиционной конструкции и работающего в длительном режиме и дополнительного привода от ЛД, работающего в импульсном режиме, включаясь при снижении тяговых свойств основного привода и отключающегося при их восстановлении. Такая система обладает достоинствами обоих типов привода, используя их в наиболее рациональном режиме. К достоинствам комбинированного привода можно отнести:

меньшая зависимость силы тяги электровоза от уклонов пути и колебаний коэффициента сцепления, чем у традиционных электровозов;

принципиальная возможность использования ЛД в качестве антипробуксовочного или тормозного устройства;

так как ЛД работает в импульсном режиме, то его низкие энергетические показатели и проблемы охлаждения выражены в меньшей степени чем при длительном режиме;

в ряде работ [7] показана эффективность именно импульсного режима работы ЛАД;

возможно использование ЛД относительно малой мощности, при этом можно использовать в качестве вторичного элемента существующие рельсы (при установке ЛД на экипаже) или относительно дешевый вторичный элемент из ферромагнитного материала;

вторичный элемент (или индукторы при их стационарной установке) могут быть установлены не на всей длине пути, а только на отдельных участках (в местах погрузки/ разгрузки, на участках с большим уклоном пути, на поворотах и т.д.), что приводит уменьшению капитальных затрат по сравнению с только линейным приводом;

имеется возможность использования ЛД для модернизации существующего парка электро-возов без существенных изменений в путевой структуре.

**Изложение материала и результатов.** Функциональная схема автоматизированного комбинированного привода рудничного электровоза имеет вид, представленный на рис. 1.

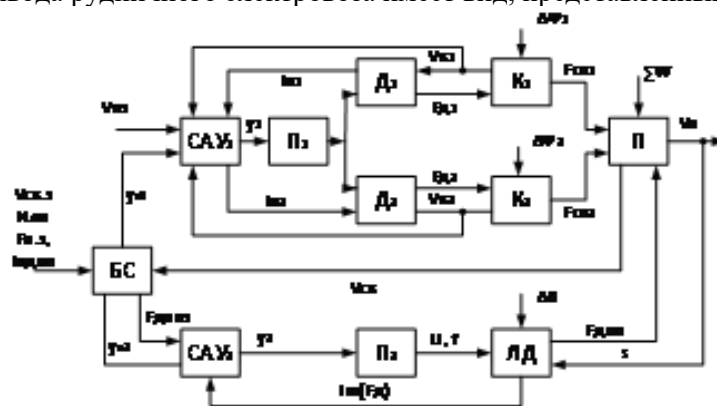


Рис.1. Функциональная схема автоматизированного комбинированного привода рудничного электровоза

Схема включает в себя:

основной привод, включающий в себя: колесные пары  $K_1$  и  $K_2$ , тяговые двигатели постоянного тока  $D_1$  и  $D_2$ , преобразователь сигналов управления в изменение напряжения или сопротивления якорной цепи тяговых двигателей (в различных существующих системах используются: контроллер или широтноимпульсный преобразователь на электровозе, тиристорный преобразователь на тяговой подстанции) -  $П_1$  и систему автоматического управления САУ<sub>1</sub>;

дополнительный привод, включающий в себя: линейный электродвигатель ЛД, автономный инвертор  $П_2$  и систему управления САУ<sub>2</sub>;

рудничный поезд  $П$ , являющийся общей нагрузкой приводов;

блок согласования БС.

Задающим воздействием является сигнал задания скорости поезда  $V_{пз}$ , возмущающими сигналами -  $\Sigma W$ ,  $\Delta\psi_1$ ,  $\Delta\psi_2$ ,  $\Delta\delta$ , соответственно, сопротивление движению поезда, изменение коэффициента сцепления колесных пар  $K_1$  и  $K_2$ , изменение воздушного зазора между индуктором ЛД и вторичным телом (третьим рельсом).

Система управления основным приводом формирует сигнал управления  $u_1$  в функции сигналов тока тяговых двигателей  $I_{a1}$ ,  $I_{a2}$  и скоростей колесных пар  $V_{k1}$ ,  $V_{k2}$  (получаемых с соответствующих датчиков), при этом работа системы управления аналогична работе соответствующей системы в существующем приводе [8]. Сигнал  $u_1$  преобразуется в соответствующее изменение напряжения питания  $U_a$  или сопротивления  $R_a$  якорной цепи тяговых двигателей, что приводит к изменению сил тяги тяговых двигателей  $F_{d1}$  и  $F_{d2}$ , приложенных к колесным парам, что приводит к изменению сил сцепления  $F_{с11}$  и  $F_{с12}$ , приводящим в движение поезд.

Система управления САУ<sub>2</sub> реализует систему прямого управления силой тяги ЛД (система строится аналогично системам прямого управления моментом в обычных асинхронных двигателях [5]), формируя управляющие воздействия  $u_2$  на автономный инвертор, таким образом, чтобы величина дополнительной силы тяги  $F_{дон}$  стремилась к заданной величине  $F_{донз}$  при пе-





ний, медь) не более (1,5-3) мм, дальнейшее увеличение проводящего слоя не дает существенного прироста энергетических показателей, однако существенно увеличивает стоимость привода.

Зависимость силы тяги индуктора от величины воздушного зазора для низкоскоростных ЛД с ферромагнитным и составным вторичным телом имеет экспоненциальный характер [10], при этом для получения приемлемых значений энергетических показателей величина воздушного зазора должна находиться в пределах 0,5-20 мм.

**Выводы и направление последующих исследований.** Предложено построение системы комбинированного привода рудничного электровоза и его системы управления на основе иерархического принципа подчиненного управления силой тяги дополнительного привода в функции нагрузки основного, при этом основной привод является ведомым, а дополнительный - ведущим.

Учитывая имеющиеся отличия электромеханических характеристик основного и дополнительного приводов для обеспечения их эффективной совместной работы используется блок согласования, формирующий управляющее воздействие на дополнительный привод в зависимости от сигналов обратных связей по току приводов, скорости поезда и скорости пробуксовки.

Разработана функциональная схема, реализующая указанный принцип управления и соответствующая ей структурная схема автоматизированного комбинированного привода рудничного электровоза, включающая в себя: основной привод традиционной конструкции; дополнительный привод на основе ЛД, получающий питание от низкочастотного автономного инвертора с частотно-токовым управлением; блок согласования, формирующий управляющее воздействие на систему управления дополнительным приводом, обеспечивая прямое управление силой тяги ЛД, при этом критерием управления является поддержание рационального соотношения сил тяги приводов.

В дальнейшем получить выражение для оптимального, по условию максимума экономической эффективности, увеличения массы поезда за счет применения комбинированного привода, позволяющее определить рациональную величину соотношения часовых сил тяги дополнительного и основного приводов.

Разработать методику и алгоритм расчета рациональных параметров дополнительного привода, учитывая реальные условия работы приводов на каждом из участков диаграммы движения, учитывая имеющиеся ограничения основного и дополнительного приводов по условию нагрева тяговых двигателей.

#### *Список литературы*

1. Спицын А.Д. Оптимизация шахтного локомотивного транспорта. Алма-Ата: «Наука», КазССР, 1981.
  2. Кордаков В.Н. Оптимизация параметров рудничного автоматизированного электровозного транспорта. Известия вузов: Горный журнал, 1988, № 5.
  3. Методика определения экономических показателей эффективности транспортных систем угольных шахт//В.А. Пономаренко, Е.В. Макаров, - Донецк: ДГИД970.
  4. Бунг П.К. Некоторые замечания по расчету трехфазных линейных электродвигателей с малыми синхронными скоростями// Электродвигатели с разомкнутым магнитопроводом / Новосибирск: НЭТИ, 1975, с. 9-24.
  5. Банников Е.В, Кордаков В.Н. Анализ причин повреждаемости тяговых двигателей рудничных электровозов на шахте «Ленинградская».
  6. Андреев Е.А., Шаронов С.В. / Система автоматического пуска привода рудничного электровоза. // СПбГТИ. - СПб. - 1998. — Рус. - ДепВИНИТИ. - №3279-B98.
  7. Пассажирские монорельсовые дороги", В.В. Чиркин, О.С. Петренко, А.С. Михайлов, Ю.М. Галонен. М., "Машиностроение", 1969г., 240с.
  8. Кордаков В.Н. Определение закона управления рудничным электровозом при трогании поезда с места. Известия вузов: Горный журнал, 1980, № 1.
  9. Методика определения экономических показателей эффективности транспортных систем угольных шахт//В.А. Пономаренко, Е.В. Макаров, - Донецк: ДГИД970.
- Рукопись поступила в редакцию 18.04.16

УДК 621.316.13

С.П. ПЛЄШКОВ, канд. техн. наук, доц., П.Г. ПЛЄШКОВ, канд. техн. наук, проф.,  
В.В. ЗІНЗУРА, канд. техн. наук, Кіровоградський національний технічний університет

## ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ РЕЖИМУ РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ДОПОМОГОЮ СИМЕТРОКОМПЕНСУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ

Запропоновано підхід до керування режимами реактивних навантажень розподільчих електричних мереж номінальною напругою 6-10 кВ шляхом використання симетрокомпенсуючих пристроїв. Розроблено структурну схему системи автоматичного керування режимами реактивної потужності розподільчих електричних мереж, яка базується на розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації знайденому методом наближення до утопічної точки в просторі критеріїв. Проведене комп'ютерне моделювання показало перевагу запропонованої системи автоматичного керування над існуючими.

**Ключові слова:** керування, оптимальний, електромережа, симетрокомпенсуючий пристрій, ефективність

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** На сучасному етапі розвитку електричних мереж важливим є питання підвищення ефективності та економічності їх роботи. Особливо гостро ця проблема стоїть для розподільчих електричних мереж (РЕМ) номінальною напругою 10-35 кВ. Це пов'язано з тим, що в зазначених РЕМ, зважаючи на їх велику протяжність, рівень втрат електричної енергії є досить високим. Зниженню ефективності роботи РЕМ також сприяє понаднормове зниження рівнів показників якості електроенергії за рахунок наявності потужних промислових споживачів із різкозмінним та несиметричним графіком електричних навантажень. Найбільш ефективним способом зниження втрат електроенергії в РЕМ є впровадження заходів з компенсації реактивної потужності. Найбільш поширеним в РЕМ технічним засобом компенсації реактивної потужності є батареї статичних конденсаторів (БСК).

Як відомо, БСК здійснюють багатофункціональний вплив на параметри режиму електричної мережі, а саме на рівень споживання реактивної потужності, усталене відхилення напруги та на рівні несиметрії напруг (у випадку варіанту конструктивного виконання БСК з регулюючими (симетрувальними) секціями). Такі симетрокомпенсуючі пристрої набули досить широкого розповсюдження в РЕМ через їх високу ефективність. Проте, зважаючи на їх багатофункціональний вплив не лише на рівні компенсації реактивної потужності та несиметрії напруг, але й на рівень усталеного відхилення напруги, за певних обставин в РЕМ можуть виникнути такі випадки, коли при ввімкненні симетрокомпенсуючого пристрою буде спостерігатись понаднормове значення усталеного відхилення напруг [1]. Це, в свою чергу, призводить до появи додаткових збитків від зниження якості електроенергії і тим самим до зниження ефективності роботи РЕМ.

**Аналіз досліджень та публікацій.** В роботах [1-2] запропоновано систему автоматичного керування (САК) симетрокомпенсуючими пристроями, що враховує їх вплив на рівні усталеного відхилення напруг. Проте, область застосування запропонованої в [1-2] САК обмежується лише РЕМ номінальною напругою 0,4 кВ (мережі з глухозаземленою нейтраллю), і тому запропоновані в [1-2] САК не можуть бути застосовані для симетрокомпенсуючих пристроїв, встановлених в РЕМ номінальною напругою 6-10 кВ (мережі з ізольованою нейтраллю). В роботах [1-3] пропонується розглядати задачу одночасного зниження рівня споживання реактивної потужності та рівнів усталеного відхилення і несиметрії напруг як задачу багатокритеріальної оптимізації. Розроблені в [1-3] алгоритми роботи САК симетрокомпенсуючими пристроями базуються на реалізації розв'язків зазначеної задачі багатокритеріальної оптимізації, знайдених методом головного критерію. Як показано в роботі [4], для вирішення подібного класу задач з успіхом можуть застосовуватись і інші методи вирішення задач багатокритеріальної оптимізації.

**Постановка завдання.** Задача розробки нових методів та засобів підвищення ефективності роботи РЕМ, які з одного боку, були б досить ефективними, а з іншого – не вимагали б значних капіталовкладень є досить актуальною. Одним із шляхів вирішення даної задачі є удосконален-

ня систем автоматичного керування симетрокомпенсуючими пристроями з метою врахування їх впливу не лише на рівні споживання реактивної потужності та несиметрії напруг, але і на рівні усталеного відхилення напруг в РЕМ.

**Викладення матеріалу та результати.** Як було зазначено вище, задачу одночасного зниження рівня споживання реактивної потужності та рівнів усталеного відхилення та несиметрії напруг найдоцільніше розглядати як задачу багатокритеріальної оптимізації. Кількість критеріальних функцій в постановці даної задачі залежить від режиму роботи нейтралі РЕМ. Так, для РЕМ номінальною напругою 10 кВ (мережа з ізольованою нейтраллю) характерна наявність лише симетричних складових напруг прямої та зворотної послідовності. Тому, для цього випадку, задачу керування симетро-компенсуючим пристроєм можна записати в наступному вигляді

$$\begin{cases} \operatorname{tg} \varphi(\mathbf{X}) = \frac{Q_c(\mathbf{X})}{P_c(\mathbf{X})} \rightarrow \min; \\ |\Delta U_1(\mathbf{X})| = |U_1(\mathbf{X}) - U_{\text{ном}}| \rightarrow \min; \\ U_2(\mathbf{X}) \rightarrow \min; \\ \mathbf{X} \in \Omega, \end{cases} \quad (1)$$

де  $\mathbf{X} = (x_{AB}, x_{BC}, x_{CA})$  – вектор реактивних опорів фаз симетрокомпенсуючого пристрою (вектор керування);  $\operatorname{tg} \varphi(\mathbf{X})$  – коефіцієнт реактивної потужності;  $P_c(\mathbf{X})$ ,  $Q_c(\mathbf{X})$  – відповідно активна та реактивна потужності, що споживаються з живлячої мережі;  $U_1(\mathbf{X})$  – напруга прямої послідовності;  $\Delta U_1(\mathbf{X})$  – різниця значень модуля напруги прямої послідовності та номінальної напруги (пропорційна усталеному відхиленню напруги);  $U_{\text{ном}}$  – номінальна напруга мережі;  $U_2(\mathbf{X})$  – напруга зворотної послідовності;  $\Omega = \mathbf{R}^3 | x_{i\min} \leq x_i \leq x_{i\max}, i = AB, BC, CA$  – область допустимих значень  $\mathbf{X}$ , яка визначається діапазоном регулювання симетрокомпенсуючого пристрою (допустимий простір керування);  $x_{i\min}$ ,  $x_{i\max}$  – відповідно мінімальне та максимальне значення реактивних опорів симетрокомпенсуючого пристрою для кожної з фаз.

Як показано в роботі [4], найбільш доцільним методом розв'язку задач багатокритеріальної оптимізації, подібних до задачі (1) є метод наближення до утопічної точки в просторі критеріїв, який проводиться в два етапи:

*1 етап.* Оптимізацією окремих критеріїв визначаються координати утопічної точки  $Q_{\text{ут}} = (\operatorname{tg} \varphi_{\text{ут}}, \Delta U_{1\text{ут}}, U_{2\text{ут}})$  в просторі критеріїв  $\{\mathbf{Q}\} \subset \mathbf{R}^3$ .

*2 етап.* Шляхом розв'язку задачі скалярної оптимізації відстані  $\rho$  від утопічної точки до множини парето-оптимальних розв'язків в просторі критеріїв знаходяться координати розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації  $\mathbf{X}^*$  в просторі управління  $\{\mathbf{Q}\} \subset \mathbf{R}^3$ .

Результати проведених досліджень показали, що підхід до знаходження аналітичних виразів для координат утопічних точок, який запропонований в роботі [5], є недоцільним. Це пов'язано з дуже великою громіздкістю отриманих аналітичних виразів, що практично унеможливило їх застосування. Тому, для знаходження координат утопічних точок для задачі (1) найдоцільніше скористатись одним із числових методів вирішення задач скалярної умовної оптимізації функції багатьох змінних.

Кінцевий розв'язок задачі (1) засновується на знаходженні мінімальної евклідової відстані від утопічної точки до множини парето-оптимальних розв'язків

$$\begin{cases} \left[ \left( \frac{\operatorname{tg} \varphi(\mathbf{X}) - \operatorname{tg} \varphi_{\text{ут}}}{K_{\operatorname{tg} \varphi}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta U_1(\mathbf{X}) - \Delta U_{1\text{ут}}}{K_{\Delta U_1}} \right)^2 + \right. \\ \left. \left( \frac{U_2(\mathbf{X}) - U_{2\text{ут}}}{K_{U_2}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \rightarrow \min; \\ \mathbf{X} \in \Omega. \end{cases} \quad (2)$$

де  $K_{\operatorname{tg} \varphi}$ ,  $K_{\Delta U_1}$ ,  $K_{U_2}$  – вагові коефіцієнти, що враховують пріоритетність кожного з критеріїв.

Узагальнена структурна схема САК симетрокомпенсуючим пристроєм, в основу якої покладено описані вище правила знаходження оптимального вектора керування, представлена на рис. 1.

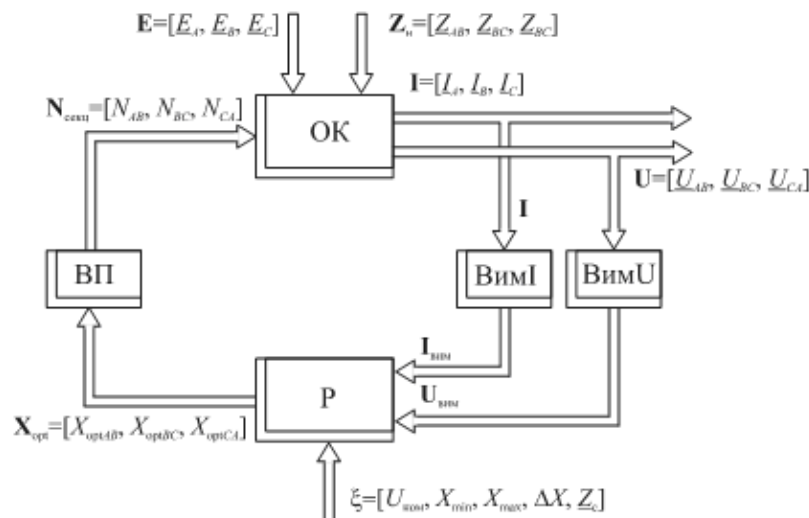


Рис. 1. Узагальнена структурна схема САК симетро-компенсувальним пристроєм

На рис. 1: ОК - об'єкт керування; *ВимІ* - вимірювач комплексних значень струмів; *ВимU* - вимірювач комплексних значень напруг; *Р* - регулятор, що реалізує описаний вище алгоритм знаходження оптимального вектора керування; *ВП* - виконавчий пристрій, що забезпечує по-фазну зміну реактивних опорів БСК;  $E=[E_A, E_B, E_C]$  - матриця фазних е.р.с. живлячої системи;  $Z_n=[Z_{nAB}, Z_{nBC}, Z_{nCA}]$  [матриця комплексів фазних навантажень];  $I=[I_A, I_B, I_C]$  [матриця комплексів струмів навантажень];  $U=[U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}]$  [матриця комплексів напруг];  $I_{\text{вим}}, U_{\text{вим}}$  [відповідно матриця вимірюваних значень комплексів струмів та напруг];  $X_{\text{opt}}=[X_{\text{optAB}}, X_{\text{optBC}}, X_{\text{optCA}}]$  - оптимальний вектор керування (вектор реактивних опорів фаз БСК);  $N_{\text{секц}}=[N_{AB}, N_{BC}, N_{CA}]$  - вектор номерів регулюючих секцій кожної з фаз симетрокомпенсуючого пристрою;  $\xi=[U_{\text{ном}}, X_{\text{min}}, X_{\text{max}}, \Delta X, Z_c]$  [вектор задаючих параметрів];  $U_{\text{ном}}$  - номінальна напруга мережі;  $X_{\text{min}}, X_{\text{max}}$  - відповідно значення мінімального та максимального реактивного опору симетрокомпенсуючого пристрою;  $\Delta X$  - значення реактивного опору, що відповідає ступені регулювання симетрокомпенсуючого пристрою;  $Z_c$  - комплексний опір фази живлячої системи.

Комп'ютерну модель Matlab/Simulink, створену на основі запропонованої структурної схеми САК симетро-компенсувальним пристроєм, зображено на рис. 2.

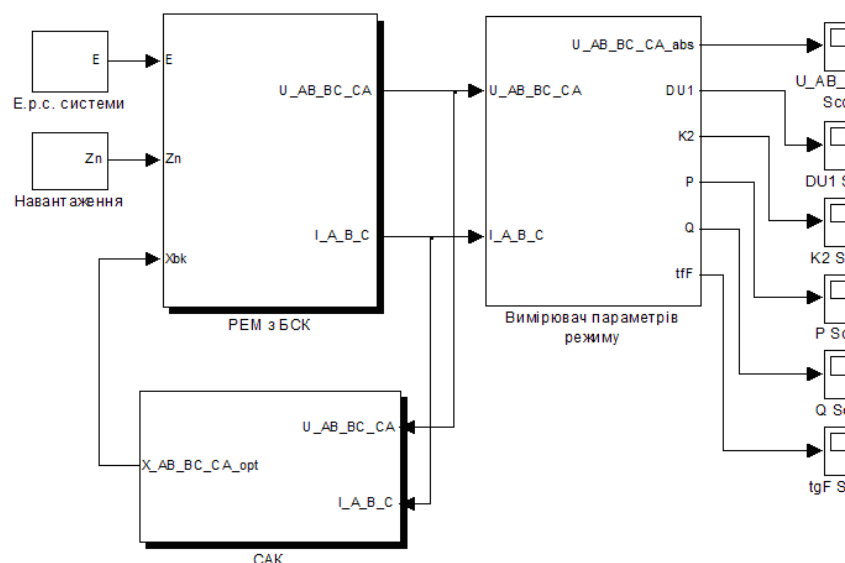


Рис. 2. Узагальнена комп'ютерна модель Matlab/Simulink САК симетро-компенсувального пристрою

На рис. 2: "Е.р.с. системи" - модель е.р.с. живлячої мережі, виходом якої є комплекси е.р.с. в фазах А, В, С; "Навантаження" - модель задання електричних навантажень; в якості вихідних даних для моделювання були взяті реальні часові діаграми активних та реактивних навантажень, що були виміряні протягом доби на одній із підстанцій ПАТ «Кіровоградобленерго» з допомогою сертифікованого аналізатора мережі FLUKE 1744 Мемобокс; "РЕМ з БСК" - модель РЕМ, що містить симетрокомпенсуючий пристрій (модель об'єкту керування); "Вимірювач параметрів режиму" - модель вимірювача параметрів режиму (лінійних напруг  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ , фазних струмів  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ , активної  $P_c$  та реактивної  $Q_c$  потужностей, коефіцієнта реактивної потужності  $\text{tg}\phi$ , усталеного відхилення напруг  $\Delta U_1$  та коефіцієнту несиметрії напруг по зворотній послідовності  $K_2$ ); "САК" - модель САК симетро-компенсувальним пристроєм, в основу якої покладено описані вище алгоритми знаходження розв'язків задачі багатокритеріальної оптимізації методом наближення до утопічної точки в просторі критеріїв.

Модель блоку "САК" зображена на рис. 3.

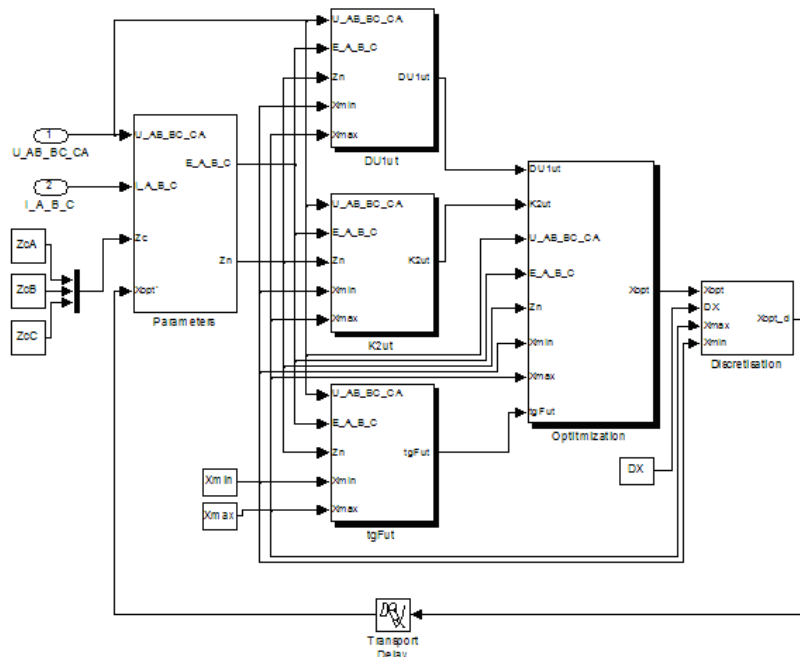


Рис. 3. Модель Matlab/Simulink блоку «САК»

На рис. 3: "Parameters" - блок визначення параметрів моделі об'єкту керування, що не піддаються безпосередньому вимірюванню (опір навантаження, е.р.с. системи); "tgFut", "DU1ut", "K2ut" - блоки визначення координат утопічної точки  $Q_{yt}=(\text{tg}\phi_{yt}, \Delta U_{1yt}, U_{2yt})$ , для визначення яких було застосовано безградієнтний числовий метод вирішення задач скалярної умовної оптимізації функції багатьох змінних, а саме метод Нелдера-Міда; "Optimisation" - блок визначення кінцевого розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації згідно виразу (2); "Transport Delay" - блок затримки сигналу на 1 крок розрахунку; "Discretisation" - блок дискретизації оптимального вектора керування; "Xmin", "Xmax" - блоки, що задають мінімальне та максимальне значення опорів фаз симетрокомпенсуючого пристрою; "DX" - блок, що задає значення реактивного опору, що відповідає ступені регулювання симетрокомпенсуючого пристрою.

Для дослідження ефекту від застосування запропонованої в роботі САК симетро-компенсувальним пристроєм було проведено порівняльне комп'ютерне моделювання роботи запропонованої та базової САК.

В якості базової САК було обрано САК симетро-компенсувальним пристроєм, яка здійснює керуючі впливи для досягнення одночасного зниження рівнів споживання реактивної потужності та рівня несиметрії напруг по зворотній послідовності без урахування впливу симетро-компенсувального пристрою на усталене відхилення напруги.

Результати комп'ютерного моделювання базової та запропонованої САК наведено на рис. 4-6 та у табл. 1.

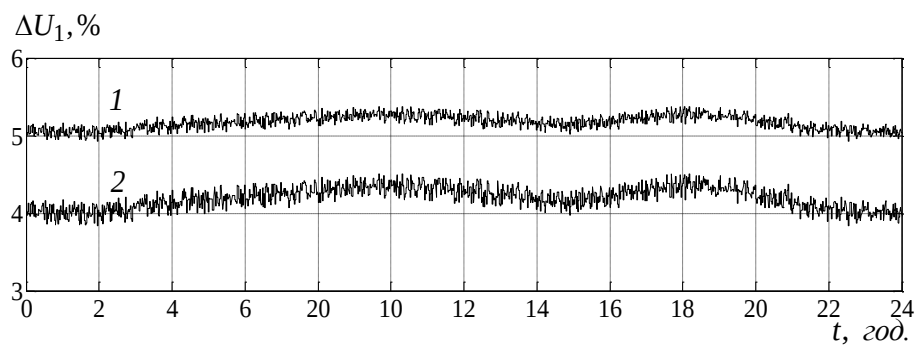


Рис. 4. Графіки зміни  $\Delta U_1$  для базової та запропонованої САК:  
1 – базова САК; 2 – запропонована САК

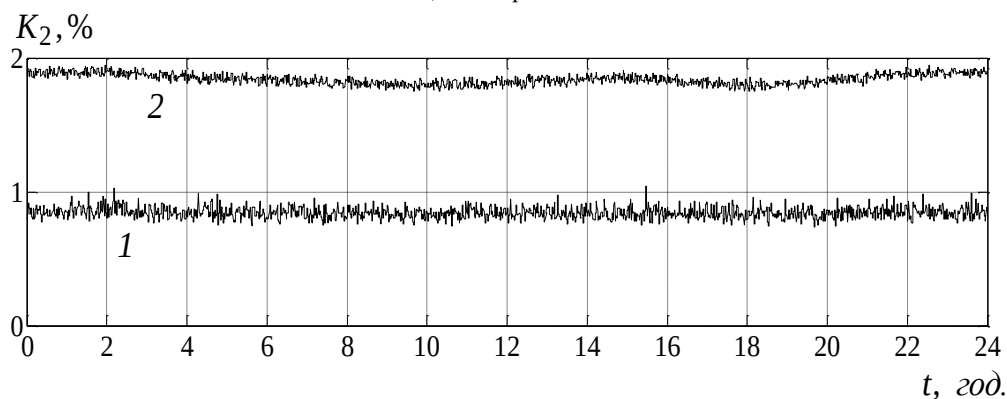


Рис. 5. Графіки зміни  $K_2$  для базової та запропонованої САК:  
1 – базова САК; 2 – запропонована САК

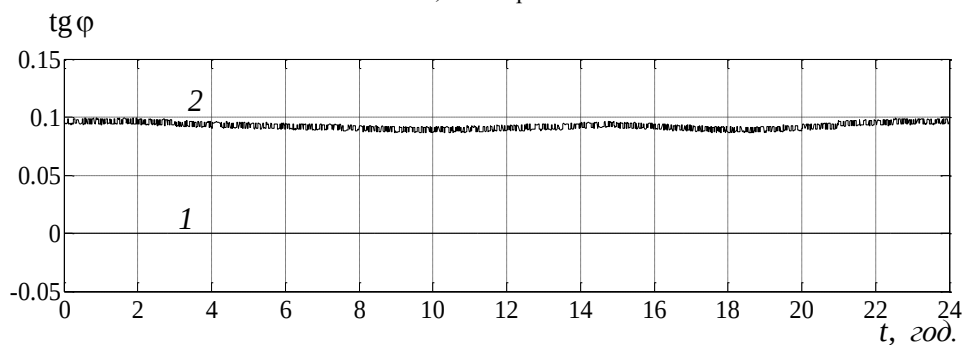


Рис. 6. Графіки зміни  $\operatorname{tg} \varphi$  для базової та запропонованої САК:  
1 – базова САК; 2 – запропонована САК

Таблиця 1

Результати статистичної обробки  $\Delta U_1$  та  $K_2$ 

| Параметр режиму                                  | Математичне очікування, $M$ (% в. од.) | Середньо-квдратичне відхилення, $\sigma^2$ | Інтегральна ймовірність потрапляння в нормально-допустимі (задані) межі, $P$ |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Базова САК симетро-компенсувальним пристроєм     |                                        |                                            |                                                                              |
| $U_1$                                            | 5,171                                  | 0,093                                      | 0,04                                                                         |
| $K_2$                                            | 0,843                                  | 0,044                                      | 1,00                                                                         |
| tg                                               | 0,001                                  | $3,31 \cdot 10^{-5}$                       | 1,00                                                                         |
| Розроблена САК симетро-компенсувальним пристроєм |                                        |                                            |                                                                              |
| $U_1$                                            | 4,198                                  | 0,143                                      | 1,00                                                                         |
| $K_2$                                            | 1,841                                  | 0,040                                      | 1,00                                                                         |
| tg                                               | 0,92                                   | 0,003                                      | 1,00                                                                         |

Як видно з наведених результатів комп'ютерного моделювання базової та розробленої САК (рис. 4-6) а також з результатів подальшої їх статистичної обробки (табл. 1), запропонована САК на відміну від базової не допускає керувань, за яких спостерігалися б понаднормові значення усталеного відхилення напруги в РЕМ ( $\pm 5\%$ ).

При цьому значення двох інших параметрів режиму - коефіцієнту несиметрії напруг по зворотній послідовності  $K_2$  та коефіцієнту реактивної потужності  $\text{tg}\varphi$  як у випадку моделювання базової САК, так і у випадку моделювання запропонованої САК не перевищують нормально допустимого для  $K_2$  ( $K_{2\text{нд}}=2\%$ ) та заданого для  $\text{tg}\varphi$  ( $\text{tg}\varphi_{\text{зад}}=0,15$ ) значень.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** У результаті проведених наукових досліджень можна зробити наступні висновки:

Задачу керування симетрично-компенсуючим пристроєм, що працює в РЕМ номінальною напругою 6-10 кВ найдоцільніше розглядати як задачу багатокритеріальної оптимізації.

Для вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації одночасного зниження рівня споживання реактивної потужності та рівнів усталеного відхилення та несиметрії напруг найдоцільніше застосовувати метод наближення до утопічної точки в просторі критеріїв.

Результати комп'ютерного моделювання розроблених САК, в основу роботи яких покладено знайдені розв'язки задачі багатокритеріальної оптимізації підтвердили перевагу запропонованої САК над базовою.

Так, при практично рівних значеннях рівня компенсації реактивної потужності та коефіцієнту несиметрії напруг, інтегральна ймовірність потрапляння в нормально допустимі межі усталеного відхилення напруг для розробленої моделі виявилась на 96 % більшою, ніж для базової моделі.

#### Список літератури

1. Червінська Т.М. Математична модель керування реактивною потужністю в електричних мережах з несиметричною напругою / Л. Б. Терешкевич, Т.М. Червінська // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – 2010. – №3(62) Частина 1. – С. 161 – 164.
2. Червінська Т.М. Математичні моделі керування реактивною потужністю та несиметрією напруги в електричній мережі / Терешкевич Л. Б., Червінська Т.М., Кузьменко М.В. // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Выпуск 32. – 2010.
3. Червінська Т.М. Керування реактивною потужністю в умовах несиметрії напруги мережі / Л.Б. Терешкевич, Т.М. Червінська // Промелектро. – 2008. – №5. – С. 16–20.
4. Зінзура В.В. Методи розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги в електричних мережах. // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація / . – Вип. 25.Ч.1 – Кіровоград: КНТУ, 2012. С. 350-360.
5. Плешков П. Г. Теоретичні засади оптимального керування пристроєм РПН силового трансформатора за векторним критерієм. / П. Г. Плешков, В.В. Зінзура, М. В. Кубкін // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація / . – Вип. 24.Ч.2 – Кіровоград: КНТУ, 2011. С. 164-173.

Рукопис подано до редакції 16.04.16

УДК 621.926: 524.16

Є.К. БАБЕЦЬ, канд. техн. наук, проф., В.П. ХОРОЛЬСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.,  
Т.В. ХОРОЛЬСЬКА, НДГРІ ДВНЗ «Криворізький національний університет

#### МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВНУТРІШНЬОМЛИННИХ НАВАНТАЖЕНЬ КУЛЬОВИХ МЛИНІВ БАГАТОСТАДІЙНОГО ПРОЦЕСУ ЗБАГАЧЕННЯ

Використано математичний апарат теорії катастроф для ідентифікації складного динамічного процесу здріблення, який дозволяє враховувати варіації нелінійних збурень текстурних характеристик сирової руди, її міцності і змінних режимів роботи устаткування та запропоновано систему керування завантаженням руди в кульові млини першої, другої, третьої стадії з врахуванням геометрії внутрішньомлинного навантаження, оцінки в часі аварійних ситуацій. Розроблено метод ідентифікації геометрії внутрішньомлинного завантаження кульових млинів шляхом діагностики траєкторії об'ємного заповнення складного технологічного об'єкту, та визначенні параметри оптимального внутрішньомлинного завантаження з мінімізацією часу знаходження матеріалу в технологічному агрегаті, па-



раметри якого змінюються в часі. Доведено, що максимізації продуктивності кульових млинів шляхом оперативного моніторингу геометрії внутрішньомлиного завантаження робочого простору і визначення знову утвореного готового продукту, є головною умовою оптимізації питомих витрат електрики і проектних рішень, щодо розробки інтелектуальних систем управління електроприводами кульових млинів, насосних агрегатів та сепараторів.

**Ключові слова:** кульовий млин, геометрія заповнення, теорія катастроф, ідентифікація, управління

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Максимізація продуктивності кульових млинів шляхом оперативної оцінки геометрії заповнення його робочого простору і визначення знову утвореного готового продукту є важливою умовою оптимізації питомих витрат електроенергії і проектування робастних систем автоматизованого управління електроприводу кульових млинів та електроспоживання технологічної лінії збагачення. Наукова значимість таких досліджень пов'язана з енергоефективністю складних динамічних процесів подрібнення сирової руди у внутрішньомлиному просторі і підсиленням процесів хаотичних коливань рудного навантаження з врахуванням властивостей гетерогенного середовища і проектування інтелектуальних систем управління електроспоживання збагачувальних фабрик [1].

**Аналіз досліджень і публікацій.** Процесам подрібнення руди в кульових млинах першої, другої а третьої стадій збагачення присвячені дослідження українських вчених Ю.Г. Качана [2], Є.В. Кочури [3], В.І. Корнієнко [4], О.М. Марюти [5], І.В. Новицького [6]. В своїх працях науковці довели що ці процеси є складними динамічними об'єктами керування з нестационарними параметрами й нелінійними залежностями і стохастичними змінними зі значними транспортними запізненнями, режими роботи яких чутливі до текстурних характеристик руди. Математична модель геометрії завантаження кульового млина описана за допомогою  $R$  – функцій [7], наведена в роботі [8], дозволила її автору виділити ефективні чинники, щодо оптимізації питомих витрат електроспоживання відносно виходу готового класу на зливні класифікатора. Таким чином, обґрунтування принципів розробки методів зменшення енерговитрат шляхом побудови моделей режимів роботи внутрішньомлиного завантаження та проектування автоматизованого електроприводу кульових млинів з метою зменшення на 20-30 % питомих витрат електроенергії є актуальною науковою проблемою.

**Постановка завдання.** Ефективність вирішуваної задачі можливо підвищити за рахунок використання теорії катастроф [9] з врахуванням опису складного процесу подрібнення руди з різним станом футеровки млина, куль і складного гетерогенного середовища. Якщо керування процесом здригання в кульових млинах першої стадії збагачення зведено до максимізації продуктивності по готовому класу  $Q_{\text{гот}} \rightarrow \max$ , при обмеженні потужності  $P_m \leq P_{m\max}$ , що відповідає мінімізації енергетичних витрат технологічної лінії збагачення, то траєкторія руху подрібнених частинок руди в млині буде пов'язана з геометрією завантаження млина і його оптимальним заповненням рудою [8].

**Метою статті** є подальший поглиблений аналіз режимів роботи кульових млинів на основі використання математичного апарату теорії катастроф, вивчення умов втрати стійкості режимів функціонування кульового млина з метою запобігання аварійних ситуацій.

**Викладання матеріалу та результати.** Розглянемо поведінку кульового млина першої стадії збагачення, який працює в замкнутому циклі з класифікатором і на вхід якого подається руда з різними текстурними характеристиками, і для якого втрата стійкості відповідає одній елементарній катастрофі. З метою ідентифікації складних нелінійних відображень, що відбуваються в кульовому млині від рівноваги, періодичних та квазіперіодичних режимів до біфуркацій та хаосу використаємо теорію катастроф і методи досліджень складних динамічних об'єктів за методикою авторів [10, 11]. Розпочнемо аналіз роботи кульового млина з оцінки змінних його стану до яких будемо відносити: три компоненти геометрії заповнення млина (ядро заповнення) з кутовою швидкістю  $x_1 = \omega_x$ ,  $x_2 = \omega_y$ ,  $x_3 = \omega_z$ ; продуктивність млина по сирій руді  $x_4 = 180 \div 250$  т/год, з циркуляційним навантаженням  $x_5 = 100 \div 150\%$ , управлінські параметри:  $u \in \mathbb{R}^2$ . У нашому випадку ми їх будемо позначати через  $U$ , як це прийнято в теорії управління [11] й будемо називати параметрами керування кульового млина і класифікатора першої стадії збагачення

$$\text{Отже} \quad u_1 = a_1 = \delta_e = \frac{1}{2}(\delta_{e1} + \delta_{e2}), \quad (1)$$

де  $\delta_{e1}$  - відхилення продуктивності кульового млина по сирій руді;  $\delta_{e2}$  - відхилення циркуляційного навантаження циклу кульовий млин-класифікатор

$$u_2 = a_2 = \delta_a = \frac{1}{2}(\delta_{\epsilon.3.} + \delta_{u.n.}), \quad (2)$$

де  $\delta_{\epsilon.3.}$  - відхилення геометрії заповнення кульового млина від оптимального;  $\delta_{u.n.}$  - відхилення щільності пульпи на злив млина від заданого значення.

Таким чином, маємо значення  $x \in R^5$ ,  $u (=a) \in R^2$ . Рівняння геометрії заповнення кульового млина має наступний вигляд

$$x_i = f_i(x, u), \quad i = 1.5, \quad u \in R^2 \quad (3)$$

Стаціонарне рішення якого відповідає умові

$$x_{i0} = 0, \quad i = 1.5, \quad u_{j0} = 0, \quad j = 1.2 \quad (4)$$

Розложимо систему рівнянь (3) в ряд Тейлора в околиці стаціонарної точки ( $x_0=0$ ,  $u_0=0$ ).  
Маємо

$$\dot{x}_1 = \sum_{j=1}^5 \left. \frac{df_i}{dx_j} \right|_0 x_j + \sum_{j=1}^2 \left. \frac{df_i}{du_j} \right|_0 u_j + \sum_{j=1}^3 \sum_{k>j}^3 \left. \frac{d^2 f_i}{dx_j dx_k} \right|_0 x_j x_k, \quad (5)$$

$$\dot{x}_1 = \sum_{j=1}^5 \left. \frac{df_i}{dx_j} \right|_0 x_j + \sum_{j=1}^2 \left. \frac{df_i}{du_j} \right|_0 u_j, \quad i = 4.5, \quad (6)$$

У розложенні (5), (6) перша сума представляє лінійні динамічні складові геометрії заповнення млина друга сума - лінійні управлінські впливи, третя сума (5) враховує інерційні параметри. Стаціонарне рішення системи (5, 6) знаходимо, вважаючи що

$$\dot{x}_1 = 0, \quad i = 1.5 \dots \dots$$

$$0 = \sum_{j=1}^5 \left. \frac{df_i}{dx_j} \right|_0 x_j + \sum_{j=1}^2 \left. \frac{df_i}{du_j} \right|_0 u_j + \sum_{j=1}^3 \sum_{k>j}^3 \left. \frac{d^2 f_i}{dx_j dx_k} \right|_0 x_j x_k, \quad i = 1, \quad (7)$$

$$0 = \sum_{j=1}^5 \left. \frac{df_i}{dx_j} \right|_0 x_j + \sum_{j=1}^2 \left. \frac{df_i}{du_j} \right|_0 u_j, \quad i = 4.5 \quad (8)$$

Позначимо для простоти

$$\left. \frac{df_i}{dx_j} \right|_0 x_j = F_{1j}, \quad i = 4.5; \quad j = 1.5 \quad (9)$$

$$\left. \frac{df_i}{du_j} \right|_0; \quad j = 1, 2; \quad i = 1, 5 \dots \quad (10)$$

$$\left. \frac{d^2 f_i}{dx_j dx_k} \right|_0 = B_{i,j_k} \dots \quad (11)$$

Два рівняння (7) (8) лінійні щодо змінних  $x_1, \dots, x_5$ . Використовуючи їх, виразимо змінні  $x_1, \dots, x_5$  з врахуванням (9) - (11) у вигляді лінійної комбінації управлінських параметрів і останніх змінних  $x_1, \dots, x_3$ . Підставляючи ці вирази в (7) одержимо три нелінійні алгебричні рівняння

$$\begin{cases} 0 = \sum_{j=1}^2 \overline{U}_{1j} u_j + \sum_{j=1}^5 \tilde{F}_{1j} x_j + B_{1,23} x_2 x_3; \\ 0 = \sum_{j=1}^2 \overline{U}_{2j} u_j + \sum_{j=1}^5 \tilde{F}_{2j} x_j + B_{2,31} x_3 x_1; \dots \\ 0 = \sum_{j=1}^2 \overline{U}_{3j} u_j + \sum_{j=1}^5 \tilde{F}_{3j} x_j + B_{3,12} x_1 x_2; \end{cases} \quad \dots \quad (12)$$

Константи  $\overline{U}_{1j}, \tilde{F}_{1j}$  одержані в процесі підстановки  $x_4$  і  $x_5$  в (7) шляхом приведення подібних членів. Інерційні члени не змінюються, так як в їх суму не входять змінні  $x_4, x_5 \dots$ . Обчислимо систему алгебраїчних нелінійних рівнянь (12). Виразимо із другого і третього рівнянь (12) змінні  $x_2, x_3$  через змінну  $x_1$

$$x_2 = \frac{Q_2(x, u)}{Q_1(x)}; \quad x_3 = \frac{Q_3(x, u)}{Q_1(x)}; \quad (13)$$

$$\text{де } Q_1(x) = (\overline{F}_{23} + B_{2,31} x_1) \left( \tilde{F}_{32} + B_{3,21} x_1 \right) - \tilde{F}_{22} \tilde{F}_{33} \dots \quad (14)$$

$$Q_2(x, u) = - \left( \sum_{j=1}^2 \tilde{U}_{3j} u_j + \tilde{F}_{31} x_1 \right) \left( \tilde{F}_{23} + B_{2,31} x_1 \right) + \tilde{F}_{33} \left( \sum_{j=1}^2 \tilde{U}_{2j} u_j + \tilde{F}_{21} x_1 \right) \quad (15)$$

$$Q_3(x, u) = - \left( \sum_{j=1}^2 \tilde{U}_{2j} u_j + \tilde{F}_{21} x_1 \right) \left( \tilde{F}_{12} + B_{2,31} x_1 \right) + \tilde{F}_{332} \left( \sum_{j=1}^2 \tilde{U}_{3j} u_j + \tilde{F}_{31} x_1 \right) \dots \quad (16)$$

Підставивши значення (13)-(16) у перше рівняння (12), одержимо наступне алгебраїчне рівняння

$$0 = \sum_{j=1}^2 \tilde{U}_{1j} u_j Q_1^2(x) + \tilde{F}_{11} x_1 Q_1^2(x, u) + \tilde{F}_{12} Q_1(x, u) Q_2(x, u) + \tilde{F}_{13} Q_1(x, u) Q_3(x, u) + B_{1,23} Q_2(x, u) Q_3(x, u) \quad (17)$$

Ці рівняння 5-ї ступені відносно змінної  $x = x_1$ . Відмітимо, що  $Q_1(x)$  не залежить від управлінських параметрів (управлінь).

Розглянемо конкретний приклад управління процесом подрібнення руди в кульовому млині, який працює в замкнутому циклі з класифікатором. Нехай рівняння (17) має вид (коли  $a = u$ )

$$0 = \sum_{K=0}^5 a_K x^K = \text{grad } \Phi(x; u) = \Phi_x'(x, u), \quad (18)$$

а параметрам  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, u_1, u_2$  відповідають значення, які визначенні експериментально [8]. Вираз (18) визначає двомірну багатобразність (гіперповерхність) поглинення в трьохмірний простір  $R^3$  з координатами  $(x; u_1; u_2)$ . Визначимо біфуркаційну множину  $J_B$  для функції  $\Phi(x; u)$ , тобто множину міри ноль в просторі управлінських параметрів  $(u \in R^2)$ , точки якої параметризують функцію  $\Phi(x; u)$  з виродженими критичними точками. Для цього нам необхідно знайти, перетин 2-х гіперповерхностей

$$\Phi_x'(x; u) = 0 \quad (19)$$

$$\Phi_{xx}''(x; u) = 0 \quad (20)$$

Використаємо змінну  $x$  для параметричного уявлення управлінських параметрів (управлінь)  $(u_1(x), u_2(x))$  на біфуркаційній множині  $J_B$ .

Запишемо

$$\Phi_x'(x; u) = \sum_{i=0}^s a_i(u) x^i = 0 \quad (21)$$

$$\Phi_{xx}'''(x; u) = \sum_{i=0}^s a_i(u) x^{(i-1)} = 0 \quad (22)$$

у матричному вигляді маємо

$$\begin{bmatrix} x^5 & x^4 & x^3 & x^2 & x^1 & 1 \\ 5x^4 & 4x^3 & 3x^2 & 2x & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & -21.8 \\ -250 & 0 & 0 \\ 0 & 50,3 & 358,9 \\ 541,2 & 0 & 0 \\ 0 & 117,5 & 0 \\ -230 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = 0 \quad (23)$$

Кожному значенню  $x$  в (23) відповідає пара сукупних рівнянь для управління  $(u_1, u_2, u_3)$  - відповідно  $u_1$  – завантаження кульового млина;  $u_2$  – витрати води в млин;  $u_3$  – витрати куль в млин. Рішення цих рівнянь єдине щодо умови, що визначник системи не дорівнює нулю. Параметричне уявлення кривих складки  $(u_1(x), u_2(x))$  наведено на рис. 1. Ця проекція багатообразності катастрофи на площину управлінських параметрів ( управління)  $u_1 = \delta_{e1}, u_2 = \delta_{f3}$ , формує біфуркаційну множину  $J_B$ . Множина  $J_B$  поділяє площину  $R^2$  управлінських параметрів на відкриті її перетинаючі області, в яких функція  $\Phi(x; u)$  має різні значення чисел (1, 2, 5) критичних точок, а динамічна система відповідно 1, 3, 5 стійких або нестійких станів рівноваги.

Розглянемо випадок, коли управління кульовим млином оператор виконує лише зміною продуктивності (навантаженням) по сирій руді...  $\delta_{e1}$ , тобто  $u_1$  при фіксованому типі руди і циркуляційному навантаженні, відповідно навантаження на млин складає  $u_1 = 270$  т/год, а оптимальна геометрія завантаження буде відповідати  $u_1 = \delta_{e1} = 40 \text{ м}^3 \text{ год}$  (перетин А) рис.1.

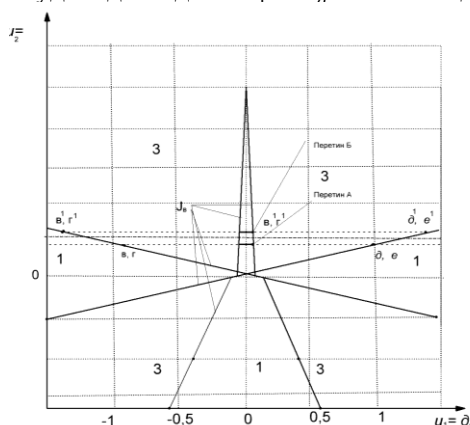


Рис. 1. Біфуркаційна множина  $J_B$  різноманіття катастрофи кульового млина на площині управлінських параметрів

Нехай  $u_1|_{t=0} = 0$  і ми починаємо довантажувати млин на  $\Delta u_1 = 5$  т/год  $\delta_{e1} = u_1$ . Спочатку зміна  $x_1(\omega_1)$  лінійно реагує на зміни  $u_1$  (рис. 2), але при досягненні циркуляційного навантаження  $\delta_{e1} = \text{const}$ , тобто при попадині на біфуркаційну множину  $J_B$  стрибком переходить на нижній лист (точка  $\delta$ , рис.2). На цьому листі стан кульового млина по координаті  $x = x_1 = \omega_x$  зовсім є некерованим (при збільшенні завантаження млин переходить в аварійний режим роботи). Іншими словами, якщо оператор захоче повернути кульовий млин в стан  $x = 0$ , зменшуючи  $u_1$  при  $u_2 = \text{const}$ , то він іще більше приведе до аварійної ситуації. Кульовий млин не буде реагувати на зміну  $u_1$  до тих пір, доти не досягне значень  $u_1 = 0$  (точка  $v$ , рис. 2), при якому виникає перехід стрибком на верхній лист.

Після цього збільшення  $u_1$  знову буде супроводжуватись відсутністю необхідної реакції аж до  $u_1 = 250$  т/год (точка  $\partial$ ), при якому точка  $x$  знову перейде на нижній лист (точка  $e$ ). Середній лист залишається недосяжним при  $u_2 = \text{const} = 40$  м<sup>3</sup>/год.

Змусити систему повернути на середній лист (в тому числі в стан  $x = x_1 = 0$ ) можливо лише, змінивши два управлінських параметри  $u_1$  та  $u_2$ . Якщо взяти інший перетин,  $u_2 = \text{const}$ , наприклад, збільшити  $u_2$  до  $u_2 = 42$  м<sup>3</sup>/год (переріз Б рис. 3), то точки стрибком переходять з нижнього листа на верхній і навпаки і ще більше будуть відхиляться від оптимальної геометрії завантаження кульового млина (точка  $z$  рис. 3)

$$\delta_e, \delta$$

Цифри вказують на число станів рівноваги (стійких і нестійких)

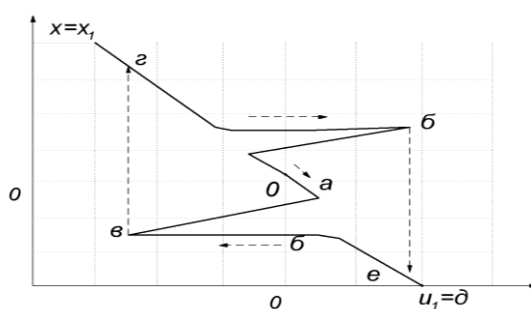


Рис. 2. Залежність координат  $X_1 = \omega_x$  від геометрії заповнення млина при постійному значенні маси кульового завантаження (перетин А рис. 3) (168 т)

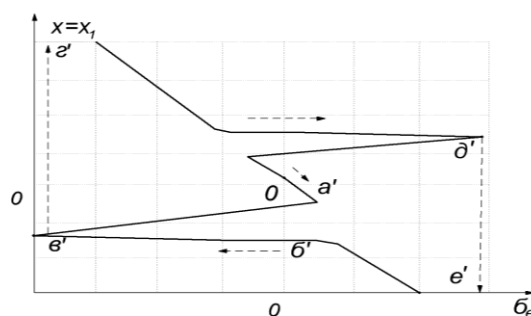


Рис. 3. Залежність координат  $X_1 = \omega_x$  від значення завантаження кульового млина при постійному значенні циркуляційного навантаження 120 %

Отже, розглянути метод ідентифікації геометрії внутрішньомлиного навантаження кульового млина дозволяє зрозуміти дослідникам вплив нелінійності на процес подрібнення та розробити: - систему інтелектуального управління млином з контролем геометрії завантаження, шляхом оцінки в часі множини точок, загальних для будь-якої поверхні  $K = f(x, y)$  і площини  $хоу$ , опису їх за допомогою  $R$  - функцій [7] і розпізнавання за параметрами  $x_1 \dots x_5$  стану внутрішньомлиного завантаження кульових млинів; методи адаптації параметрів класифікації і збагачення та побудови нечітких регуляторів керування завантаженням млинів першої, другої, третьої стадії подрібнення [12].

Методи інтенсифікації процесів подрібнення, шляхом впливу імпульснобігучого, електромагнітного поля на циркуляційне завантаження;

робототехнологічні пристрої для імпульсного впливу водними струменями на внутрішньомлине гетерогенне середовище;

системи автоматизованого управління електроприводами класифікаторів, насосів гідроциклонів для підвищення енергоефективності процесів подрібнення, класифікації та збагачення.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Використання теорії катастроф шляхом дослідження біфуркаційної поведінки кульового млина з метою ідентифікації характеристик геометрії його внутрішньомлиного завантаження в умовах невизначеності характеристик сирової руди, стану футеровки млина дозволило авторам статті одержати нові уявлення про процес подрібнення руди, а також запропонувати ряд методів контролю геометрії завантаження в темпі з процесом, інтенсифікації процесів подрібнення з метою підвищення його енергоефективності та зменшення питомих витрат електрики на виробництво концентрату.

#### Список літератури

1. **Хорольський В.П.** Багаторівнева інтелектуальна система оптимізації електроспоживання гірничо – збагачувальних підприємств/ **В.П.Хорольський, Д.В. Хорольський, К.Г.Тіторенко**// Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015 - №2 – с.192 – 198.
2. **Качан Ю.Г.** Моделирование возмущающих параметров процессов крупнокускового дробления для задач технологических исследований и АСУТП/ **Ю.Г.Качан, И.М.Трипутень**// Горная электромеханика и автоматика. К.: Техника, 1986. – Вып 49. – с. 36 – 40.
3. **Кочура Е. В.** Развитие научных основ автоматизации процессов магнитного обогащения руд с целью энерго-экономии: дис. на соиск. уч. степени докт. техн. наук. / **Е. К. Кочура**./ - Днепропетровск, 1996. – 331с
4. **Корнієнко В.І.** Ієрархічне адаптивне керування процесами рудопідготовки за синергетичним принципом з інтелектуальним прогнозуванням/ **В.І. Корнієнко**//Науковий вісник національного гірничого університету. – 2009 - №11 – с.61 – 66.
5. **Марюта А.Н.** Автоматическая оптимизация процесса обогащения руд на магнитнообогатительных фабриках/ **А.Н.Марюта**// М.: Недра, 1975. 231 с.
6. **Новицкий И.В.** Автоматическая оптимизация процесса самоизмельчения руд в барабанных мельницах / дис. на соиск. уч. степени докт. техн. наук. / **И.В.Новицкий** Днепропетровск, 1993. – 350с.
7. **Рвачев В.Л.** Методы алгебры логики в математической физике/ **В.Л.Рвачев** // . – Киев: Наукова думка, 1974. – 258 с.
8. **Хорольський В.П.** Адаптивні системи багатоуровневого управління технологічними процесами переробки руд./ **В.П.Хорольський**// дис. на соиск. уч. степени докт. техн. наук// Ленинград, 1989, с.412
9. **Gilmore R** Catastrophe Theory for Scientist and Engineers. Wiley. New York. 1981. p. 680.
10. Методы классической и современной теории автоматического управления : Учебник в 5 – и тт.; 2 – е изд., перераб. и доп. Т.5: Методы современной теории автоматического управления /Под ред. **К. А. Пупкова, Н.Д. Егупова**. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 784с.; ил.
11. **Mehra R.K., Kessel W.C., Caroll I.V.** Global Stability and Control Analysis of Aircraft of High Arigels of Attach – Cambridge: Scientific Systems, 1977 360 pp
12. **Хорольський В.П.** Інтелектуальна система керування технологічним комплексом збагачення залізних руд/ **В.П.Хорольський, Т.В.Хорольська, В.Б.Хоцькіна**// Гірнична електромеханіка та автоматика: наук. – техн..зб. – 2013. – 91. – с.47 – 53  
Рукопис подано до редакції 23.03.16

УДК 621.316

О.М.СІНЧУК, д-р, проф., Ю.Б. ФІЛІПП, канд. техн. наук, доц.,  
М.М. МАКСИМОВ, канд. техн. наук, доц., А.М. ЯЛОВА, аспірант  
Криворізький національний університет

#### МЕТОДОЛОГІЯ ОЦІНКИ ТА ФОРМУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ЗАЛІЗОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Виконано аналіз процесу визначення і заявки лімітів енергоспоживання на залізорудних підприємствах і встановлено, що норми питомого електроспоживання визначаються в умовах невизначеності практично без достатнього

аналізу процесу та рівнів електроспоживання, промислових показників роботи підприємства та розвитку геологічних умов на перспективу. За перевищення ліміту електроенергії з підприємств стягується штраф за споживані величини перебору електроенергії. Розглянуто методологічні аспекти оцінки та формування енергоефективних режимів споживання електроенергії на залізрудних підприємствах, запропоновано методи інтервального прогнозування споживання електроенергії. Для прогнозування електроспоживання з урахуванням зміни різних факторів може бути створена інформаційна база даних рівнів споживання електроенергії підприємствами галузі. Авторами статті розроблені методика і блок-схеми алгоритмів одержання тимчасових і факторних моделей енергоспоживання. Також розроблено алгоритм визначення статей видаткової частини електробалансів технологічних приймачів. Запропоновані заходи дозволяють проводити визначення рівня енергопостачання підприємства, встановлювати раціональні норми, здійснювати прогнозування його зміни у ході роботи підприємства й контролювати наднормативні витрати електроенергії.

**Ключові слова:** залізрудні підприємства, ліміти споживання електроенергії, електроспоживання, комерційний облік електроенергії, методи прогнозування, факторні моделі

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** На вітчизняних залізрудних підприємствах процес визначення й заявки лімітів, або встановлення норм питомого електроспоживання, здійснюється практично без достатнього аналізу процесу та рівнів електроспоживання, промислових показників роботи підприємства, що, як правило, призводить до відхилення фактичних показників від заявочних значень. В свою чергу, при корегуванні лімітів не завжди враховуються поточні показники роботи підприємства, прогноз факторів, що впливають, і, як наслідок, не ефективно використовуються заявлені ліміти. Між тим за перевищення ліміту електроенергії з підприємств стягується штраф за споживані величини перебору електроенергії. У зв'язку із цим, визначення рівнів споживання електроенергії (ЕЕ) для правильної й своєчасної заявки необхідних лімітів неможливо без застосування прогнозних процедур.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Електроспоживання гірничих підприємств залежить від багатьох факторів: технологічних, метеорологічних, енергетичних, організаційних та інших. Технологічні фактори визначаються глибиною залягання, розмірами родовищ, видом технології, параметрами систем розкриття й розробки, типами застосовуваних машин й устаткування й впливають на собівартість продукції. Метеорологічні фактори обумовлюють сезонність зміни показників споживання, формуючи впродовж року тенденцію їх зміну. Енергетичні фактори - структурні параметри електричних схем, число, потужність, к.к.д. електроприймачів й інше - обумовлюють формування режимів електричних навантажень. Організаційні фактори обумовлюють ступінь використання електроприймачів, рівень підвищених втрат електроенергії через погіршення характеристик електроустаткування, машин і механізмів. Рекомендують різними авторами методики оцінки станів процесу електроспоживання в умовах невизначеності й неповноти інформації із застосуванням методів "стиску" інформації на базі методу розкладання Корунена - Лоева і методу головних компонент, дозволяють виявити істотні ознаки, що визначають природу режимів електроспоживання. В свою чергу, адаптація методу головних компонентів до формування безлічі факторів, які визначають вплив на ефективність споживання електроенергії залізрудних шахт, дозволяє конкретизувати різні елементи: обсяг видобутку корисної копалини, приплив води в шахту, витрату стисненого повітря, чисельність виробничого персоналу [2-4]. Між тим, в проблемі підвищення енергоефективності видобутку корисних копалин взагалі і залізрудної сировини (ЗРС) зокрема, існує немало невизначеностей, що в значній мірі стосується підприємств з підземним способом видобутку [4].

**Постановка завдання.** Метою статті є розробка метода і алгоритму розрахунку кількісної оцінки ефективності керування електроспоживанням залізрудних підприємств.

**Викладення матеріалу та результати.** В публічному акціонерному товаристві «Кривбас-залізрудком» вже тривалий час (з 1997 року) використовується автоматизована система комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ), яка забезпечує формування звітів розрахунку сплати за використану електроенергію.

Крім того, також діє система технічного обліку електроенергії, яка дозволяє контролювати поточне електроспоживання по окремим фідерам з метою оперативного реагування на незадовільне енергозбереження окремими підрозділами комбінату.

Проте сьогодні цього недостатньо, оскільки постійно здійснюється розвиток підприємства, заглиблення рівнів видобутку ЗРС, вакханалія тарифів на електроенергію. Безумовно, в діючій економічній ситуації, конче необхідно прогнозувати, як рівень очікуваного електроспоживання, так саме, і собівартість залізної руди на перспективу.

За час експлуатації з 2006 року в комбінаті здійснюється накопичення інформації з електроспоживання структурними підрозділами і комбінату в цілому. На інших гірничих підприємствах також експлуатуються подібні системи енергообліку. І цей об'єм накопиченої інформації про електроспоживання на базі методів прогнозування може бути застосований для вироблення стратегії модернізації електрогосподарства комбінату.

Для прогнозування електроспоживання з урахуванням зміни різних факторів варто об'єднати зусилля підприємств галузі і створити інформаційну базу даних рівнів споживання електроенергії конкретного гірничорудного підприємства.

Створення такої бази повинно включати:

Збір, передачу, формування бази даних і зберігання інформації про рівень споживання електроенергії;

Синтез математичних моделей процесів електроспоживання гірничих підприємств;

Визначення за допомогою отриманих моделей прогнозних значень електроспоживання на місячному й річному рівнях;

Адаптація моделей при зміні факторів і корегування прогнозних значень електроспоживання.

При цьому, збір даних про показники споживання ЕЕ повинен здійснюватися на підприємствах за показниками лічильників комерційного й технічного обліку, та за звітними даними про виробничу діяльність підприємства.

Передача даних на єдиний обчислювальний центр підприємств галузі повинен відбуватися у вигляді щомісячного звіту про використання електроенергії за минулий місяць. Формування бази даних припускає їхню організацію в матричному виді.

Таблиця 1

Данні споживання електроенергії і вартості ПАТ «КЗРК» (грудень 2014 р.)

| Найменування підрозділу | Споживання електроенергії | Питома частка | Вартість електроенергії | Питома частка | Питома вартість |
|-------------------------|---------------------------|---------------|-------------------------|---------------|-----------------|
|                         | тис. кВт·г                | %             | тис. грн.               | %             | грн/кВт·г       |
| ш.Октябрьська           | 3871,095                  | 14,40         | 3510,437                | 13,04         | 0,90683         |
| ш.Родіна                | 6014,121                  | 22,38         | 5541,670                | 20,59         | 0,92144         |
| ш.Гвардійська           | 3919,249                  | 14,58         | 4263,806                | 15,84         | 1,08791         |
| ш.Леніна                | 3522,988                  | 13,11         | 3291,708                | 12,23         | 0,93435         |
| Енергоцех               | 7554,571                  | 28,11         | 8131,879                | 30,22         | 1,07642         |
| Інші споживачі          | 1994,089                  | 7,42          | 2172,935                | 8,08          | 1,08969         |
| Всього                  | 26876,113                 | 100,00        | 26912,435               | 100,00        | 1,00135         |

Між тим, як свідчать результати досліджень та показники енергоефективності вітчизняних залізрудних підприємств (табл.1), рівні споживання електроенергії цими видами підприємств відрізняються між собою.

Це залежить від багатьох факторів: об'ємів видобутків у поточному місяці, глибини видобутку, об'ємів надходження ґрунтових вод, розгалуженості вироблень і так далі.

Враховуючи викладене, на рис.1,2 наведено розроблені авторами блок-схеми алгоритмів одержання тимчасових і факторних моделей з використанням типових модулів програми АСНИ.

Обробка даних про електроспоживання й синтез математичної моделі електроспоживання повинен здійснюватися на базі розробленої методики, математичні процедури якої реалізуються на ЕОМ.

На рис. 3 наведений авторський варіант алгоритму для інтервального прогнозування з використанням тимчасових моделей. В основу алгоритму покладений синтез моделей електроспоживання, а також визначення довірчого інтервалу прогнозування.

Проте, крім вищевикладеного, підприємства цікавлять очікувані рівні електроспоживання, через це метою складання й нормалізації прогнозних рівнів електробалансів є підвищення ефективності використання електроенергії на гірничих підприємствах за рахунок виявлення резервів економії енергоресурсів, обґрунтування норм витрат електроенергії на видобуток ЗРС.



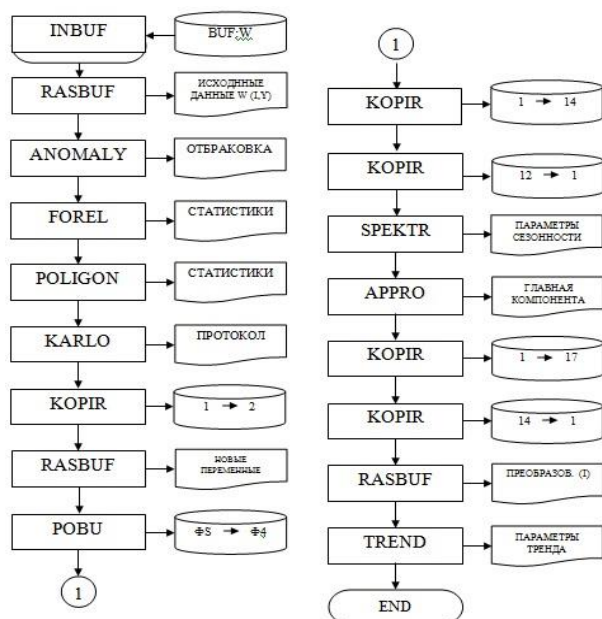


Рис.1. Блок-схема алгоритму отримання часової моделі електроспоживання

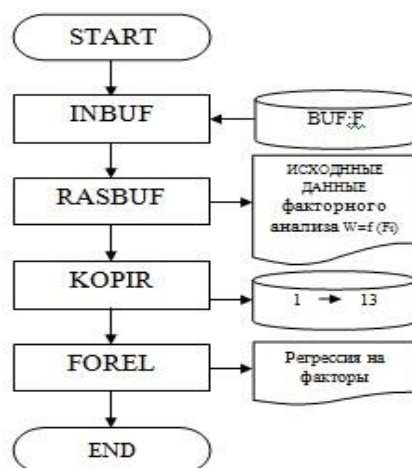


Рис.2. Блок-схема алгоритму отримання факторних моделей електроспоживання

При складанні видаткової частини електробалансів частка енергії, яка витрачається на прямі технологічні потреби, може бути визначена наступними методами: розрахунковим, експериментальним і розрахунково-експериментальним. Найбільш доцільним з перерахованих методів є комбінований розрахунково-експериментальний метод.

Електробаланси окремих агрегатів варто відносити до зміни й характерної робочої доби. Останнє визначається по середній продуктивності технологічних установок. У практичних умовах потрібно зосередити всі виміри в період найбільш завантаженої зміни.

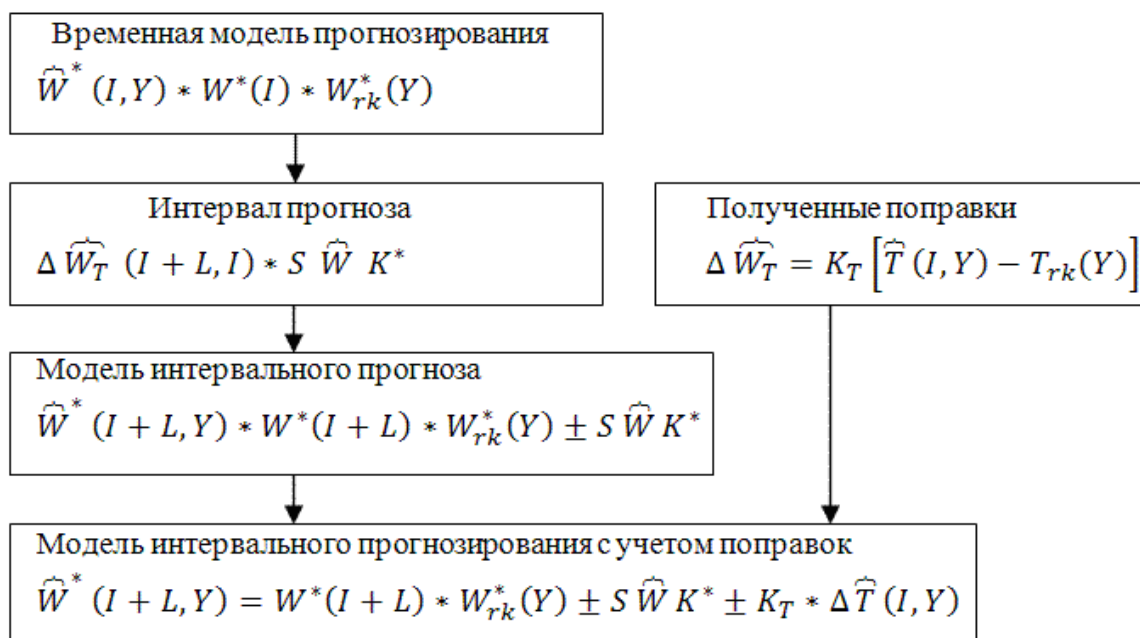


Рис.3. Алгоритм інтервального прогнозування електроспоживання шахти

Для такого аналізу потрібно визначити енергетичні характеристики технологічних приймачів, статистичні дані й закони розподілів складових балансів, а також їхню залежність від технологічних факторів.

Все це в умовах виробництва представляє значні труднощі через причини відсутності інформації про електроспоживання окремих електроспоживачів і трудомісткість обчислювальних робіт.

У цьому випадку доцільно рекомендувати наступний алгоритм визначення статей видаткової частини електробалансів технологічних приймачів:

За максимально завантажену зміну визначають загальні витрати електроенергії й технологічні параметри, що характеризують продуктивність й умови роботи технологічного споживача, а саме: для вентиляторів - продуктивність (тис.м<sup>3</sup>/с), депресія (Па); для водовідливних установок - продуктивність (м<sup>3</sup>/с), висота подачі води (м); для компресорних установок – продуктивність (тис.м<sup>3</sup>), тиск (Па); для підйомних установок - вантажопідйомність (т), висота підйому залізної руди (м), фактична швидкість руху скіпів (м/с). Для вказаних електроспоживачів визначається також довжина живлячої кабельної лінії (км);

Визначаються складові електробалансів, що характеризують витрати електроенергії (постійні, навантажувальні, у мережах, пускові та гальмівні). Здійснюється переклад значень складових електробалансів в іменовані одиниці за виразом

$$\Delta W = \frac{\Delta W(\%)W_0}{100}, \quad (1)$$

де  $\Delta W(\%)$  - умовно постійні втрати електроенергії в %;  $W_0$  - електроенергія, яка споживається установкою впродовж зміни, кВт·г;

Розраховуються технологічні витрати електроенергії

$$W_T = W_0 - \sum_{i=1}^n \Delta W_i, \quad (2)$$

де  $\Delta W_i$  - складова електробалансу, що характеризує втрати електроенергії;

Здійснюється порівняння прибуткової й видаткової частин електробалансу.

Варто вказати, що розрахунок електробалансів розглянутих технологічних приймачів можна робити без попереднього експериментального визначення змінної витрат електроенергії.

Після одержання фактичного електробалансу потрібно виконати його реалізацію.

Для цього необхідно визначити ті види втрат електроенергії, які призводять до одноразових витрат енергоресурсу, і шляхом аналізу режиму роботи установки встановити причини, що породжують збільшення непродуктивних витрат.

На підставі проведеного аналізу й після встановлення причин непродуктивних витрат електроенергії, відповідно до порядку, наведеному вище, складається раціональний електробаланс підприємства.

Резерви економії електроенергії можна визначити з виразу

$$\Delta W_{\text{ек}} = \sum_{i=1}^m (\Delta W_{\phi i} - \Delta W_{pi}), \quad (3)$$

де  $\Delta W_{\phi i}$  и  $\Delta W_{pi}$  - втрати електроенергії по кожній статті до й після раціоналізації електробалансу;  $m$  - число статей, по яких відбувається економія електроенергії після раціоналізації електробалансу.

Розроблена методика визначення технологічних норм витрат електроенергії.

Наведені методичні рекомендації з диференціального аналізу індивідуальних норм витрат електроенергії на основі даних електробалансів дозволяють встановити раціональні норми й контролювати наднормативні витрати електроенергії.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Запропонований алгоритм для інтервального прогнозування з використанням тимчасових моделей, в основу якого покладено синтез моделей електроспоживання, а також визначення довірчого інтервалу прогнозування.

Це дозволяє скласти видаткову частину електробалансів часток енергії, яка витрачається на прямі технологічні потреби, а запропонований комбінований розрахунково-експериментальний метод на базі алгоритму є базою для визначення статей видаткової частини електробалансів технологічних споживачів.

Заходи, які пропонуються, дозволяють проводити визначення рівнів енергопостачання на стадіях життєвого циклу розвитку підприємства й здійснювати прогнозування зміни його рівня до й після проведення реінжинірингу, які спрямовані на економію електроенергії на залізорудних шахтах, та використання на підприємствах галузі автоматизованих систем, комерційного й технічного обліку, створення технічних засобів, що забезпечують контроль за витратами електроенергії на основних приєднаннях у поверхневих і підземних мережах.

### *Список літератури*

1. **Праховник А.В.** Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий// А.В.Праховник, В.П.Розен, В.В. Дегтярев – М.: Недра, 1985 - 232 с.
2. **Синчук И.О.** Потенциал электроэнергоэффективности и пути его реализации на производствах с подземными способами добычи железорудного сырья. Монография// И.О. Синчук, Э.С. Гузов, А.Н. Яловая, С.Н. Бойко//под ред. докт. техн. наук, профессора О.Н. Синчука. – Кременчук: Изд. ЧП Щербатых А.В, 2015. – 296 с.
3. **Синчук О.Н.** Метод оцінювання ефективності споживання електричної енергії залізорудними підприємствами/ О.Н.Синчук, І.О.Синчук, Т.М.Берідзе, А.М. Ялова // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Одеський НПУ. – 2013. – С.49-57.
4. **Синчук О.Н.** К вопросу оценки потенциала электроэнергоэффективности подземных железорудных производств /О.Н.Синчук, Э.С.Гузов, А.Н. Яловая // Оптимальное керування електроустановками. Збірник наукових праць міжнародної науково технічної конференції. – Вінниця, 2013. – с.96.
5. **Шидловский А.К.** Расчеты электрических нагрузок систем электроснабжения промышленных предприятий/ Шидловский А.К., Вагин Г.Я., Куренный Э.Г. – М. :Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
6. **Анчарова, Т.В.** Экономия электроэнергии на промышленных предприятиях/ Т.В.Анчарова, С.И. Гамазин, В.В. Шевченко– М.: Высшая школа, 1990. – 143 с.
7. **Журахівський. А.В.** Оптимізація режимів електроенергетичних систем: Навч. посібник/А.В. Журахівський, Н.Р. Засідкович, А.Я. Яцейко – Львів: Видавництво національного університету «Львівська політехніка», 2009. – 140 с.
8. **Андржиевский, А.А.** Энергосбережение и энергетический менеджмент/ А.А. Андржиевский, В.И. Володин. – Минск: Высшая школа, 2005. – 296 с.
9. **Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І.** Енергозбереження засобами промислових електроприводів. Навч. посіб. – К.:Кондор, 2005. – 408 с.
10. **Shchokin V.** The example of application of the developed method of Neuro-Fuzzy rationing of power consumption at JSC "YuGOK" mining enrichment plants [Electronic source] / Vadym Shchokin, Olga Shchokina, Sergiy Berezhniy // Metallurgical and Mining Industry, - 2015. - №2. – P.19-26.

Рукопис подано до редакції 01.03.16

УДК 622.684:629.353:621.333.4

І.В. КАСАТКІНА, канд.техн.наук, доц., А.М. СИДОРЕНКО, магістрант  
Криворізький національний університет

## ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АВТОСАМОСКИДІВ У КАР'ЄРІ

Підвищити енергетичну ефективність роботи тягового електроприводу можливо за рахунок використання енергії гальмування великовантажних кар'єрних самоскидів, застосувавши рекуперативне гальмування, як основний спосіб електричного гальмування. Це дає змогу знизити споживання дизельного палива і зменшити забруднення атмосфери кар'єрів, застосувавши комбіновану енергосилову установку, яка міститься в собі дизельний або газотурбінний двигун внутрішнього згорання, електродвигун і потужний накопичувач електричної енергії (акумулятор або електрохімічний конденсатор). Одним з варіантів системи накопичувачів у складі комбінованої енергосилової установки може виступати система з асиметричними суперконденсаторними модулями. Встановлені на автосамоскидах з комбінованою енергосиловою установкою конденсаторні накопичувачі, значно перевершуватимуть акумуляторні батареї та ряд конденсаторів інших типів за техніко-економічними і експлуатаційними показниками. Застосування суперконденсаторів в якості накопичувача енергії в комбінованій енергосиловій установці кар'єрного автосамоскида дозволить виключити роботу дизельного двигуна на допоміжних операціях транспортного циклу, і, отже, скоротити час роботи на часткових і холостих режимах.

**Ключові слова:** енергоефективність, автосамоскиди, рекупераційне гальмування, суперконденсатори

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** На сьогоднішній день система рекуперативного гальмування широко застосовується з метою збільшення дальності пробігу цілого ряду електричних транспортних засобів[1-4]. Найбільш ефективна рекуперация кінетичної енергії для тих видів транспорту, для яких властивий досить довгий гальмівний шлях.

Рекуперативне гальмування електричного транспорту - це гальмування, при якому електрична енергія, що виробляється тяговими електроприводами, які здатні працювати в генеративних режимах, перетворювати її в іншу форму і повертати в електричну мережу або накопичувати в акумуляторних батареях транспортного засобу. Близько 30% кінетичної енергії під час гальмування перетворюється на теплову енергію, яка за рахунок сили тертя розсіюється в навколишнє середовище, однак частину енергії можна використовувати з метою живлення акумуляторної батареї транспортного засобу і, відповідно, збільшити діапазон його пробігу [2].

**Аналіз досліджень і публікацій.** Енергію, що виникає при гальмуванні двигунів можна повертати в електричну мережу, здійснюючи повне коригування її параметрів відповідно до параметрів мережі. Провідні виробники промислового устаткування і механізмів вже широко застосовують такі системи. Ці системи знайшли застосування в електротранспорті (електропоїзди, трамваї, тролейбуси, ескалатори). Їх застосування дає змогу знизити споживання дизельного палива і зменшити забруднення атмосфери кар'єрів [3,4].

**Постановка завдання.** Підвищити енергетичну ефективність роботи тягового електроприводу можливо за рахунок використання енергії гальмування великовантажних кар'єрних самоскидів, застосувавши рекуперативне гальмування, як основний спосіб електричного гальмування.

**Викладення матеріалу та результати.** В наш час енергозбереження має особливе значення, охоплюючи більшість сфер промислового виробництва, в тому числі і автотранспорт. Один з перспективних напрямів в розвитку світового автотранспорту - використання комбінованих енергосилових установок (КЕУ), що поєднують дизельний або газотурбінний двигун внутрішнього згорання (ДВС), електродвигун і потужний накопичувач електричної енергії (акумулятор або електрохімічний конденсатор). Особливість роботи КЕУ полягає в зупинці двигуна внутрішнього згорання при спуску автосамоскида в кар'єр і привод електротрансмісії від тягового акумулятора енергії, який заряджається енергією, що рекуперується на спуску [4,5].

У міру неминучого збільшення глибини кар'єрів посилюються вимоги до технічних характеристик кар'єрних автосамоскидів[5,7]. До основних напрямів їх вдосконалення з точки зору технології гірського виробництва, в частковості, можна віднести наступні:

- підвищення подоланного ухилу, при забезпеченні достатнього рівня безпеки;
- підвищення швидкості руху у вантажному напрямі;

зниження викиду шкідливих речовин з газами, що відпрацювали;  
підвищення вантажопідйомності; та ін.

Переліченим вище вимогам відповідають кар'єрні автосамоскиди з КЕУ. У зв'язку з цим розробки по використанню кар'єрного автотранспорту з комбінованим приводом є дуже актуальні і своєчасні. Такий привід дозволить не лише скоротити витрату дизельного палива, але і значною мірою понизити рівень загазованості в кар'єрах, що дасть додатковий економічний ефект при визначенні рознесення бортів і можливої глибини кар'єрів, що розраховуються виходячи з умов вентиляції кар'єру[6,10].

Великовантажні кар'єрні самоскиди (ВКС) типу БелАЗ є технологічним транспортом гірничодобувних підприємств, у собівартості продукції яких витрати на транспортування гірської маси складають до 70%. Зниження транспортних витрат можливе за рахунок використання енергії гальмування ВКС.

Робота автосамоскида в кар'єрі має циклічний характер[5,8]. Основні режими роботи автосамоскида з КЕУ:

- у вантажному напрямку самоскид рухається за рахунок енергії в ДВС;
- розвантаження і рух по відвалу здійснюються за рахунок енергії накопичувача;
- при спуску на нижні горизонти відбувається зарядка накопичувача за рахунок енергії гальмування;
- рух по горизонтальних ділянках колії здійснюється за рахунок енергії накопичувача;
- рух на робочому горизонті, очікування завантаження і установка самоскида під навантаження, запуск ДВС для початку руху навантаженого самоскида здійснюються за рахунок енергії накопичувача.

Так, близько 20% часу технологічного циклу ВКС рухається на спуску в кар'єр, його тягові електричні двигуни (ТЕД) працюють у генераторному режимі, а електрична енергія, що виробляється, розсіюється на гальмових резисторах. Близько 6 % часу технологічного циклу автосамоскиди здійснюють маневрування при установці під навантаження та маневрування при установці під розвантаження. В результаті близько 26 % часу тривалості операцій транспортного циклу, автосамоскиди працюють у генераторному режимі. У цей самий час дизельний двигун приводить в обертання систему генераторів електричної енергії, котра споживається електроустаткуванням ВКС. У цьому полягає низька енергетична ефективність роботи тягового електропривода автосамоскида, тобто енергія, яку виробляють ТЕД у генераторному режимі роботи, використовується нераціонально. У режимі електричного гальмування також знижується подача охолоджуючого повітря до ТЕД. Використання електричного гальмування за рахунок зміни режиму роботи тягового генератора на руховий дозволить знизити витрати дизельного палива і збільшити частоту обертання його валу і, відповідно, подачу охолоджуючого повітря до ТЕД.

Тривалість операцій транспортного циклу для різних типів автосамоскидів представлено в табл. 1.

Таблиця 1.

Тривалість операцій транспортного циклу для різних типів автосамоскидів, с

| Операції                                     | Тип автосамоскиду |            |         |
|----------------------------------------------|-------------------|------------|---------|
|                                              | БелАЗ-549         | БелАЗ-7519 | НД-1200 |
| Очікування навантаження                      | 87,5              | 105,0      | 105,0   |
| Маневрування при установці під навантаження  | 36,8              | 41,0       | 36,1    |
| Навантаження                                 | 175,0             | 210,0      | 210,0   |
| Транспортування гірничої маси:               |                   |            |         |
| рух порожнього на спуск;                     | 252,0             | 236,3      | 236,3   |
| рух завантаженого на підйом;                 | 444,7             | 420,0      | 378,0   |
| рух, що встановився;                         | 153,3             | 144,4      | 135,2   |
| Очікування розвантаження                     | 12,3              | 10,0       | 8,5     |
| Маневрування при установці під розвантаження | 39,9              | 44,1       | 39,1    |
| Розвантаження                                | 61,3              | 50,0       | 42,5    |
| Тривалість транспортного циклу               | 1262,8            | 1259,4     | 1190,6  |

Найбільш тривалі складові часу рейсу - рух з вантажем на підйом, при якому автомобіль запасав потенційну енергію, і рух порожняком при спуску, коли накопичена потенційна енергія розсіюється у вигляді тепла в гальмівних обладнаннях автосамоскида. Якщо при спуску автосамоскида в кар'єр рекуперувати енергію гальмування і запасати її в накопичувачі енергії, то при маневруванні в кар'єрі, вантаженню і під час руху в робочій зоні тягові двигуни використовуватимуть запасену в накопичувачі енергію, а ДВС буде вимкнений. Такий режим роботи самоскида з КЕУ забезпечить: рух на електротязі без участі ДВС протягом тривалого часу; зниження загазованості кар'єра; економію палива; багаторазове глушіння і надійний запуск ДВС в будь-яких погодних умовах; електроживлення власних потреб транспорту за рахунок конденсаторної системи, без використання штатних акумуляторних батарей; підвищення терміну служби механічної системи гальмування; для газотурбінного двигуна - стабільність вихідних характеристик енергоустановки у всьому діапазоні робочих потужностей.

Однією з основних проблем при використанні кар'єрних автосамоскидів є наднормативне забруднення атмосфери кар'єрів. Існуючі методи вентиляції та провітрювання кар'єрів або недостатньо ефективні, або економічно і енергетично недоцільні [6,10]. Застосування засобів індивідуального захисту для операторів кар'єрної техніки, в тому герметизація кабін з обладнанням їх фільтровентиляційними установками, також не вирішує повністю проблему охорони здоров'я працівників і простоїв гірничого обладнання по причині понаднормативного забруднення робочої зони кар'єру.

Завдяки застосуванню в конструкції автосамоскида з КЕУ газотурбінного двигуна, що має на порядок меншу, порівняно з дизельним двигуном токсичність і задимленість, а також використання газотурбінного двигуна (ГТД) близько 30% всього транспортного циклу, забезпечують автосамоскидам з КЕУ істотно менші викиди шкідливих речовин в атмосферу [2,9].

В комбінованих енергосилових установках важливу роль відіграє потужний накопичувач електричної енергії. Існують такі накопичувачі електричної енергії, як акумуляторні батареї та електрохімічні конденсатори. Акумуляторні батареї не можуть швидко прийняти велику кількість енергії, а «суперконденсатори» не можуть її повільно віддавати.

Найоптимальніший варіант в комбінації цих двох типів накопичувачів електричної енергії. А накопичувати є що. Великовантажний самоскид при русі вниз по серпантину кар'єра, вимушено розсіює, зігріваючи атмосферу, в 1,5 рази більше енергії, ніж йому необхідно для подальшого підйому наверх.

В теперішній час ведуться розробки ефективних накопичувачів енергії, які могли б «рекуперувати» енергію гальмування більш ефективно.

Одним з варіантів системи суперконденсаторних накопичувачів у складі КЕУ може виступати система з асиметричними суперконденсаторними модулями [7,3].

Відмінні якості таких конденсаторів :

- високі питома потужність і енергія;
- широкий інтервал робочих температур (-50÷+70°C);
- термін служби понад 15 років;
- висока надійність і стійкість до значних перевантажень по напрузі і перезаряду без виходу з ладу;
- низький саморазряд;
- відсутність необхідності обслуговування впродовж усього терміну експлуатації;
- безпека в експлуатації;
- відсутність матеріалів, небезпечних для здоров'я людини і довкілля.

При встановленні на автосамоскидах з КЕУ конденсаторних накопичувачів значно перевершуватимуть акумуляторні батареї за техніко-економічними і експлуатаційними показниками, а також ряд вітчизняних і зарубіжних конденсаторів інших типів.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Підвищити енергетичну ефективність роботи ТЕП можливо за рахунок використання енергії гальмування ВКС, застосувавши рекуперативне гальмування, як основний спосіб електричного гальмування.

Це дає змогу знизити споживання дизельного палива і поліпшити умови охолодження ТЕД.

Застосування суперконденсаторів в якості накопичувача енергії в комбінованій енергосиловій установці кар'єрного автосамоскида дозволить виключити роботу дизельного двигуна на допоміжних операціях транспортного циклу, і, отже, скоротити час роботи на часткових і холодних режимах. Це дозволить понизити загазованість робочої зони кар'єрів і зменшити витрату палива.

Напрямок по створенню кар'єрного автотранспорту з комбінованими енергосиловими установками технічно реалізуємий і перспективний, оскільки відповідає сучасним тенденціям автомобілебудування.

Накопичувачі, побудовані на основі конденсаторних модулів, будуть затребувані при розробці КЕУ для кар'єрного автотранспорту. У зв'язку з цим робота з дослідження ефективності застосування рекуперативного гальмування, як основного способу електричного гальмування ВКС з комбінованою електроенергетичною установкою є досить важливою і актуальною в сучасних економічних умовах.

### Список літератури

1. Шевченко О.І. Підвищення енергетичної ефективності тягового електропривода кар'єрних самоскидів великої вантажопідйомності: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд.техн. наук: спец. 05.09.03 „Електротехнічні комплекси та системи”. – Харків, 2004.– 20 с.
2. Тарасов П.И., Бахтурин Ю.А., Глебов А.В., Ковалев Г.Е. Условия и перспективы применения комбинированных энергосиловых установок на карьерных автосамосвалах// Энергосбережение на карьерном автомобильном транспорте. Материалы международного научно-технического семинара, 24-26 июля 2003 г. -Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2003.
3. Тарасов П.И., Журавлев А.Г. О создании комбинированных энергосиловых установок для карьерных самосвалов // Проблемы карьерного транспорта. Материалы VIII Международной научно-практической конференции, 20-23 сентября 2005 г. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005.
4. Яковлев В.Л., Тарасов П.И. О возможности создания карьерных автосамосвалов с комбинированной энергосиловой установкой. – Горный журнал. –2004. – Специальный выпуск. – С. 78-80.
5. Егоров А.Н. Силовые агрегаты карьерных автосамосвалов [Текст] / А.Н.Егоров, В.Т. Войтов // Горный журнал. – 2004. – Специальный выпуск к № 8. – С.75-77.
6. Филатов С.С. Вентиляция карьеров. – М.: Недра, 1981. – 206 с.
7. И.Н. Варакин, к.х.н., В.В. Менухов, В.В. Самитин, к.т.н., ЗАО «ЭЛТОН», (Троицк, Московская обл.) Перспективы применения электрохимических конденсаторов в составе комбинированных энергосиловых установок на автосамосвалах.- журнал "Горная Промышленность" №3 2008, –79 с.
8. А.Н. Егоров, В.Т. Войтов. Силовые агрегаты карьерных автосамосвалов // Горный журнал. - Специальный выпуск. - 2004.
9. Тарасов П.И. Исследование влияния горнотехнических факторов на расход топлива карьерным автотранспортом: дис. к.т.н. ИГД МЧМ СССР. - Свердловск, 1982. - 238 с.
10. Тарасов П.И. Обоснование технологических параметров углубочного комплекса / П.И. Тарасов, А.Г. Журавлев, В.О. Фурин // Горное оборудование и электромеханика. — 2011. — № 9. — С. 2—10.

Рукопис подано до редакції 21.03.16

УДК 621.311.086.5:621.3.001.57

И.О. СИНЧУК, И.В. КАСАТКИНА кандидаты техн. наук, доц., А.Н. ЯЛОВАЯ аспирант, Криворожский национальный университет

Н.Н. ЮРЧЕНКО д-р техн. наук, проф., Институт электродинамики НАН Украины

### ОЦЕНКА НАПРАВЛЕНИЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ДОБЫЧИ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ ПОДЗЕМНЫМ СПОСОБОМ

Рассмотрены методы оценки закономерностей влияния комплекса технических и технологических факторов на уровень потребления электрической энергии и обоснование выбора направлений повышения энергоэффективности добычи железорудного сырья в условиях подземных горнорудных предприятий. Предложен комплексный подход к решению задачи повышения электроэнергоэффективности добычи ЖРС путем применения системы контроля, оценки и управления этим процессом с учетом обоснованных прогнозных технологических слагаемых, который позволит достичь желаемого эффекта в анализируемой проблеме – сокращения уровня потребления электрической энергии.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, электроэнергосатраты, железорудное сырье

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Продукция горно-металлургической отрасли – железорудное сырье (ЖРС) является одним из базовых источников пополнения валютных запасов Украины [1]. К сожалению, процессу добычи ЖРС свойственна негативная тенденция роста себестоимости добываемого вида сырья [2]. Слагаемыми данной тенденции является значительное число как субъективных, так и негативных факторов, одним из которых, в частности, является рост доли энергозатрат в общей себестоимости добываемого сырья [2 - 9].

**Анализ исследований и публикаций.** За последние 10 лет энергозатраты в общем сегменте себестоимости добываемого ЖРС отечественными горнорудными предприятиями с подземным способом добычи в целом достигли уровня 30% [4]. Следовательно усложняется и без того непростая тенденция конкурентоспособности данного вида отечественного сырья на мировом рынке. Если учесть, что за период 2014 – 2015 г. г. повышение тарифов на электроэнергию (ЭЭ) достигло более чем 1,5 кратных размеров, что, в свою очередь, привело к повышению производственной себестоимости ЖРС, которая увеличилась на 40%, то проблема сдерживания роста энергозатрат при добыче ЖРС становится более чем очевидной и актуальной [4].

Установлено [5,6], что около 90% от общих энергозатрат в себестоимости добываемого ЖРС подземным способом составляют электроэнергетические, т.е. задача уменьшения себестоимости добываемого железорудного сырья по сути сводится к задаче уменьшения или, что точнее, оптимизации энергозатрат при добыче, которые за период 2005 – 2014 г. увеличились на 18% и имеют негативную тенденцию дальнейшего увеличения [6,7].

**Постановка задачи.** Основные направления повышения электроэффективности добычи полезных ископаемых известны [8,9]. Однако они, как правило, относятся к вновь проектируемым или глобально переоборудуемым горным предприятиям и то, в большей своей части, к угольным видам горных производств [10,11]. Относительно же железорудных объектов, и особенно действующих, то эта проблема пока находится лишь в стадии ожидания подхода к своему решению [7].

Вместе с тем, учитывая то, что в ближайшие 35-45 лет, строительство новых железорудных предприятий в Украине не планируется, то именно в направлении совершенствования комплекса: система электроснабжения – система электропотребления действующих горнорудных производств, и необходимо направить вектор научных исследований.

В разрезе реализации вышеизложенного тезиса, как показывают результаты исследований, реальными направлениями повышения электроэффективности действующих железорудных шахт являются: модернизация систем электроснабжения и оптимизация процессов электроэнергопотребления с возможностью адаптивного управления этими процессами.

Первое направление, в той или иной степени, исследовано и содержит действенные и, скорее, технические аспекты своего разрешения, особенно во все в тех же условиях действующих горнорудных предприятий. Поэтому не отрицая, а, точнее наряду с изложенным направлением поиска путей повышения эффективности самих систем электроснабжения, актуальным представляется все же вопрос проведения комплекса исследований с акцентом именно на втором направлении – оптимизации и управлении этим процессом в конкретных условиях действующего того или иного железорудного производства.

**Изложение материала и результаты.** Первым шагом в получении ответа на поставленную цель исследований было установление зависимости объемов потребления ЭЭ от объемов добычи ЖРС. Логичным при этом выглядит оценка удельного расхода ЭЭ в функции объемов добываемого сырья.

В ходе «рамочного», но все же вполне достаточного для данной цели исследований, анализа и попыток оценить уровень зависимости объемов добычи железорудного сырья от уровня потребления электроэнергии выявлено следующее.

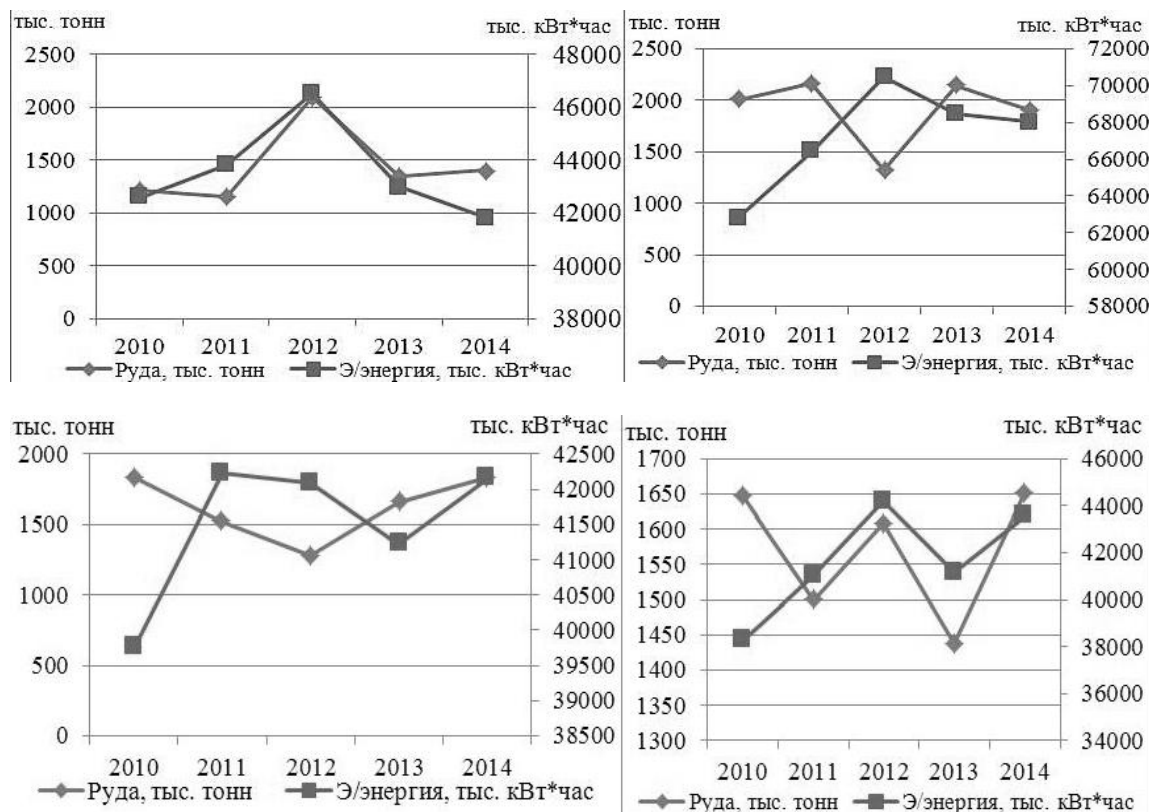
Первое это то, что в основном подтвердились выводы, полученные проф. Калиниченко В.Ф. еще в 60-х годах прошлого столетия и проф. Синчуком О.М. в 10-х годах нашего столетия, что эти зависимости носят сложно прогнозируемый характер [4,11].

В процессе настоящих исследований авторами установлено, что уменьшение объемов добычи ЖРС приводит к увеличению удельного расхода электроэнергии.



Так, к примеру, уменьшение объема добычи железорудного сырья по ш. Октябрьская (ПАО «Криворожский железорудный комбинат») в 2011 г. привело к увеличению удельного расхода электроэнергии на 15,9% по сравнению с предыдущим годом.

Аналогичное состояние в разные годы прослеживается и по абсолютно всем другим железорудным шахтам (рис. 1).



**Рис.1.** Графики годовых объемов добычи железорудного сырья и потребления электрической энергии по шахтам ПАО «Криворожский железорудный комбинат»: а) ш. Октябрьская; б) ш. Родина, в) ш. Ленина; г) ш. Гвардейская.

С целью определения качественной стороны этого вопроса, а также оценки взаимосвязи между объемами добычи железорудного сырья и расходом электроэнергии была использована известная шкала Чеддока [12].

Установленные уровни зависимости между объемами добычи ЖРС и объемами электроэнергопотребления по конкретному железорудному комбинату - ПАО «Криворожский железорудный комбинат» и отдельным шахтам, как типовым железорудным предприятиям, показали следующие результаты.

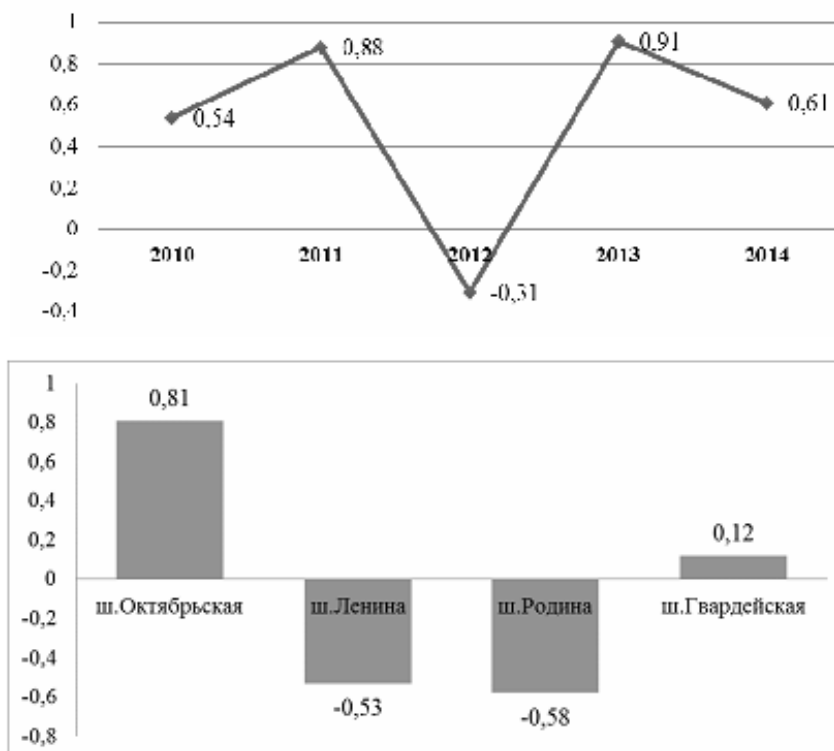
Обобщенный коэффициент корреляции по ПАО «Криворожский железорудный комбинат»: период 2010-2014 год составил - 0,43 что определяется как заметная обратная взаимосвязь.

За этот же период времени по слагаемым структурным подразделениям данного комбината – шахтам, это выглядит следующим образом.

По шахте «Родина» коэффициент корреляции равен 0,203, что определяет взаимосвязь, как слабую. По шахте «Октябрьская» соответственно коэффициент корреляции равен -0,09, что определяет практически отсутствие взаимосвязи.

По шахте «Гвардейская», коэффициент корреляции соответствует величине 0,11, что говорит о слабой взаимосвязи.

По шахте «Ленина» коэффициент корреляции равен -0,53, что соответствует хорошей обратной связи (рис. 2).



**Рис. 2.** Значения коэффициентов корреляции удельных расходов электрической энергии и объемов добычи железорудного сырья шахт ПАО «Криворожский железорудный комбинат»:  
*a* - по комбинату; *б* - усредненный показатель по шахтам за период 2010-2014 гг.

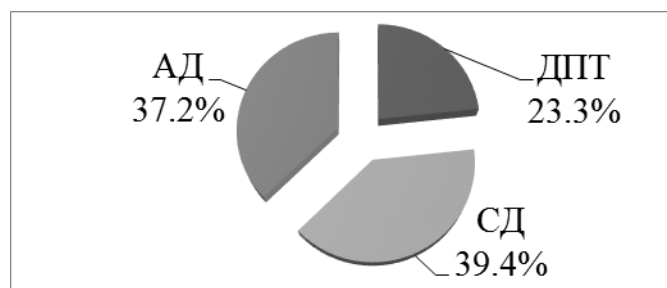
Вместе с тем интересен факт, что самый высокий коэффициент корреляции относится к комбинату в целом, а значения для его структурных слагаемых – шахтам располагаются ниже этих показателей.

Это позволяет сделать вывод, что основной акцент в анализе и поиске путей повышения электроэнергоэффективности добычи ЖРС должен быть сделан на основную технологическую ячейку – шахту.

Следующим исследовательским шагом при такой неоднозначной ситуации было установление электробаланса предприятий. Как выявлено он (электробаланс), по сути, не изменялся практически по всем подземным железорудным предприятиям более 15-20 лет, т.е. в этом вопросе наблюдается достаточная стабильность [4,6,7].

Среди потребителей электрической энергии в железорудных шахтах доминируют электрические двигатели технологического оборудования, потребляющие в среднем до 94 % всей ЭЭ [4].

В свою очередь, среди всех типов электрических двигателей железорудных шахт выделяются синхронные, потребляющие почти 40 % от общепотребляемой энергии (рис. 3).

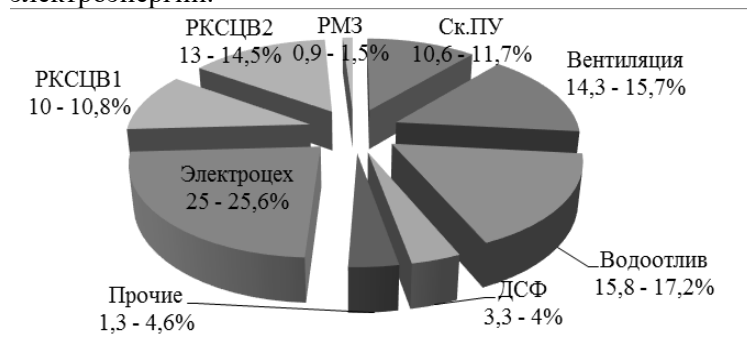


**Рис. 3.** Диаграмма соотношений установленных мощностей по видам электрических двигателей (ПАО «Криворожжелезрудком», 2010-2014 год)

В алгоритме дальнейших исследований интересным представляется вопрос установления наиболее энергоемких потребителей и оценка их веса в общей доле потребления ЭЭ предприятием.

В ходе исследований установлено, что таковыми для железорудных шахт являются: водотлив, вентиляция, скиповый подъем ЖРС и компрессорные установки, которые вместе потребляют свыше 80% всей электроэнергии шахты (рис.4).

Особенно велики електроенергозатрати на выработку сжатого воздуха центральными компрессорными станциями, которые составляют около 30% от всей потребляемой комбинатом электроэнергии.



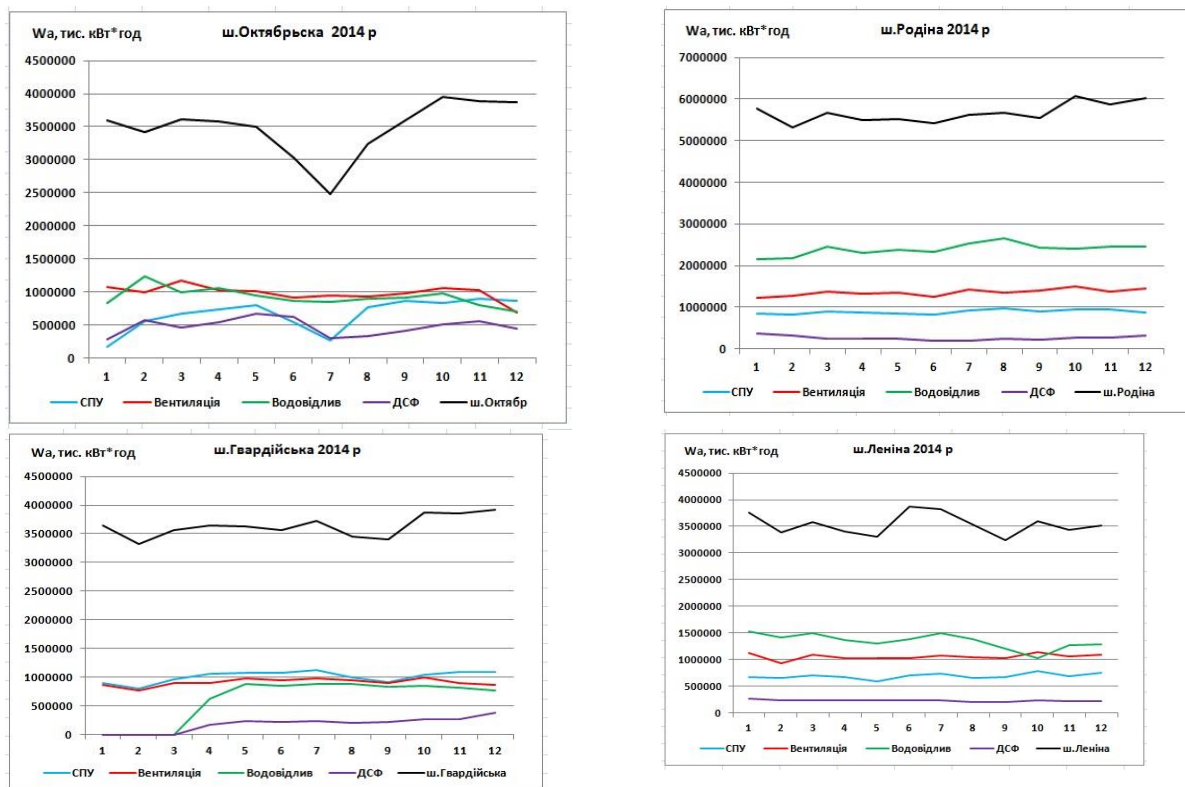
**Рис. 4.** Диаграмма диапазонов колебаний уровней потребления электрической энергии по видам потребителей железорудных комбинатов Украины в период 2010-2015 год

где: РКСЦВ – районная компрессорная станция центрального водоотлива; РМЗ – ремонтно-механический цех; Ск.ПУ – скиповые подъемные установки; ДСФ – дробильно-сортировочная фабрика

На рис. 5. представлены типовые (реальные) диаграммы потребления ЭЭ изложенными потребителями. Как видим, несмотря на близость тенденции потребления ЭЭ этими потребителями, все же для каждой шахты имеют свои отличия в уровнях потребления.

И все же, очевидно, что исходя из полученных данных, наиболее реальным путем снижения энергозатрат для всех без исключения железорудных шахт является снижение электропотребления и энергозатрат именно в этих установках и, особенно, в центральных компрессорных установках [6].

В значительной степени, до 20% снижения уровня потребления ЭЭ можно достигнуть путем применения в этих электромеханических системах энергоэффективных видов энергоприводов [4,6,10].



**Рис. 5.** Годовые графики энергопотребления структурных подразделений шахт ПАО «Криворозький залізорудний комбінат»

Эффективным мероприятием является также перевод времени функционирования максимально возможного количества анализируемых энергоемких потребителей ЭЭ. Однако такой поход, несущий значимый эффект, нельзя признать достаточно полным в решении проблемы повышения электроэнергоэффективности железорудных производств, тем более с их индивидуальностью [5].

В этом комплексе научных задач, подлежащих решению, должен присутствовать головной компонент влияния на электроэнергоэффективность - технологические параметры добычи ЖРС данного предприятия или группы предприятий. Весь этот контрольный и управленческий комплекс должна взять на себя АСУ [4,7].

При этом уровень эффективности управления будет определяться адекватностью отработки АСУ соответствующего многофакторного алгоритма, где базовыми принципами строения алгоритма должна быть: оценка, контроль и управление уровнем электроэнергопотребления железорудного предприятия, в т. ч. с помощью потребителей-регуляторов электрической энергии.

Функционирование такой АСУ должно базироваться на принятии решений на основе метода факторного анализа, базирующегося на статистической информации, обработанной с помощью методов моделирования и математической статистики (рис.6) [12].

Для этого необходимо определить систему факторов, влияющих на эффективность потребления ЭЭ приемниками, которые в последствии необходимо ранжировать на группы для структурно – логического представления и классификации их [7].

На рис. 7 представлена рекомендуемая блок-схема алгоритма получения факторных моделей электропотребления.

Алгоритм работы системы управления энергопотреблением железорудного предприятия представлен на рис. 8.

Это база для разработки АСУ «Энергопотребление: прогноз-реальность» с целью повышения электроэнергоэффективности при добыче ЖРС.

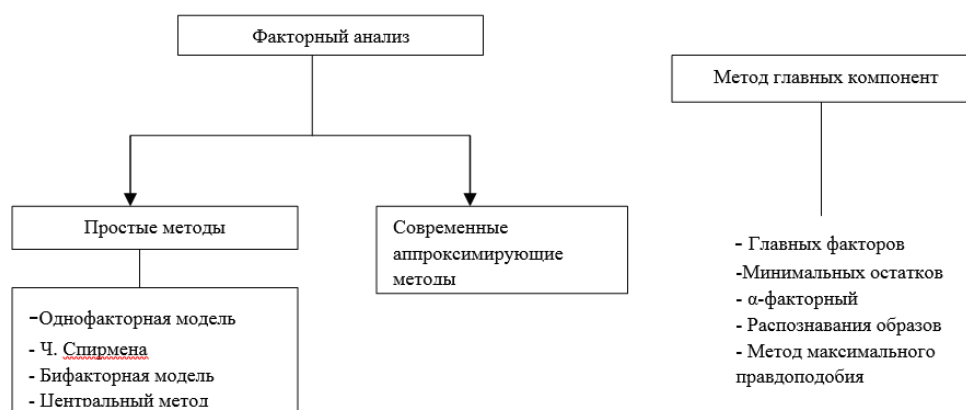


Рис. 6. Структурно-логическое представление классификации методов факторного анализа

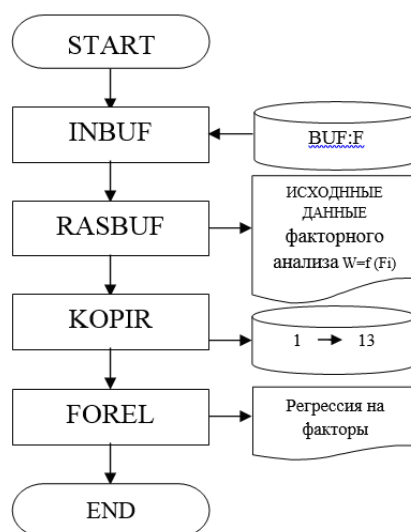


Рис. 7. Блок-схема алгоритма получения факторных моделей электропотребления

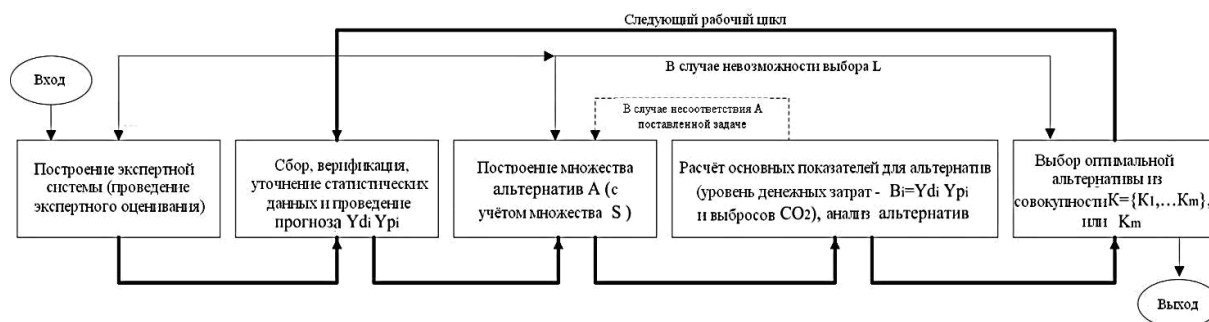


Рис. 8. Алгоритм работы системы

Реализация рекомендованных способов позволит сократить потери электроэнергии по железорудной шахте (комбинату) за оптимистическим потенциалом на 35-40%, за пессимистическим - на 15-20%.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Для реального снижения удельных показателей расхода электрической энергии на тонну добываемого железорудного сырья отечественными горнорудными предприятиями необходимо:

оценить дифференцированно возможности корректировки уровней потребления электрической энергии в функциях ряда переменных факторов, влияющих на все слагаемые комплекса: электроснабжение – электропотребление как объекта регулирования каждой отдельно взятой шахты;

внедрить в практику работы горнорудных предприятий систему контроля, учета и управления процессом потребления электрической энергии в комплексе АСУ технологическим процессом как по отдельно взятой шахте так и при необходимости по производственным объединениям, (комбинатам) в целом.

#### Список литературы

1. Основні параметри енергозабезпечення національної економіки на період до 2020 року [Текст] / Стогній Б.С., Кириленко О.В., Праховник А.В., Денисюк С.П., Негодуйко В.О., Пертко П.П., Блінов І.В. – К.: Вид. Ін-ту електродинаміки НАН України, 2011. – 275 с.
2. Сборник технико-экономических показателей горнодобывающих предприятий Украины в 2009 – 2010 гг. Анализ мировой конъюнктуры рынка ЖРС 2004 – 2011 гг. [Текст] / Е.К. Бабец, Л.А. Штанько, В.А. Салганик и др. – Кривой Рог: Видавничий дім, 2011 – 329 с.
3. Сінчук О.М. Кривбас на межі тисячоліть: шляхи відродження. Монографія [Текст] / О.М. Сінчук, А.Г. Багал – К.: АДЕФ-Україна, 1997. – 31 с.
4. Сінчук І.О. Потенціал електроенергоєфективності і пути его реалізації на производствах с подземными способами добычи железорудного сырья. Монографія [Текст] / І.О. Сінчук, Э.С. Гузов, А.Н. Яловая, С.Н. Бойко// под ред. докт. техн. наук, профессора О.Н. Сінчука. – Кременчук: Изд. ЧП Щербатых А.В, 2015. – 296 с.
5. Пархоменко Р.А. К вопросу оценки процесса электропотребления горнорудных предприятий в условиях неопределенности и неполноты информации [Текст] / М.А. Баулина, Р.А. Пархоменко, А.Н. Яловая // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: Збірник матеріалів конференції Міжнародної 3 науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів. – Кременчук: КрНУ, 2013. – С.190-191.
6. Сінчук О.Н. Метод оцінювання ефективності споживання електричної енергії залізрудними підприємствами [Текст] / О.Н. Сінчук, І.О. Сінчук, Т.М. Берідзе, А.М. Ялова // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Одеський НПУ. – 2013. – С.49-57.
7. Ялова А.М. Споживання електричної енергії та вплив на цей процес системи чинників формування факторного простору в умовах залізрудних підприємств [Текст] / А.М. Ялова // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Збірник наукових праць кіровоградського національного технічного університету. – Кіровоград, 2014 – Випуск 27, частина II. – С.339-349.
8. Праховник А.В. Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий [Текст] / А.В. Праховник, В.П. Розен, В.В. Дегтярев – М.: Недра, 1985 - 232 с.
9. Електрифікація гірничого виробництва: Підручники для ВНЗ: у 2-х т. [Текст] / За редакцією Л.О. Пучкова, Г.Г. Півняка. – Д.: Нац. гірн. університет, 2010, т. 1. – 503 с.
10. Розен В.П. Оцінювання енергоєфективності електроспоживання вугільних шахт [Текст] / В.П. Розен, Л.В. Давиденко, В.І. Волинєць // Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах: Матеріали IV-ої міжнародної науково-технічної конференції – Луцьк: РВВ ЛДТУ, 2012. – С. 130 – 132.
11. Калиниченко В.Ф. Определение нагрузки на шинах главной подземной подстанции шахты [Текст]: Бюллетень НТИ. / В.Ф. Калиниченко – НТИ. – 1980.
12. Айвазян. С.А. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности [Текст] / С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин – М.: Финансы и статистика, 1989 - 607 с.

Рукопись подана в редакцию 26.02.16

УДК 62267:621.3

І.В. КАСАТКІНА, канд. техн. наук, доц., І.В. ГНУТОВ, студент  
Криворізький національний університет

## ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЯГОВОГО АГРЕГАТУ В КАР'ЄРІ

Підвищити енергетичну ефективність роботи тягового агрегату можливо за рахунок встановлення пристрою компенсації реактивної потужності в усьому діапазоні струмових навантажень шляхом плавної зміни реактивної потужності компенсатора. Пристрій складається з пасивного компенсатора реактивної потужності та вольтодобаткового трансформатора. Використання компенсатора призводить до значного підвищення коефіцієнту потужності в номінальному режимі роботи і до перекомпенсації реактивної потужності при малих струмах навантаження, на тягових агрегатах та електровозах.

**Ключові слова:** тяговий агрегат, компенсатор реактивної потужності, якість електричної енергії, гармонічний склад струму

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Одним з головних напрямків модернізації тягових засобів кар'єрного залізничного транспорту являється створення і впровадження тягових агрегатів, які складається з електровозів керування та моторних думпкарів.

Тяговий агрегат призначений для роботи на залізних дорогах відкритих гірських виробках, електрифікованих на змінному струмі напругою 10000 В, частотою 50 Гц, з керуючими підйомами, уклонами до 60 тисячних, та які мають не електрифіковані ділянки шляхів з підйомами, уклонами до 15 тисячних [1].

На кар'єрах із середнім і великим масштабом робіт для транспортування залізної руди використовуються тягові агрегати ОПЕ-1А, які мають низький коефіцієнт потужності, який змінюється в залежності від навантаження і віддалення агрегату від тягової підстанції. Середнє значення коефіцієнту потужності складає 0,6, цей показник погано впливає на енергетичні показники тягового агрегату. У режимі рекуперативного гальмування, тяговий агрегат має ще менше значення коефіцієнту потужності [2].

**Аналіз досліджень і публікацій.** Тяговий агрегат ОПЕ-1А має відносно великі енергозатрати через низький коефіцієнт потужності. Враховуючи, що за період 2014-2016 років підвищення тарифів на електроенергію склало більше чим у 1,5 кратних розмірів, що в свою чергу призвело до підвищення вартості експлуатації тягових агрегатів за рахунок їх великої потужності та енергоживлення.

Встановлення пристрою компенсації реактивної потужності дасть змогу підвищити коефіцієнт потужності, тим самим зменшити енергозатрати та підвищити енергоефективність тягового агрегату.

**Постановка завдання.** Підвищити енергетичну ефективність роботи тягового агрегату за рахунок встановлення пристрою компенсації реактивної потужності в усьому діапазоні струмових навантажень шляхом плавної зміни реактивної потужності компенсатора.

**Викладення матеріалу та результати.** Компенсувати реактивну потужність електрорухомого складу змінного струму без зміни силового перетворювача можливо за допомогою підключення пасивного нерегульованого компенсатора реактивної потужності (КРП) до вторинної обмотки силового трансформатора агрегату. Схема підключення нерегульованого компенсатора реактивної потужності показана на рисунку 1.[4]

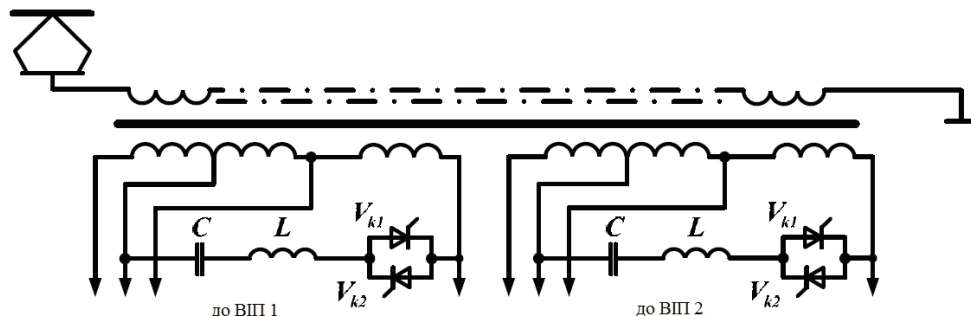


Рис. 1. Схема підключення нерегульованого компенсатора реактивної потужності





На LC-ланцюг компенсатора надходить сумарна напруга вторинних обмоток  $u_2$  трансформатора  $T_p$  і вольтододаткового трансформатора  $u_{ВДТ-2}$  ВДТ, яке визначає величину напруги  $U_c$  на конденсаторі компенсатора. Величина напруги на обкладках конденсатора, в свою чергу, визначає реактивну потужність компенсатора  $Q_{крп}$ . Ємнісний струм  $i_c$  джерела реактивної потужності  $C$  компенсує індуктивну складову струму навантаження  $i_n$  в ланцюзі вторинної обмотки трансформатора напруги  $T_p$ .

Для забезпечення максимального коефіцієнту потужності необхідно досягнення рівності потужності компенсатора  $Q_{крп}$  і реактивної потужності навантаження  $Q_n$  [4].

Зміна реактивної потужності компенсатора  $Q_{крп}$  при фіксованій ємності конденсатора  $C$  забезпечується за рахунок збільшення або зменшення величини напруги  $U_c$  на його обкладках згідно з виразом

$$Q_{крп} = \omega C U_c^2 \quad (1)$$

В замкнутому контурі електричного ланцюга, який складається з I-II-III секцій вторинної обмотки трансформатора  $T_p$ , вторинну обмотку вольтододаткового трансформатора ВДТ, індуктивність  $L$  і ємність  $C$  джерела реактивної потужності згідно другого закону Кірхгофа виконується вираз [3]

$$u_2 + u_{вдт-2} = U_L + U_C \quad (2)$$

Компенсація реактивної потужності навантаження відбувається за рахунок зміни напруги на конденсаторі  $C$  джерела реактивної потужності.

При фіксованому значенні напруги  $u_2$  вторинної обмотки трансформатора  $T_p$  це виконується шляхом зміни напруги на вторинній обмотці  $u_{ВДТ-2}$  вольтододаткового трансформатора ВДТ, яке формується АІН з постійної напруги, що надходить на його вхід з виходу випрямляча В.

Ефективність застосування запропонованого пристрою на електрорухомому складі визначалася за результатами розрахунків двох варіантів роботи електровоза: штатної схеми і з включенням пропонованого пристрою компенсації реактивної потужності.

Для вирішення поставленого завдання було використано математичне моделювання.

Розглянемо роботу електровоза, обладнаного пропонованим пристроєм компенсації реактивної потужності, при наступних значеннях елементів LC-фільтра:  $C = 3,3$  мФ,  $L = 421$  мкГн.

Значення ємності конденсатора  $C$  вибрано свідомо меншим для того, щоб оцінити ефективність від використання цього пристрою.

Напруга на первинній обмотці вольтододаткового трансформатора формується за допомогою автономного інвертора напруги, його амплітудне значення обчислюється за формулою

$$u_{вдт-1} = \mu E_d, \quad (3)$$

де  $\mu$  - глибина модуляції сигналів;  $E_d$  - постійна напруга на вході АІН.

Плавна зміна реактивної потужності  $Q_{крп}$  можлива за рахунок зміни величини напруги  $u_{ВДТ2}$

$$u_{вдт-2} = \mu \cdot E_d / k \quad (4)$$

При постійних значеннях  $E_d$  і  $k$  - коефіцієнта трансформації ВДТ зміна цієї напруги відбувається за рахунок глибини модуляції  $\mu$ . [8]

У результаті моделювання встановлено, що при включеному пристрої споживаний електровозом струм  $i$  синфазен з питомою напругою  $u$ , а форма  $i$  наближена до синусоїдальної (рис. 3).

Це свідчить про найбільш повну компенсацію реактивної потужності за рахунок максимального збільшення  $\cos \varphi = 1$ .

Однак в формі випрямленої напруги  $u_d$  з'явилися високочастотні пульсації, пов'язані з роботою АІН.

Таким чином, завдяки відсутності зсуву між споживаним струмом  $i$  і питомою напругою  $u$ , а також практично синусоїдальній формі мережевого струму і відбувається значне поліпшення енергетичних показників агрегату у всьому діапазоні струмових навантажень.



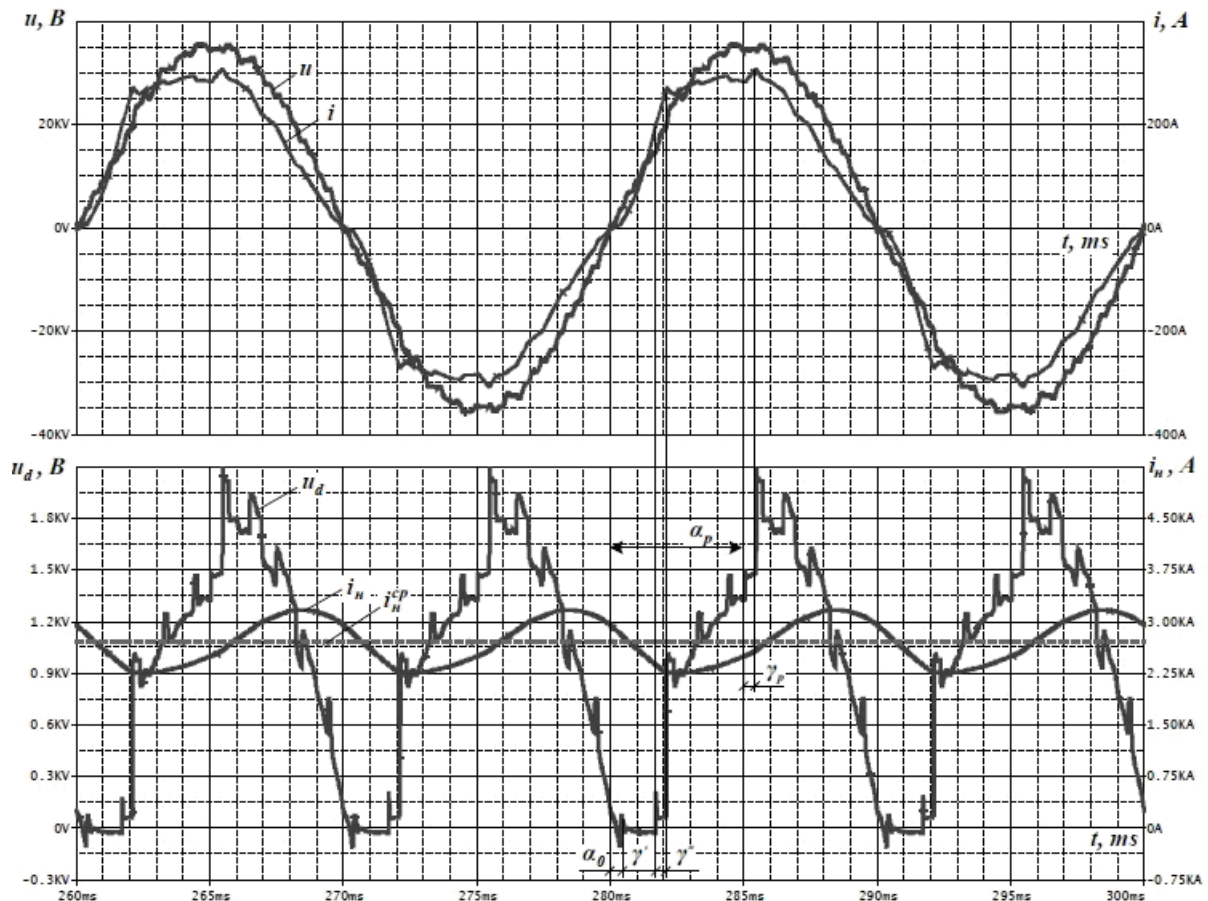


Рис. 3. Миттєві діаграми напруг і струму тягового агрегату ОПЕ-1А в режимі тяги при включенні пристрою компенсації:  $u$  - напруга живлення;  $i$  - споживаний електровозом струм;  $u_d$  - випрямлена напруга;  $i_n$  - струм тягових двигунів електровоза;  $i_{cp_n}$  - середній струм тягових двигунів електровоза

Таким чином, основна перевага пропонованого пристрою полягає в тому, що, на відміну від пасивного компенсатора реактивної потужності, при зміні реактивної потужності навантаження  $Q_n$  відбувається одночасна зміна реактивної потужності компенсатора  $Q_{крп}$ , яка може бути плавно збільшена (зменшена) за рахунок зміни величини напруги на вторинній обмотці вольтододаткового трансформатора. Це дозволяє повністю компенсувати реактивну потужність агрегату у всіх режимах його роботи і поліпшити його енергетичні показники.[9,10]

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** За допомогою компенсатора реактивної потужності, підключеного до вторинної обмотки трансформатора, можливо компенсувати реактивну потужність електрорухомого складу змінного струму без зміни силового перетворювача. Використання компенсатора призводить до значного підвищення коефіцієнту потужності в номінальному режимі роботи і до перекомпенсації реактивної потужності при малих струмах навантаження, на тягових агрегатах та електровозах. Але робота компенсатора реактивної потужності ефективною лише в певному діапазоні струмових навантажень. Тому для підвищення коефіцієнту потужності агрегату пропонується пристрій компенсації, що дозволяє збільшити коефіцієнт потужності в усьому діапазоні струмових навантажень за рахунок забезпечення рівності потужності компенсатора і реактивної потужності навантаження  $Q_n = Q_{крп}$  шляхом плавної зміни реактивної потужності компенсатора  $Q_{крп}$ .

Основна перевага пристрою компенсації полягає в тому, що на відміну від пасивного компенсатора реактивної потужності зміна реактивної потужності навантаження  $Q_n$  визиває одночасну зміну реактивної потужності компенсатора  $Q_{крп}$ , яка може бути плавно збільшена (зменшена) за рахунок зміни величини напруги на вторинній обмотці вольтододаткового трансформатора. Це дозволяє повністю компенсувати реактивну потужність агрегату в усіх режимах його роботи та підвищити його енергетичні показники, що дає позитивний економічний ефект.

## Список літератури

1. Балон Л.В., Браташ В.А., Бичун М.Л. “Электроподвижной состав промышленного транспорта” Москва “Транспорт” 1987.
2. Браташ В.А., Бичун М.Л., Володарский В.А., Жолобов Л.Ф., Карленко И.В., Потапов В.С. “Электровозы и тяговые агрегаты промышленного транспорта” Москва “Транспорт” 1977.
3. Бессонов Л.А. “Теоретические основы электротехники” Электрические цепи. 10-е издание – М. Гардарики 2000-638с.
4. Костин Н.А., д.т.н., проф., Саблин О.И. “Коэффициент мощности электроподвижного состава переменного тока” – Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна. Украина, 49010, Днепропетровск, ул. ак. В. Лазаряна, 2, ДИИТ, каф. “Теоретические основы электротехники”
5. Белых Б.П., Щуцкий В.И., Заславец Б.И., Чеботаев Н.И. “Электропривод и электрификация открытых горных работ” - Москва “Недра” 1983.
6. Широченко, Н.Н. В.А. Татарников, З.Г. Бибинишвили “Улучшение энергетики электровозов переменного тока” Железнодорожный транспорт. – 1988. – №7. С. 33-36.
7. Кучумов, В.А. “Электромагнитные процессы в однофазном компенсированном преобразователе электровоза” Вестник ВНИИЖТ. – 1988. – №4. – С. 19-23.
8. Мамошин Р. Р. “Энергетика системы переменного тока”, Железнодорожный транспорт – 1987. - №9 – с 69-70.
9. Кулинич Ю.М., Духовников В.К. “Повышение энергетической эффективности пассивного компенсатора электровоза переменного тока” Журнал «Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета»
10. А.С. №2467893. “Устройство для компенсации реактивной мощности электроподвижного состава” Авторы изобретения Ю.М. Кулинич, В.К. Духовников. – Дата публикации 27.11.2012 г., МКИ 7 В60L 9/00, Бюл. №33.

Рукопис подано до редакції 21.03.16

УДК 621.316

И.И. ПЕРЕСУНЬКО, аспирант, Криворожский национальный университет

## УВЕЛИЧЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ УЧАСТКОВЫХ СЕТЕЙ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЙ ДЛЯ САМОХОДНОЙ ТЕХНИКИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ШАХТ

В статье рассказывается про преимущества повышения напряжения до 660В внутришахтных участковых сетей для применения новой высокопроизводимой самоходной техники. Цель работы показать, что существует проблема качества электроэнергии на шахтах что ведет к снижению энергооборуженности предприятия. И предложено решение проблемы осуществить переход на более высокий уровень напряжения распределительных сетей. Повышение напряжения, как правило, улучшает технико-экономические показатели системы электроснабжения предприятия, одновременно улучшается и качество электроэнергии у потребителей.

**Ключевые слова:** увеличение напряжения, качество электроэнергии, технико-экономическая оценка

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Основным решением проблемы электроснабжения горных предприятий является соблюдение безопасности, обеспечения оптимальной надежности в схемах, обеспечение электроприемников (ЭП) необходимым качеством питающего напряжения во всех режимах работы старого и нового горнотранспортного оборудования и, кроме того, утвержденная система электроснабжения должна быть экономически наиболее выгодна.

Наиболее эффективным решением проблемы является повышение качества напряжения для старого и нового горнотранспортного оборудования. Требуется осуществить переход на более высокий уровень напряжения распределительных сетей. Повышение напряжения, как правило, улучшает технико-экономические показатели системы электроснабжения предприятия, одновременно улучшается и качество электроэнергии у потребителей.

**Анализ исследований и публикаций.** В литературе обсуждаются различные способы повышения качества питающего напряжения при основных показателях электроэнергии [1,2,6].

Были предложены различные решения по надежности электроснабжения в значительной степени зависят от качества электроэнергии ЭП [5,6].

В данной работе решаются вопросы оценки и улучшения показателей качества электроэнергии как при эксплуатации, так и на стадии проектирования систем электроснабжения горизонтов железорудных шахт.

**Цель исследований.** Возможность передачи большей мощности и лучшего качества напряжения по кабельным линиям меньшего сечения и снижении потерь электроэнергии при переходе на перспективные уровни напряжения для нового электрооборудования железорудных шахт.

**Изложение материала и результаты.** Высокие потери и разубоживание руды объясняются ухудшением горно-геологических условий разработки и применением устаревшей технологии очистной выемки полезного ископаемого, основанной на переносной горной технике [3].

Главным недостатком существующей технологии является применение устаревшей буровой и доставочной техники (станков НКР-100М и скреперных установок 30ЛС-2С и 55ЛС-2С), которые в условиях высокого горного давления не обеспечивают интенсивную обработку блоков [3].

Зарубежный опыт подземной разработки месторождений полезных ископаемых свидетельствует, что существенное повышение интенсивности очистной выемки, снижение потери и разубоживание руды невозможно без применения самоходной техники [3].

В настоящее время на очистных работах подземного Кривбасса самоходная техника практически не применяется [3].

Большое количество самоходной техники применяет электрический привод, который с помощью кабельных линий подсоединен к подземным подстанциям. Применяемая устаревшая буровая и доставочная техника использует напряжение 380 В которое в полной мере исчерпало себе по всем показателям, главным из которых является качество электрической энергии.

Повышения номинального напряжения, как одного из основных направлений улучшения показателей качества электроэнергии в подземной сети и повышения эффективности электропотребления на шахте [1]:

передачи необходимой мощности по гибким кабельным линиям ограниченного сечения основных жил;

обеспечения необходимых моментных характеристик электродвигателей в режимах перегрузки и пуска;

конструирования высоконадежных аппаратов защиты и коммутации.

Выбор соответствующего уровня напряжения может в полном объеме и на длительный срок решить задачу качественного электроснабжения внутришахтных потребителей таких как новая самоходная техника с учетом перспективы роста мощности их электропривод.

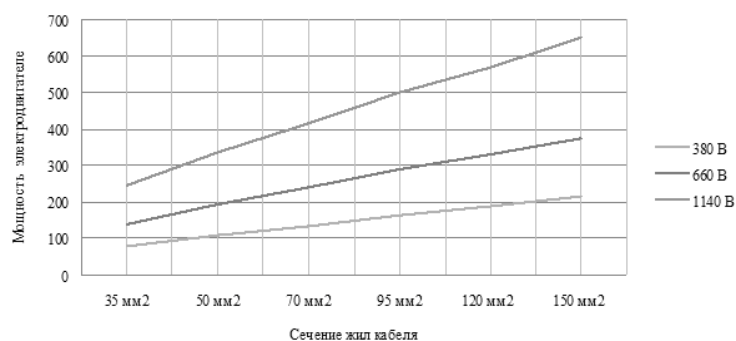
Этот путь в настоящее время является наиболее реальным и технически осуществимым [1].

Для совершенствования энергоснабжения забойной техники в внутришахтных сетях необходимо рассмотреть внедрение напряжения 660В, обеспечивающее значительный экономический эффект.

Так как применение напряжения 660В вместо 380В позволит значительно сократить потери электроэнергии, уменьшить номинальные токи и токи к.з. в 1,73 раза, экономить кабельную продукцию [8].

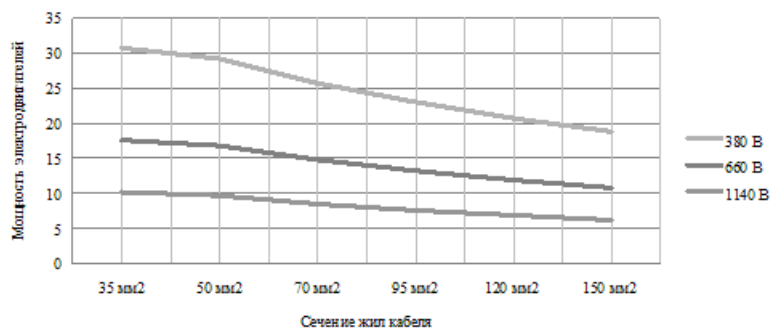
Повышение номинального напряжения как одного из основных направлений улучшения показателей качества электроэнергии в подземной сети и повышение эффективности электропотребления на шахте, обусловленными техническими трудностями и ограничениями:

передача необходимой мощности по гибким кабельным линиям ограниченного сечения основных жил (рис. 1);



**Рис. 1.** Максимальная мощность электродвигателей при присоединенных разных сечениях основных жил кабеля питания

обеспечения необходимых моментных характеристик электродвигателей в режимах перегрузки и пуска, определяющих их устойчивую мощность и нормальные пусковые условия, которые в шахтной сети сопровождаются большими потерями напряжения (рис. 2).



**Рис. 2.** Относительное значение потери электроэнергии в кабеле длиной 1 км при передаче мощности  $P_{\max}$  с различными сечениями основной жилы кабеля питания

Большое количество зарубежной самоходной технике используется электрический привод с суммарными мощностями 100-600 кВт и уровнями питающего напряжения 660 В и 1000 В.

Повышение уровня напряжения подземных подстанций для отечественных железорудных шахт может в полном объеме и на длительный срок решить задачу качественного электроснабжения внутришахтных потребителей с учетом перевооружением отрасли с использованием зарубежной самоходной техники и перспективы роста мощности их электроприводов. Этот путь в настоящее время является наиболее реальным и технически осуществимым[1].

Определение оптимального напряжения шахтных участков сетей, питающих мощную самоходную технику, производится путем технико-экономического сравнения вариантов сети при номинальных напряжениях 0,38, 0,66 и 1 кВ.

Сравнительная технико-экономическая оценка вариантов электроснабжения при разных напряжениях производится путем сопоставления как экономических (стоимостных) параметров, так и технических (качественных) показателей, не имеющих стоимостного выражения[1].

Качественные показатели варианта являются лучшими, если:  
 при работе в электросети возникают меньшие колебания напряжения;  
 уменьшаются потери мощности и энергии;  
 создаются более благоприятные условия для монтажа и эксплуатации сетей и оборудования;  
 сокращается расход цветных металлов;  
 имеется возможность без значительных затрат осуществить реконструкцию сети (увеличить передаваемую мощность, длину кабелей и т.п.).

Хорошее качество электроэнергии определяется стабильностью частоты и напряжения на зажимах потребителей. Если стабильность частоты должна обеспечиваться энергосистемой, то стабильность напряжения на зажимах потребителей в значительной степени зависит от правильного проектирования и эксплуатации электроустановок. Основой правильного решения вопросов электроснабжения, включая расчет сетей горного предприятия, должно быть обеспечение ЭП напряжением необходимого качества во всех режимах работы двигателей[1].

Одним из важнейших технико-экономическим параметром любого производства является производительность оборудования -  $p$ , которая для конкретного участка отрасли в момент времени -  $\tau$  определяется используемым уровнем питающего напряжения  $u_{i,j}$ , принятой технологией  $t_{i,j}$  и текущими значениями электротехнических параметров  $et_{i,j}$

$$p_{i,j}(\tau) = p(u_{i,j}(\tau), t_{i,j}(\tau), et_{i,j}(\tau)), \quad (1)$$

Интерес, естественно, представляет максимально возможный достижимый уровень производительности оборудования. Экономически целесообразный уровень питающего напряжения сам по себе не обеспечивает максимум производительности оборудования. Такой уровень производительности может быть достигнут за счет выбора и применения соответствующих уровней значений технологических и электротехнических параметров систем железорудных участков.

При обозначениях, введенных выше, постановка задачи настоящей работы выглядит следующим образом.

Требуется определить экономически целесообразный уровень питающего напряжения -  $u_m^*$ , при котором обеспечиваются совокупные минимальные затраты (2,9) при существующих значениях технологических параметров, применяемых для каждого рассматриваемого участка железорудной отрасли

$$\begin{aligned} u_{i,j}^* &= \arg(\min(z_{i,j}(U, T)) \\ u_{i,j}^* &\in U \\ i &= \overline{1, U_m}; j = \overline{1, U_y} \end{aligned} \quad (2)$$

где  $z_{i,j}(U, T)$  - стоимость соответствующего оборудования и материалов, а также затраты на монтаж и внедрение этого оборудования; для выбранного уровня напряжения -  $u_m^*$  - определить необходимые значения электротехнических и технологических параметров, обеспечивающих максимально возможную производительность

$$\begin{aligned} et_{i,j}^*, t_{i,j}^* &= \arg(\max(p_{i,j}(u_{i,j}^*, T, ET)), \\ et_{i,j}^* &\in ET; t_{i,j}^* \in T \end{aligned} \quad (3)$$

Повышенное напряжение подземных подстанций (660В) при больших расстояниях от источника питания до электропривода позволяет снизить потери мощности и электроэнергии. Напряжение 660В целесообразно также на предприятиях с высокой удельной плотностью электрических нагрузок на квадратный метр площади, концентрацией мощностей и с большим числом электродвигателей в диапазоне мощностей 220-600 кВт. При напряжении 660В увеличивается радиус действия подземных подстанций примерно в 2 раза по сравнению с подстанциями на 380В. Кроме того, появляется возможность повысить единичную мощность трансформаторов и, тем самым, сократить число подземных подстанций, линий и аппаратов напряжением выше 1 кВ. Одновременно снижается примерно в 2 раза расход цветных металлов. Стоимость электродвигателей и трансформаторов одной и той же мощности при напряжении 380/220В и 660/380В практически одинакова, в то время как пропускная способность сети 660/380В увеличивается в 1,73 раз [8].

Как следует из рис. 1,2, при повышении уровня номинального напряжения в шахтной участковой сети пропорционально увеличивается передаваемая по кабелю мощность при одновременном уменьшении относительного значения потери напряжения в питающем кабеле.

При этом устойчивый момент двигателя привода исполнительных органов в сети с номинальным напряжением выше 380 В увеличится на 10-20 % по сравнению с их питанием от сети напряжением 380 В.

Только при напряжении более 380 В, особенно при увеличении длины забойной выработки до 200-300 м в перспективе, можно передать к двигателям суммарную мощность 250-400 кВт энергию с требуемыми показателями качества при сечении основных жил питающих кабелей не более 50-150 мм<sup>2</sup>.

**Выводы и направления дальнейших исследований.** Таким образом, предлагаемый перевод электроснабжения участков железорудных шахт на более высокое напряжение позволил не только значительно повысить эффективность использования существовавших транспортного и проходческого оборудования, но и создать новые, более производительные образцы.

Кроме того, перевод участковых электросетей шахт на повышенное напряжение обеспечило экономию тысяч тонн меди за счет уменьшения сечения силовых кабелей и токоведущих частей коммутационных аппаратов.

Обобщая вышесказанное, можно констатировать, что перспективный уровень напряжения шахтных участковых сетей, питающих мощные погрузочных и бурильных машины, а также другое разнообразное шахтное оборудование должен быть очевидно повышен и при этом опираться на следующие возможные значения: 660 В.

## Список литературы

1. **Беляк В.Л., Плащанский Л.А.** Увеличение напряжения участковых сетей как способ повышения эффективности использования горных машин в высоконагруженных забоях угольных шахт М.: Горный информационно-аналитический бюллетень МГТУ - 2007 - № 9 - С. 286-290.
2. **Железко, Ю.С.** Качество электроэнергии в сетях и электромагнитная совместимость оборудования / Ю.С. Железко // Электротехника. 1989. — №10 -с. 73-77.
3. **Ступник Н.И., Кудрявцев М.И., Басов А.М.** Пути совершенствования технологии подземной разработки богатых железных руд Кривбасса. Вісник КТУ, вип. 26, 2010.
4. **Кронгауз, Д.Э.** Повышение качества электроэнергии в городских распределительных сетях посредством управления режимами реактивной мощности / Д.Э. Кронгауз // Промышленная энергетика. 2010. - № 10. - С. 39 - 43 .
5. **Плащанский Л.А.** Основы электроснабжения горных предприятий М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2006 г. — 499 с: ил. : Учебник для вузов. — 2-е изд., исправ.
6. **Плащанский Л.А., Беляк В.Л.** Анализ технологических схем с целью рационального электроснабжения участков угольных шахт при напряжении 3 (3,3) кВ// М.: Горный информационно-аналитический бюллетень МГТУ - 2007 - № 6 - С. 238-241
7. **Волотковский С.А., Разумный Ю.Т., Пивняк Г.Г. и др.** Электроснабжение угольных шахт. М., Недра, 1984, 376с.
8. **Смирнов А.Г.** Рекомендации по проектированию силового электрооборудования напряжением до 1000 в переменного тока промышленных предприятий. Москва 1989 г.
9. **Нефедова, Н.В.** Улучшение качества напряжения в подземных распределительных сетях 6 кВ калийных рудников установками продольной компенсации потерь напряжения / Н.В. Нефедова и др. // М.: Энергетика. 1979. - 324 с.

Рукопись подана в редакцию 24.04.16

УДК 622.646:621.86.067.2:62.83

Д.В. БАТРАКОВ, асистент, Криворізький національний університет

## АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВІБРАЦІЙНОЇ ТРАНСПОРТУЮЧОЇ МАШИНИ З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИПУСКУ РУДИ

Проведений аналіз можливих режимів роботи вібраційної транспортуючої машини при використанні регульованого електропривода з метою підвищення ефективності процесу випуску руди. Математично розглянуто процес руху одиничної частинки по вібраційному органу для гармонійних коливань. Описані режими роботи для відповідних значень частоти коливань та амплітуди. Встановлено, що отриманий коефіцієнт режиму роботи вібротранспортної установки характеризує різні режими руху матеріалу: без відриву, з відривом та з відривом і без відриву матеріалу від вантажонесучого органу. Проведене математичне моделювання характеристики ефективності режиму роботи на прикладі одномасної вібраційної машини з інерційним приводом при зміні частоти обертання шляхом використання регульованого електропривода для номінальних параметрів. Встановлені значення коефіцієнту режиму роботи, частоти та амплітуди, які відповідають найбільш ефективним режимам вібротранспортування з точки зору досягнення максимальної швидкості транспортування руди.

**Ключові слова:** вібрації, вібротранспортування, ефективність, частотні характеристики, електропривод

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Розробка покладів корисних копалин пов'язана з переходом на значні глибини, що різко позначається на трудомісткості процесу, збільшення собівартості руди і пред'являє підвищені вимоги до інтенсифікації, концентрації та підвищення ефективності робіт з випуску гірничої маси. Випуск руди в умовах залізрудних шахт криворізького басейна здійснюється одномасними вібромашинами з інерційним приводом типу 1АШЛ, ЛШВ-3,35, ВДПУ-4ТМ, ПВУ, які в недостатній мірі приведені у відповідність з конкретними гірськими умовами, що знижує ефективність їх застосування [1-2]. Електропривод вібраційних установок є нерегульованим, внаслідок чого відсутня можливість регулювання параметрами роботи та адаптації обладнання до гірничих умов. Таким чином, підвищення ефективності роботи віброживильників і їх електроприводу є актуальною науково-практичною задачею.

Одним з основних завдань сучасної теорії і практики вібраційного транспортування руди є оптимізація режимів руху матеріалу по вібруючій поверхні. Оскільки одним з найважливіших показників роботи вібротранспортуючої машини (ВТМ) є її продуктивність, що визначається

головним чином швидкістю транспортування матеріалу і корисним перетином вантажонесучого органу (ВО), то завдання оптимізації режиму зводиться в основному до знаходження таких значень параметрів ВМ, при яких швидкість переміщення матеріалу буде максимальною в процесі навантаження і мінімально можливою в процесі досипання руди у вагонетки. Враховуючи, що швидкість руху матеріалу по вібруючій поверхні переважно визначається величиною амплітуди і частотою коливань ВО, а також напрямком коливань ВО та кутом нахилу останнього до горизонту, стає очевидним актуальність розрахунку і комплексного розгляду режимів роботи ВМ та характеристики ефективності одномасної вібраційної системи з інерційним приводом. Це надасть можливість найбільш точного визначення технологічних параметрів віброприводу та їх урахування в процесі дослідження, проектування, та експлуатації вібраційних установок, зокрема для випуску руди.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Питання теорії і розрахунку ВМ та їх робочих характеристик широко розглянуті в роботах А.О. Співаковського, І.Ф. Гончаревича, І.І. Блехмана, В.Н. Потураєва, А.Д. Учителя та ін. [3-17]. Дослідниками встановлено, що на рух матеріалу по вібруючій поверхні впливають наступні параметри: об'ємна вага, товщина шару на ВО, гранулометричний склад і форма частинок матеріалу, вологовміст і липкість, пружність частинок, сили зовнішнього і внутрішнього тертя частинок, повітропроникність шару матеріалу і, відповідно, частота коливань ті амплітуда. Таке різноманіття параметрів та факторів, що визначають процес вібротранспортування, ускладнює його дослідження аналітичними методами і ставить відомі межі застосування та узагальнення результатів експериментів. Залежно від властивостей матеріалу для підтримки високої ефективності роботи ВМ необхідним є забезпечення можливості регулювання параметрів амплітуди і частоти коливань ВО шляхом використання регульованого електропривода. При оцінці доцільності і необхідності використання регульованого електропривода для ВМ необхідний комплексний розгляд амплітудо-частотних, енергетичних, силових, потужнісних, механічних характеристик одномасної вібраційної системи з інерційним приводом, режимів роботи ВМ та характеристики ефективності.

**Викладення матеріалу та результати.** Продуктивність вібротранспортування залежить головним чином від швидкості переміщення матеріалу по вібруючій поверхні [1-3, 9-13]. Ця швидкість, в свою чергу, визначається значенням амплітуди і частотою коливань, напрямком коливань ВО і кутом нахилу останнього до горизонту. Ці ж параметри в поєднанні з довжиною ВО в значній мірі визначають ефективність процесу і рівномірність подачі живильників. Механіка руху матеріалу по вібруючій поверхні визначає як технологічні показники процесу вібротранспортування, так і параметри вібротранспортної установки. Дослідження переміщення матеріалу по вібруючій поверхні обмежуються в основному розглядом руху одиначної частки [10,11,15-17]. Поширення методів аналізу руху одиначної частки на масу матеріалу, що містить безліч таких частинок, не може дати задовільних результатів внаслідок труднощі аналітичного обліку впливу різноманіття факторів, що визначають стиснутий рух часток. Тому, поряд з подальшим розвитком аналітичних методів визначення параметрів вібротранспортування, необхідне проведення великої кількості експериментальних досліджень, що дозволяють уточнювати теоретичні передумови і створювати практичні методи розрахунків. Для правильного підходу до аналізу механічних та електроприводних параметрів ВМ і визначення технологічних параметрів вібротранспортування розглянемо основи цього процесу.

При розгляді руху одиначної частки по ВО в більшості випадків приймаються такі припущення. Передбачається, що ВО здійснює гармонійні коливання, а ВО представляє собою абсолютно жорстку конструкцію, всі точки якої переміщуються за одним законом. Не враховуються також розміри, форма і пружні властивості часток матеріалу. Перенесення результатів аналізу руху одиначної частки на масу матеріалу робиться без досить обґрунтованого обліку взаємного впливу частинок, об'ємної маси і гранулометричного складу матеріалу, його вмісту вологи, зовнішнього і внутрішнього тертя окремих частинок і т. ін. У тих випадках, коли розглядаються одночасні процеси транспортування, нехтують впливом зміни маси і гранулометричного складу матеріалу по довжині поверхні, зменшенням товщини шару матеріалу в міру просування його по лотку тощо. При зазначених вище припущеннях автори теоретичних досліджень [10,11,20-22] розглядають рух плоскої матеріальної частинки, що знаходиться на вібруючій поверхні, нахиленої до горизонту під кутом  $\alpha$  (рис. 1).

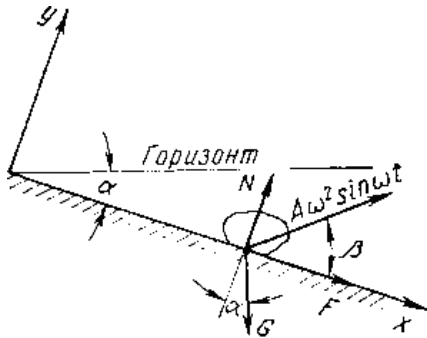


Рис. 1. Схема сил, діючих на частинку матеріалу

Диференціальні рівняння руху матеріальної точки відносно похилої шорсткуватої поверхні при цьому записуються у вигляді

$$\left. \begin{aligned} \frac{G}{g} \ddot{x} &= G \sin \alpha + \frac{G}{g} A \omega^2 \cos \beta \sin \omega t + F; \\ \frac{G}{g} \ddot{y} &= G \cos \alpha + \frac{G}{g} A \omega^2 \sin \beta \sin \omega t + N. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Сила тертя частинки о робочу поверхню при  $y=0$ , тобто при русі частинки без відриву від вібруючої поверхні визначається виразом

$$F = \begin{cases} -fN \text{ при } \dot{x} < 0; \\ fN \text{ при } \dot{x} > 0; \\ -f_1 N \text{ при } \dot{x} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

і, відповідно, при  $y > 0$ , тобто при русі частинки після відриву від вібруючої поверхні

$$F = N = 0 \quad (3)$$

У рівняннях і на рис. 1  $x$  і  $y$  є координатами матеріальної точки в системі  $xOy$ , пов'язаної з вібруючою поверхнею;  $G$  - Сила тяжіння, що діє на частинку;  $g$  - прискорення сили тяжіння;  $\beta$  - кут між напрямком вібрацій і площиною;  $A$  і  $\omega$  - відповідно амплітуда і частота коливань вібруючої поверхні;  $N$  - нормальна реакція;  $f_1$  - коефіцієнт тертя спокою;  $f$  - коефіцієнт тертя ковзання.

Коли частка матеріалу знаходиться на вібруючій площині, тобто  $y=0$ , з другого рівняння системи (1) визначається нормальна реакція

$$N = G \cos \alpha - \frac{G}{g} A \omega^2 \sin \beta \sin \omega t \quad (4)$$

Підставивши це значення  $N$  в рівняння (2), а отримані потім значення  $F$  в перше рівняння системи (1), отримаємо рівняння руху матеріальної точки по площині

$$\ddot{x} = g \frac{\sin(\alpha \mp \sigma)}{\cos \sigma} + A \omega^2 \frac{\cos(\beta \mp \sigma)}{\cos \sigma} \quad (5)$$

в якому  $\sigma = \arctg f$  - кут тертя. Верхні знаки в рівнянні (5) відповідають  $x > 0$ , а нижні  $x < 0$ .

Отже, при польоті частинки, коли виконується умова (3), рівняннями, що описують її рух, будуть

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x} &= g \sin \alpha + A \omega^2 \cos \beta \sin \omega t \\ \ddot{y} &= g \cos \alpha + A \omega^2 \sin \beta \sin \omega t \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

В результаті інтегрування рівнянь (5) і (6) можуть бути визначені швидкості і переміщення частинки при її відносному ковзанні і польоті над площиною транспортування.

Співвідношення між тривалістю ковзання і польоту частки залежить від режиму роботи вібротранспортної установки, що визначається амплітудою  $A$  коливань ВО, частотою  $\omega$ , а також кутом напрямку вібрацій  $\beta$  і кутом нахилу ВО  $\alpha$ .

Частинка матеріалу матиме контакт з вібруючою поверхнею до тих пір, поки складова сили інерції частинки, нормальна до робочої поверхні, не досягне рівня нормальної складової сили тяжіння частинки, тобто

$$\frac{G}{g} A \omega^2 \sin \beta \sin \omega t \geq G \cos \alpha \quad (7)$$

З умови (7) можна визначити момент часу  $t_0$ , в який відбудеться відрив частинки від вібруючої поверхні

$$t_0 = \frac{1}{\omega} \arcsin \left( \frac{g}{A \omega^2} \cdot \frac{\cos \alpha}{\sin \beta} \right) \quad (8)$$

Оскільки в умові (7) ліва частина має максимальне значення при  $\omega t = \pi/2$ , то відрив частки настає, коли



$$K_V = \frac{A\omega^2}{g} \cdot \frac{\sin \beta}{\cos \alpha} \geq 1 \quad (9)$$

де  $K_V$  - коефіцієнт режиму роботи вібротранспортної установки, безрозмірний параметр.

Залежно від величини  $K_V$  можуть мати місце такі режими руху матеріалу:

при  $K_V < 1$  - рух без відриву матеріалу від ВО;

при  $K_V > 1$  - рух з відривом матеріалу від ВО (режими з підкиданням);

при  $K_V = 1$  - відповідає межі режимів руху з відривом і без відриву матеріалу від ВО.

Коефіцієнт режиму роботи  $K_V$  при обраних значеннях кутів  $\beta$  й  $\alpha$  залежить від амплітуди прискорення  $A\omega^2$  ВО. При порівняно малих значеннях прискорення мають місце режими без підкидання. При режимах, яким відповідають значення  $0 < K_V < 1$  матеріал може рухатись разом з ВО або ковзати на його робочій поверхні в напрямку транспортування або в протилежну сторону.

Транспортований матеріал рухається разом з ВО, якщо амплітуда прискорення останнього знаходиться в межах

$$0 < A\omega^2 < \frac{g \sin(\sigma_1 - \alpha)}{\cos(\sigma_1 - \beta)} \quad (10)$$

де  $\sigma_1 = \arctan f_1$  - кут тертя спокою.

Якщо збільшувати прискорення ВО вище значення, що визначається умовою (10), то частина матеріалу протягом деякої частини циклу коливань буде ковзати в напрямі транспортування. У решті циклу вона буде рухатись разом з ВО. Таке двофазне переміщення має місце при значеннях амплітуди прискорення, що задовольняють умові

$$\frac{g \sin(\sigma_1 - \alpha)}{\cos(\sigma_1 - \beta)} < A\omega^2 < \frac{g \sin(\sigma_1 + \alpha)}{\cos(\sigma_1 + \beta)} \quad (11)$$

Цей режим характеризується порівняно невеликими прискореннями ВО і називається тихохідним. Швидкість ковзання частинок при тихохідному режимі тим вище, чим більше значення  $A\omega^2$ .

При прискореннях ВО, що перевищують значення, обмежені умовою (11), виникає ковзання частинок матеріалу не тільки в сторону транспортування, але і в зворотньому напрямку. Протягом одного циклу коливань ВО, поряд з цими двома фазами ковзання, можлива фаза руху, спільно з робочою поверхнею, а режим руху буде напівшвидкохідним.

Якщо продовжувати збільшувати прискорення, то фаза спільного руху буде спадати. При деякому значенні прискорення ця фаза руху абсолютно зникне, а переміщення частинок почне здійснюватися лише шляхом ковзання, а режим руху буде швидкохідний.

Чисто ковзний рух триває до тих пір, доки нормальна до робочої поверхні складова прискорення ВО не стане рівною нормальній складовій прискорення сили тяжіння. Межі прискорення ВО, що відповідають напівшвидкохідному і швидкохідному режимам, визначаються нерівністю

$$\frac{g \sin(\sigma_1 + \alpha)}{\cos(\sigma_1 + \beta)} < A\omega^2 < \frac{g \cos \alpha}{\sin \beta} \quad (12)$$

При значеннях прискорення

$$A\omega^2 > \frac{g \cos \alpha}{\sin \beta} \quad (13)$$

має місце режим руху з підкиданням транспортного матеріалу ( $K_V > 1$ ). При  $K_V > 1$  існує безліч режимів руху матеріалу. Ці режими можуть включати в себе різні комбінації фаз спільного руху, ковзання в напрямку транспортування, підкидання в напрямі транспортування, ковзання в напрямку зворотньому до напрямку транспортування, зрівнювання швидкостей частинок матеріалу після їх падіння на поверхню ВО.

З точки зору повноти передачі швидкості ВО матеріалу і зменшення зносу робочих поверхонь найбільш вигідним режимом є такий, при якому існують тільки дві фази руху матеріалу: рух без контакту з ВО (підкидання в напрямку транспортування) і фаза зрівнювання швидкостей частинок матеріалу і ВО, яка відбувається без ковзання матеріалу по робочій поверхні. Теоретичними дослідженнями руху окремих частинок [10,11,15-18] встановлена наявність таких

значень амплітуди прискорення  $A\omega^2$  ВО, при яких частки постійно знаходяться над вібруючою поверхнею, вдаряючись з нею через однакові проміжки часу, рівні або кратні періоду коливань.

Високочастотний режим характеризується значним перевищенням амплітуди прискорення ВО над прискоренням сили тяжіння. При роботі на цьому режимі частка матеріалу протягом невеликого інтервалу часу переміщується спільно з ВО. При цьому на неї діє вертикально вниз сила тяжіння і в бік, протилежний напрямку руху сила тертя, яка залежить від величини і напрямку прискорення ВО.

Тертя між часткою і транспортуючою поверхнею зберігається до тих пір, доки прискорення сили тяжіння перевищує вертикальну складову прискорення ВО. Як тільки останнє стає рівним від'ємному значенню прискорення сили тяжіння, відбувається відрив частки матеріалу від поверхні транспортування: частка підкидається на певну висоту, а потім падає, вдаряючись об поверхню транспортування і частково втрачаючи, внаслідок не цілком пружного удару, свою первісну швидкість, після чого знову підкидається.

Деяко по-іншому поведуться на вібруючій поверхні дрібнодисперсні пилоподібні матеріали. На їх рух значний вплив чинить тиск повітря, що знаходиться в шарі матеріалу. З огляду на те, що при підкиданні і падінні шару матеріалу повітря не встигає повністю проходити крізь нього, в просторі між транспортною поверхнею і шаром матеріалу послідовно утворюються області розрідження і підвищення тиску. Під впливом цих пульсацій тиску відбувається періодичний рух повітря через шар матеріалу зверху вниз при підкиданні шару і від низу до верху при його падінні. Це призводить до того, що матеріал рухається так би мовити в підвішеному стані, майже не вступаючи в зіткнення з ВО, що в значній мірі знижує знос робочої поверхні останнього. Ступінь впливу пульсацій тиску повітря залежить в основному від газопроникності матеріалу і частоти коливань транспортуючого органу.

Враховуючи, що амплітуда вимушених коливань системи  $A$  залежить від багатьох параметрів [2] і описується рівнянням

$$A = \frac{m_0 r \omega^2}{\sqrt{\mu^2 c^2 \omega^2 + (c - m \omega^2 - m_0 \omega^2)^2}}, \quad (14)$$

Можна отримати характеристику ефективності режиму роботи вібромашини з інерційним дебалансним приводом та направленим рухом коливань

$$K_V(\omega) = \frac{m_0 r \omega^4}{g \sqrt{\mu^2 c^2 \omega^2 + (c - m \omega^2 - m_0 \omega^2)^2}} \cdot \frac{\sin \beta}{\cos \alpha}. \quad (15)$$

Теоретичними і експериментальними дослідженнями встановлено [4, 16], що при значеннях параметрів вібрації, які відповідають ефективним режимам вібротранспортування, для матеріалів зі значною газопроникністю коефіцієнт  $K_V$  повинен лежати в межах  $1,5 < K_V < 3,3$ .

Для більш наочної оцінки режиму роботи віброустановки розглянемо чисельний приклад. Вихідні динамічні параметри приводу вібролюка 1АШЛ: осцилятор з приведеної масою  $m=5152$  кг; приведена жорсткість основних пружних зв'язків  $C=3508 \cdot 10^3$  Н/м; в'язкість основних пружних зв'язків  $\mu=0,68 \cdot 10^{-3}$  с при номінальній частоті  $\omega=93,724$  с<sup>-1</sup>; ексцентриситет дебалансів  $r=0,087$  м; маса дебалансів  $m_0=135,9$  кг; маса ВО  $m_r=1500$  кг; маса всього матеріалу, що знаходиться на ВО  $m_m=10060$  кг; коефіцієнт приєднаної маси матеріалу для руди  $\lambda=0,363$ ; приєднана маса матеріалу  $m_{np}=3652$  кг. Тоді, власна резонансна частота системи

$$p_{011} = \sqrt{\frac{C}{m_{11} + m_0}} = 25,756, \text{ рад/с, та осциляторна резонансна частота } p_{11} = \sqrt{\frac{C}{m_{11}}} = 26,094, \text{ рад/с.}$$

На рис. 2,3 зображено отримані в результаті математичного моделювання за формулами (14,15) амплітудо-частотна та характеристика ефективності режиму роботи ВТМ на прикладі 1АШЛ - одномасної вібраційної машини з інерційним приводом.

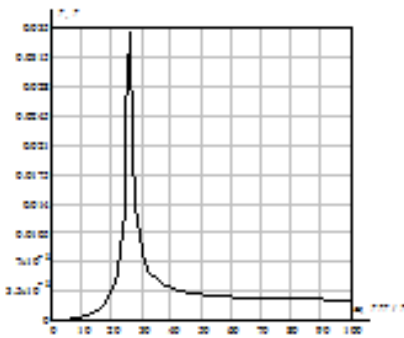


Рис. 3. Амплітудо-частотна характеристика ВТМ

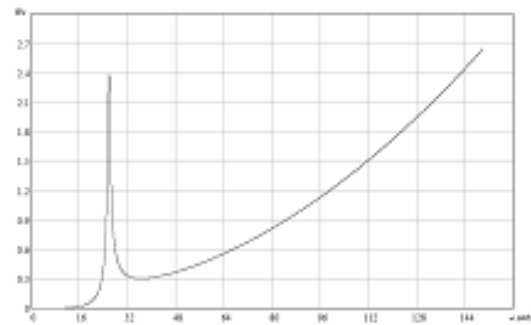


Рис. 4. Характеристика ефективності режиму роботи ВТМ

Як видно з амплітудо-частотної характеристики одномасної вібраційної системи з інерційним приводом при номінальній кутовій частоті обертання дебалансів амплітуда коливань  $A_{11}(\omega_n) = 0,003$  м, а при резонансній частоті  $A_{11}(p_{011}) = 0,035$  м і, відповідно, кратність максимальної амплітуди коливань до номінальної  $\frac{A_{11}(p_{011})}{A_{11}(\omega_n)} = 14,5$ . Аналіз характеристик при зазначе-

них вихідних динамічних параметрах показує, що інерційний привод не створює стабільні коливання в резонансній області (рис. 3), а створює їх тільки в до- та зарезонансному режимі роботи. Як видно з графіку, амплітуда коливань при даних параметрах системи є функцією частоти збуджуючої сили, причому при резонансі амплітуда досягає максимального значення. Система з інерційним приводом має порівняно невеликі коливання збуджуючих зусиль в області практично реалізованих робочих частот.

Отже, аналізуючи отримані графіки, можна зробити висновок, що при оцінці і проектуванні систем з інерційним типом приводу необхідно враховувати вагомі пікові значення амплітуди та показник ефективності режиму роботи.

З отриманої характеристики ефективності наочно видно, що коефіцієнт режиму роботи  $K_V$  лежить в межах  $1,5 < K_V < 3,3$  в резонансній зоні частот коливань ( $K_V = 1,2-2,5$ ) і для режимів роботи при частоті коливань рівній або більше за номінальну ( $K_V = 1,2-2,5$ ). Такі режими роботи ВТМ відповідають найбільш ефективним режимам вібротранспортування з точки зору досягнення максимальної швидкості транспортування руди.

Характеристики та залежності, отримані в результаті розрахунку, можуть використовуватись при оцінці можливості регулювання параметрів амплітуди і частоти коливань робочого органу для підтримки високої ефективності роботи вібраційної установки та при оцінці взаємодії системи «регульований електропривод-вібраційна машина», при яких швидкість переміщення матеріалу буде максимальною в процесі навантаження і мінімально можливою в процесі досипання руди у вагонетки.

**Висновки і шляхи подальших досліджень.** Вібротранспортуючі машини з відсутністю регулювання частоти обертання електропривода працюють з номінальними частотами обертання дебалансів і відповідно номінальними частотами коливань вантажонесучого органу. Однак, в попередніх роботах і в даній, встановлено, що на рух матеріалу по вібруючій поверхні впливають багато параметрів і факторів. Тому, при зміні властивостей матеріалу для підтримки високої ефективності роботи вібраційної машини необхідним є забезпечення можливості регулювання параметрів амплітуди і частоти коливань шляхом використання регульованого електропривода з урахуванням режимів роботи, які відповідають робочим параметрам установки.

У роботі проведений аналіз режимів роботи та проведено математичне моделювання амплітудо-частотної та характеристики ефективності режиму роботи вібротранспортуючої машини на прикладі 1АШЛ – одномасної вібраційної машини з інерційним приводом, при зміні частоти обертання шляхом використання регульованого електропривода для номінальних параметрів. Встановлено, що отриманий коефіцієнт режиму роботи вібротранспортної установки характеризує різні режими руху матеріалу: без відриву, з відривом та з відривом і без відриву матеріалу від вантажонесучого органу. Встановлені значення коефіцієнту режиму роботи, частоти та амплітуди, які відповідають найбільш ефективним режимам вібротранспортування з точки зору досягнення максимальної швидкості транспортування руди.

При оцінці доцільності і необхідності використання регульованого електропривода необхідний розгляд амплітудо-частотних характеристик, аналіз режимів роботи а характеристики ефективності при зміні динамічних та технологічних параметрів вібротранспортної машини, що і є напрямком подальших досліджень.

### Список літератури

1. Батраков Д.В. Применение вибрационных питателей для выпуска руды в условиях железорудных шахт криворожского бассейна//Вісник Криворізького національного університету. – Кривий Ріг. – Вип. 34, 2013. – С. 104-108.
  2. Батраков Д.В., Горбачов Ю.Г. Характеристики одномасної вібраційної транспортуючої машини з інерційним приводом//Гірничий Вісник Криворізького національного університету. – Кривий Ріг. – Вип. 97, 2014. – С. 69-75.
  3. Учитель А.Д., Гушин В.В. Вибрационный выпуск горной массы/ А.Д. Учитель, В.В. Гушин. – М.: Недра, 1981. – 232 с.
  4. Спиваковский А. О. Транспорт в горном деле.-М.:Наука,1985.-127 с.
  5. Спиваковский А. О., Гончаревич И. Ф. Вибрационные и волновые транспортирующие машины/ А. О. Спиваковский, И. Ф. Гончаревич.- М.:Наука,1983.-287 с.
  6. Спиваковский А. О., Гончаревич И. Ф. Вибрационные конвейеры, питатели и вспомогательные устройства/ А. О. Спиваковский, И. Ф. Гончаревич.- М.:Машиностроение,1972.-327 с.
  7. Гончаревич И. Ф. Вибротехника в горном производстве.-М.:Недра,1992.-319 с.
  8. Гончаревич И. Ф., Вихнович О. Л. Вибрационные установки для выпуска руды (конструкции, методы расчета, рекомендации по эксплуатации и наладке).-М.:Недра,1967.-97 с.
  9. Гончаревич И. Ф., Фролов К. В. Теория вибрационной техники и технологии/ И. Ф. Гончаревич, К. В. Фролов - М.:Наука,1981.-319 с.
  10. Гончаревич И.Ф.,Сергеев П.А. Вибрационные машины в строительстве/И.Ф. Гончаревич, П.А. Сергеев -М.:Машгиз,1963.-310 с.
  11. Блехман И. И. Что может вибрация?.-М.:Наука,1988.-207 с.
  12. Блехман И. И., Джанелидзе Г. Ю. Вибрационное перемещение/ И. И. Блехман, Г. Ю. Джанелидзе.-М.:Наука,1964.-410 с.
  13. Потураев В. Н., Белобров В. И., Михайленко Е. И. Анализ динамики механических систем на аналоговых ЭВМ/В. Н. Потураев, В. И. Белобров, Е. И. Михайленко.-К.:Вища школа,1989.-150 с.
  14. Потураев В. Н., Франчук В. П., Червоненко А. Г. Вибрационные транспортирующие машины: основы теории и расчета/В. Н. Потураев, В. П. Франчук, А. Г. Червоненко.-М.:Машиностроение,1964.-272 с.
- Рукопис подано до редакції 26.04.16

УДК 621.316.7

В.С. КОЗЛОВ, асистент, А.Ю. ЄВМЕНОВ, студент  
Криворізький національний університет

### ОЦІНКА ПОТЕНЦІАЛУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОКАТНОГО СТАНУ

Подана робота присвячена питанням електричного енергозбереження. В роботі доведено, що найбільш затратним з енергетичної точки зору сектором національної промисловості є металургійне виробництво. Однією із ключових ланок металургії є прокатний стан. Таким чином, в роботі визначено основний об'єкт, який потребує «енергетичної оптимізації».

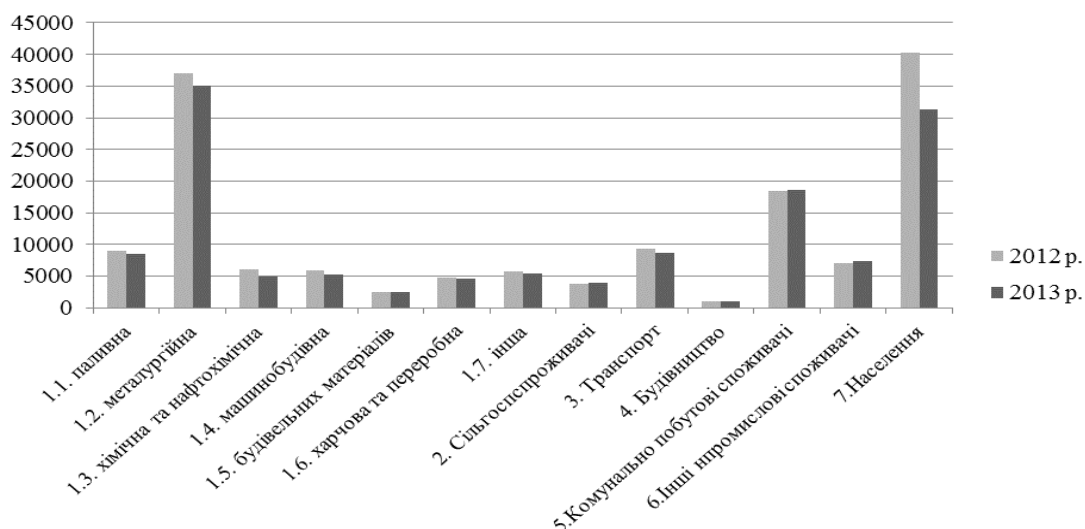
На прикладі неперервного заготівельного стану 900/700/500 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» виконано оцінку потенціалу енергоефективності. В результаті оцінки показано, що максимальний економічний ефект можна отримати при компенсації реактивної потужності в системі живлення. При цьому, компенсація активних втрат мережі, спричинених перетоками реактивної потужності та вищими гармоніками струму навантаження, дозволяє отримати значно менший економічний ефект.

Враховуючи проведену оцінку, запропоновано найбільш оптимальний за критерієм вартості шлях модернізації. Основні технічні та організаційні заходи запропонованого напрямку наступні: введення керованих перетворювачів в режим роботи з кутом керування, близьким до 0; регулювання швидкості обертання двигунів шляхом нереверсивного широтно-імпульсного перетворювача (ШІП); паралельне поєднання виходів керованих перетворювачів для створення спільної ланки постійного струму; реверс двигунів за допомогою збудника.

За попередніми підрахунками прогнозований термін окупності технічних рішень становить 2.5 місяців. Подальшими кроками обраного напрямку модернізації можуть бути розробка єдиної системи керування та технологічного контролю, вбудована до системи ШІП; модернізація законів керування ШІП для мінімізації впливу перетворювачів на мережу; уточнений розрахунок складових повної потужності мережі тощо.

**Ключові слова:** тиристорний перетворювач, енергозбереження, реактивна потужність, гармоніки струму, блюмінг

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Металургійне виробництво є однією із ключових ланок національного господарства. Відомо, що за витратами електроенергії об'єкти металургії займають перші місця в загальному розподілі споживання електричної енергії серед інших галузей промисловості. Вищенаведене твердження витікає із статистики (дані НЕК «Укренерго» [1] рис. 1).



**Рис. 1.** Графік розподілу спожитої електроенергії галузями промисловості та непромисловими споживачами

Беручи до уваги наведену на рис. 1 статистику, логічним є застосування заходів енергозаощадження в першу чергу саме до структурних частин металургійної промисловості. Зазначимо, що однією із таких структурних частин із високим рівнем споживання активної та особливо реактивної енергії є прокатне виробництво.

Таким чином, задача енергозаощадження в умовах прокатного виробництва є край актуальною. Першими кроками вирішення такої задачі є оцінка існуючого енергетичного стану конкретного об'єкту, визначення потенціалу підвищення енергоефективності та формування основних напрямків реалізації заходів енергозбереження.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Робота станів для обжимання сталених злитків (блємінгу) зазвичай супроводжується значним споживанням реактивної потужності [3] та викривленням кривої струму [4]. Специфічні особливості технологічного процесу обумовлюють «ударний» характер споживання реактивної потужності та повної потужності взагалі. Важливо зазначити, що рівень реактивної потужності в залежності від системи приводу блємінгу може перевищувати рівень активної потужності. Однак, при цьому рівень спотворення напруги можуть бути незначними [2]. Отже, вважаємо справедливим твердження дослідників щодо надання уваги, по-перше, питанню компенсації реактивної потужності.

Покращення енергоспоживання блємінгу досягають шляхом:

- застосування тиристорних компенсаторів реактивної потужності (ТКРМ);
- застосування активних фільтрів (STATCOM);
- регулювання реактивної потужності за допомогою синхронних машин (СМ);
- перебудови (реконфігурації) за можливістю системи живлення електроприводів.

Зазначимо, що вищенаведені рішення щодо покращення енергоспоживання блємінгу мають наступні недоліки:

- робота ТКРМ супроводжується споживанням додаткових активних втрат в компенсаторі при зменшенні рівня навантаження;
- застосування активних фільтрів (АФ) для задачі компенсації реактивної потужності є сумнівним з економічної точки зору кроком через необхідність впровадження АФ встановленою потужністю, близькою до потужності навантаження. Додамо, що робота АФ супроводжується додатковим спотворенням кривої напруги;

регулювання збудженням СМ та оптимізація системи живлення є найбільш доцільним кроком через відсутність необхідності впровадження нових електротехнічних комплексів, однак такий крок вимагає особливого підходу до кожного окремого об'єкту.

Інше важливе питання стосовно оптимізації енергоспоживання блюмінгу – розробка системи розгалуженого технологічного контролю [3].

**Викладення матеріалу та результати.** У роботі розглядається система живлення електроприводу прокату стану НЗС900/700/500 «Блюмінг 2» підприємства ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Система електроприводу складається з 14 електроприводів постійного струму із керованими перетворювачами, які отримують живлення від 3х секцій підстанції 6 кВ. Графік споживання активної, реактивної та повної потужностей за цикл прокату наведено на рис. 3

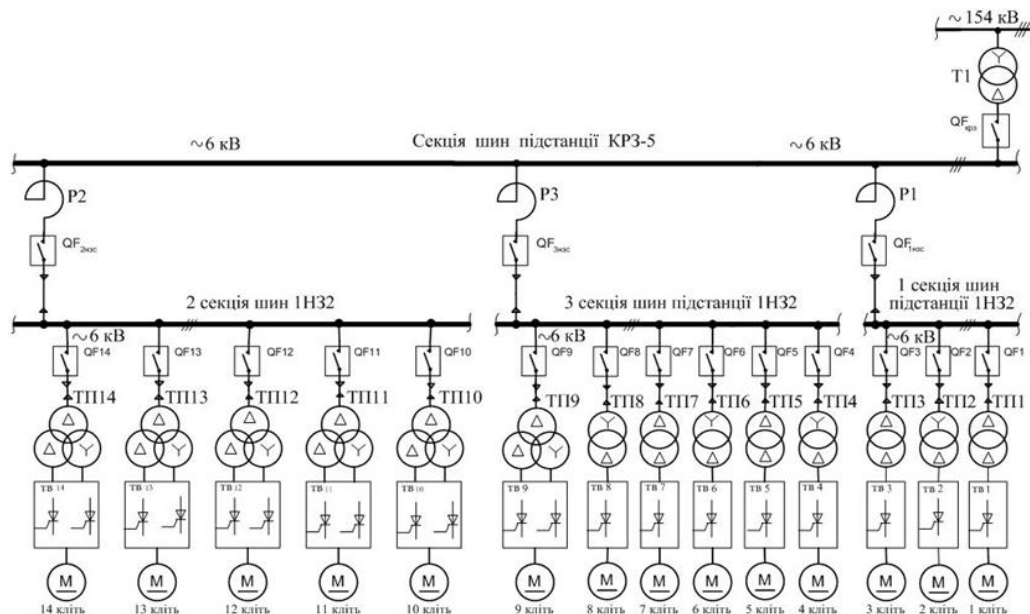


Рис.2. Існуюча схема живлення блюмінгу

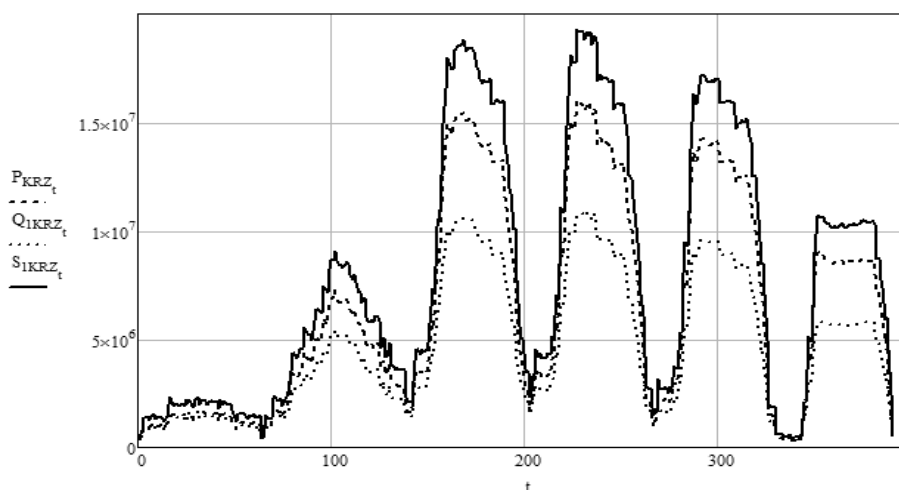


Рис.3. Графік зміни активної, реактивної та повної потужностей

Поставлена задача оцінки потенціалу енергоефективності вирішується шляхом:

визначення приблизного економічного ефекту від повної компенсації реактивної потужності;

визначення приблизного економічного ефекту від компенсації втрат активної потужності, спричинених перетоками реактивної потужності та вищими гармоніками струмів навантаження (повне придушення вищих гармонік струму);

визначення основних напрямів модернізації системи живлення можливе після порівняння економічного ефекту від застосування вищенаведених заходів.

В результаті оцінки в першому наближенні встановлено наступне:

компенсація реактивної потужності (487.213 кВар) за цикл дозволяє досягти економії виплат за електроенергію 43.849 грн.

компенсація активних втрат потужності від передачі реактивної потужності та вищих гармонік струму навантаження (1.301 кВт) за цикл дозволяє досягти економії виплат за електроенергію 2.374 грн.

Графік, що ілюструє економічний ефект в залежності від часу, наведено на рис.4

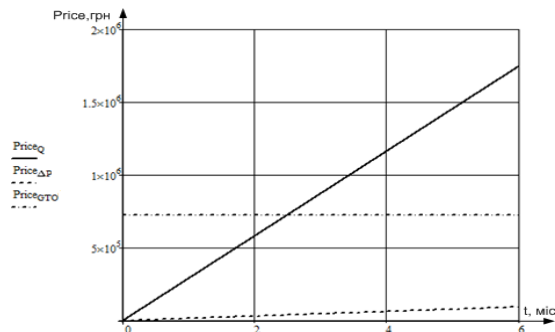


Рис.4. Графік залежності економічного ефекту від часу

Оскільки результати проведеної оцінки підтверджують ідею надання першочергової уваги питанню компенсації реактивної потужності, запропоновано реалізувати наступні технічні заходи:

пропонується ввести керовані перетворювачі в режим роботи з кутом керування  $\alpha_n$ , близьким до 0. Зазначений шлях мінімізує реактивну потужність (1)

$$Q_{\Sigma} = \sum_{n=1}^N U_{d0n} I_{dn} \sin \alpha_n, \quad (1)$$

де  $U_{d0n}$  - максимальна випрямлена напруга  $n$ -го перетворювача;  $I_{dn}$  - струм  $n$ -го перетворювача;  $N$  - кількість перетворювачів.

поєднати виходи керованих перетворювачів для створення спільної ланки постійного струму.

Додамо, що за попередніми підрахунками для створення спільної ланки постійного струму достатньо 5ти перетворювачів.

Твердження витікає із умов експлуатації, за якими приводи навантажуються неодноразово (рис. 5).

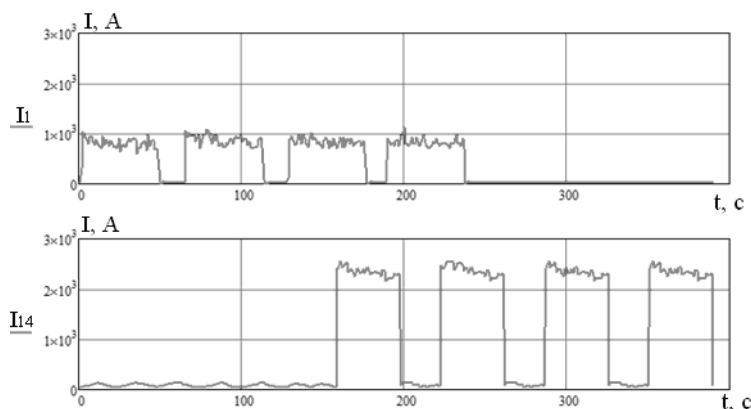


Рис. 5. Діаграми струмів клітей № 1 та № 14

Отже існує можливість вивести із роботи частину перетворювачів із відповідними трансформаторам. В результаті, буде зменшено втрати в мережі при холостому ході електроприводів.

регулювання швидкості обертання двигунів здійснювати за допомогою широтно-імпульсних нереверсивних перетворювачів (2)

реверс приводу здійснювати шляхом збудників (2)

$$\omega_n = \frac{U_{d0n} \cdot \gamma_n - I_{dn} \cdot R_{en}}{k\Phi_n \cdot \text{sign}(k\Phi_n)} \quad (2)$$

де  $\omega_n$  - швидкість обертання  $n$ -го двигуна;  $\gamma_n$  - шпаруватість  $n$ -го ШПП;  $R_{en}$  - еквівалентний опір якірного кола структури «перетворювач-двигун».

Вартість зазначених технічних рішень формується переважно вартістю силових ключів. При використанні IGBT транзисторів сумарна вартість технічного рішення становитиме  $\approx 728$  тис. грн. (Price<sub>GTO</sub> на рис. 4).

Таким чином, прогнозований термін окупності дорівнює 2.5 місяців.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** В роботі доведена актуальність застосування методів енергозаощадження до об'єктів металургійної промисловості. Проаналізовано потенціал енергоефективності прокатного виробництва на прикладі стану НЗС 900/700/500 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

В ході грубої оцінки показано, що повна компенсація реактивної потужності в системі живлення дозволить отримати економічний ефект 3.497 млн. грн. в рік.

Також показано, що зазначений економічний ефект перевищує економічний ефект від компенсації активних втрат в мережі більше ніж у 2 рази.

Виходячи із попередніх висновків запропоновано найбільш доцільний напрямок модернізації системи живлення з терміном окупності 2.5 місяців.

#### Список літератури

1. Річний звіт НЕК «Укренерго». – Режим доступу до журн.: <http://www.ukrenergo.energy.gov.ua/>
2. Karandaev A.S. Improving electric power quality within the power supply system of wide-strip hot-rolling mill stand / A.S. Karandaev, G.P. Kornilov, V.R. Khramshin // International Conference on Industrial Engineering, Procedia Engineering. - 2015. - №129. – P.2–8.
3. Ardura P. Power Quality Analysis and Improvements in a Hot Rolling Mill using a STATCOM / Ardura P., Gonzalez A., Jose M. Cano [and other] // International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14). – April 2014. - No.12. - ISSN 2172-038.
4. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 168 с.

Рукопис подано до редакції 05.03.16

УДК 621.316.925:622.82

В.В. ОНИЩЕНКО, магістрант, Криворізький національний університет

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОЛИВАНЬ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ НА РОБОТУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПРИВОДА РУДНИКОВОГО ЕЛЕКТРОВОЗА

При роботі рудникових електровозів можливі відхилення напруги живлення від номінального значення, в зв'язку з чим, при виконанні певних умов, можуть відбуватися зриви комутацій в тиристорному перетворювачі, що знижують ефективність електричного гальмування. В даний час є ряд рішень, спрямованих на забезпечення безаварійного функціонування електроприводу в умовах знижень і зникнень напруги живлення. Це установка на електровозах спеціальних генераторів напруги, гальмування тягових двигунів при порушенні нормального режиму живлення, застосування контактно-акумуляторних електровозів. І все ж, відмічені шляхи вирішення цього завдання не є достатньо ефективними, тому що для досягнення поставленої мети вимагають застосування додаткового електрообладнання, що в деяких випадках ведуть до зниження продуктивності електровозної відкатки. На важких рудникових електровозах (величиною зчипної ваги менше 28 тонн), а також середнього і легкого типу відсутній вільний простір для розміщення додаткового електрообладнання. Це викликає необхідність пошуку інших шляхів підвищення ефективності функціонування систем управління рудникових електровозів, розробки нових прогресивних засобів управління, розроблених на використанні енергії накопичувальних конденсаторів вхідних фільтрів, енергії обертових електричних машин (наприклад, в даному випадку енергії обертових ТД). Такий напрямок вирішення питання є достатньо економічним, так як не потребує використання додаткового силового обладнання, збільшення пов'язаних з цим експлуатаційних затрат.

**Ключові слова:** рудниковий електровоз, напруга живлення, комутація, контактно-акумуляторний електровоз, конденсатор вхідного фільтру, генератор



**Проблема та її зв'язок з практичними завданнями.** Стосовно до умов електропостачання рудничної електровозної відкатки, можливі значні відхилення рівня живлячої напруги від номінального значення. Особливо несприятливо на роботі імпульсних систем управління РЕ позначаються зниження і спотворення напруги на струмознімачах електроприводу. При цьому, деякий час, апаратура системи управління живиться за рахунок енергії заряду конденсатора вхідного фільтра. Однак, тривале зникнення напруги живлення призводить до втрати управління електроприводом, виключаючи тим самим можливість перевodu двигунів в режим гальмування, а в разі необхідності екстреного гальмування можуть привести до аварійної ситуації.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Порівняльний аналіз основних відомих схем електричного гальмування ТД рудникових електровозів показує, що основними причинами зниження рівня напруги на конденсаторі є відключення напруги живлення на підстанції; посадка напруги в результаті зосередження навантаження на окремих секціях контактної мережі; порушення контакту між струмознімачем електропривода і контактним проводом мережі живлення.

Аналіз можливих причин зниження рівня живлячої напруги на конденсаторі вхідного фільтра електроприводу рудникових електровозів висуває завдання подальшого розширення і поглиблення досліджень, спрямованих на покращення ефективності функціонування приводу рудникових електровозів. У цьому випадку питання підвищення ефективності функціонування електричного приводу доцільно вирішувати за допомогою автоматизації процесів керування електроприводом рудникових електровозів.

Дійсно, звести до мінімуму негативний ефект від провалів напруги живлення на струмознімачах рудникових електровозів можна шляхом вдосконалення, а також розробки нових способів управління, розроблених на використанні енергії накопичувальних конденсаторів вхідних фільтрів, енергії обертових електричних машин (наприклад, в даному випадку енергії обертання ТД). Такий напрямок вирішення питання є достатньо економічним, так як не потребує використання додаткового силового обладнання, збільшення пов'язаних з цим експлуатаційних затрат.

**Постановка завдання.** Провести аналіз можливих причин зниження рівня напруги живлення контактної рудникової електровозу. Встановити фактори, що впливають на роботу електроприводу в режимі тяги та гальмування. Запропонувати рішення щодо зменшення впливу коливань напруги живлення на працездатність системи електропривода.

**Викладення матеріалу та результати.** Зменшення ефективності будь-якої системи зазвичай вимірюється функцією досяжності максимального значення в "ідеальних" умовах (відсутність відмов, перешкод, збоїв і т.ін.). При цьому прийнятна повноцінність функціонування системи забезпечується виконанням закладених в її функціональну схему заданої кількості властивостей, які визначаються накладеними вимогами експлуатації, безпеки і т.п.

Так, для прискорення процесу збудження двигунів і розширення діапазону швидкостей, при якому забезпечується їх надійне гальмування, в силовому ланцюзі електроприводу необхідний початковий гальмівний струм. При цьому витрати часу для перевodu двигунів в режим гальмування зводяться до мінімуму і стають порівнянними з часом спрацьовування контакторів гальмівного режиму.

Робота контактних рудникових електровозів пов'язана з частими зниженнями і зникненнями напруги живлення на струмознімачах електроприводу. Останнє накладає вимоги реалізації надійного гальмування ТД незалежно від знижень рівня напруги на конденсаторі вхідного фільтра до якогось критичного значення, нижче якого елементна база системи управління втрачає свою працездатність. Після зникнення напруги живлення на струмознімачах рудникових електровозів протягом деякого часу (кілька секунд), установлений на вході системи імпульсного регулювання конденсатор вхідного фільтра працює в якості джерела живлення зі змінною напругою. Якщо при цьому відбувається перемикання схеми електроприводу в режим гальмування, не виключена можливість втрати керованості ІР, що, безсумнівно, веде до зниження ефективності гальмування ТД.

У практиці автоматизації процесів управління електропривода рудникових електровозів досить часто зустрічаються завдання, в яких на стан системи і на значення критерію помітний вплив чинять випадкові чинники. В цьому випадку керований процес не повністю визначається початковим станом системи і вираженим управлінням, а в якійсь мірі залежить від випадку. Такі завдання, до яких можна віднести і приведену вище, називаються стохастичними.

Для знаходження оптимального рішення стохастичних задач використовуються багатоетапні методи. При цьому вектор стану системи визначається різноманіттям незалежних факторів, що впливають. В даному випадку визначаючим вектором вхідних змінних є

$$\bar{V} = (\omega_{\delta}, U_{cf}, i_3),$$

де  $U_{cf}$  - напруга на конденсаторі  $C_{cf}$  електроприводу РЕ з ІР;  $i_3$  - початковий струм збудження.

Перш ніж прийняти рішення про вибір раціонального критерію ефективності функціонування системи, необхідно проаналізувати стан вектора вхідних обурюючих впливів і відгуку системи на деякому етапі  $N$  та вибрати допущення, необхідні для побудови математичної моделі [2-4].

Отже, маючи вектор вхідних незалежних змінних  $\bar{V}$ , необхідно відзначити, що параметр  $i_E$  є неявно вираженою функцією від змінних

$$i_3 = F(U_{cf}, C),$$

де  $C$  - стан імпульсного регулювання ІР, при цьому мається на увазі його нормальне функціонування і виникнення аварійних режимів (тобто зривів комутацій в ІР).

У свою чергу  $C$  є неявно вираженою функцією від змінних

$$C = F(U_{cf}, i_3, \Pi),$$

де  $\Pi$  - принципи і методи регулювання ІР і т.п.

Для вибору критерію ефективності надійного функціонування приводу рудникових електровозів в режимі гальмування Ег, в загальному випадку необхідно враховувати вище розглянуті впливаючі фактори, тобто

$$E_{\Gamma} = F(\omega_{\delta}, U_{cf}, i_3, C).$$

Найбільші труднощі при здійсненні гальмування контактних РЕ виникають при низькій частоті обертання ТД і відсутності напруги на струмознімачах  $U_{\pi}$ . В даний час відомий ряд шляхів рішення вище поставленого завдання. Проте існуючі системи гальмування тягового приводу рудникових електровозів з ІР, не в повній мірі задовольняють вимоги накладені специфікою рудничної електровозної відкатки.

Так, наприклад, рішенням багатьох питань по автоматизації процесів управління, та забезпечення безпеки руху, підвищення ефективності та надійності може бути встановлення згладжуючих дроселів, автономних джерел живлення оперативних ланцюгів системи ( акумуляторів, спеціальних генераторів напруги) і т.ін.

Однак, ця задача ускладнена відсутністю вільного простору для розміщення додаткового електрообладнання.

Це викликає необхідність пошуку інших шляхів підвищення ефективності функціонування систем управління рудникових електровозів, та зводиться до розробки нових прогресивних засобів управління.

Тому, в подальшому слід враховувати, що підвищення ефективності функціонування приводу рудникових електровозів в режимі гальмування не повинно супроводжуватися значним збільшенням габаритів системи, а також переводу ТД в режим гальмування і сам процес гальмування повинен здійснюватися з мінімальними витратами часу.

При цьому загальний критерій з урахуванням необхідних обмежень може бути писаний як

$$E_{\Gamma} = \sum F(\bar{V}_i), \text{ при } t_{\Pi}, t_{\Gamma}, \Gamma \rightarrow \min,$$

де  $t_{\Pi}, t_{\Gamma}, \Gamma \rightarrow \min$  - час переключення ТД в режим гальмування;  $\Gamma$  - час гальмування ТД.

$\Gamma$  - габарити системи, тобто за допомогою варіювання складових вектора  $\bar{V}_i$  йде аналіз поведінки системи і оцінюється ступінь зниження (підвищення) ефективності досліджуваного процесу. Надалі виробляється стратегія поведінки системи, забезпечуючи її безвідмовне функціонування з урахуванням вище накладених обмежень.



**Рис.1.** Причини можливого зниження рівня напруги живлення

Як вже зазначалось, в силу ряду причин (рис. 1), електричний опір між контактним дротом і струмознімачем в процесі руху рудникового електровозу може змінюватися випадковим чином від мінімального до нескінченно великих величин.

На практиці повністю усунути це негативне явище не представляється можливим.

Тут мається на увазі, що в будь-якому випадку не виключається можливість наявності однієї або декількох причин зниження рівня напруги живлення.

Під час тривалих відривів струмознімача від контактного проводу, енергії конденсатора, після зниження напруги на ньому до другого контрольованого рівня, має бути достатньо для створення ініціюючого струму, що забезпечує надійне самозбудження двигуна при перекладі його в режим електродинамічного гальмування.

Крім того, так як напруга на конденсаторі залежить від напруги на конденсаторі і від комутуючого ініціюючого струму, що зменшується, напруга на конденсаторі комутуючого не повинно знизитися до граничного значення, при якому конденсатор не може зарядитися до напруги, що забезпечує надійну комутацію ініціюючого струму.

При цьому є очевидним, що мінімально допустима напруга накопичувального конденсатора фільтра, що згладжує за умови створення ініціюючого струму, повинно мати запас, що буде забезпечувати роботу електроприводу з початковим збудженням ТД в режимі електродинамічного гальмування.

У разі невиконання цієї умови, має формуватися керуючий вплив, що забезпечує умови безаварійного функціонування системи електроприводу рудникових електровозів.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** З проведеного аналізу можливих причин зниження рівня напруги живлення контактного рудникового електровозу встановлено, що найбільш впливовими факторами, що впливають на роботу електроприводу в режимі тяги та гальмування є порушення контакту між струмоприймачем та дротом мережі живлення під час виконання гальмування електровозу та початкова швидкість гальмування.

Запропоновано рішення щодо зменшення впливу коливань напруги живлення на працездатність системи електропривода, що полягає у розробці системи, яка має здійснювати аналіз початкових умов гальмування, та виконувати його найбільш ефективним із зазначених методів.

#### Список літератури

1. Волотковский С.А. Рудничная электровозная тяга. - М.: Недра, 1981. - 389с.
  2. Синчук О.Н. Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов / О.Н. Синчук, И.О. Синчук, Н.Н. Юрченко, А.А. Чернышов, О.А. Удовенко, О.В. Пасько, Э.С. Гузов. Научное издание. - Київ: ІЕДНАНУ, 2006. - 252с.
  3. Тихменев Б.Н., Трахтман Л.Н. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. - М.: Транспорт, 1980. - 471 с.
  4. Алексеев Н.И. Оптимизация систем электрической тяги в подземных выработках шахт. - М.: Недра, 1979. - 252 с.
  5. Синчук О.Н., Чумак В.В., Ершов О.В. Импульсные системы управления и защита на рудничном электровозном транспорте. Монография – АДЕФ – Украина, 1998. - 280 с.
  6. Бирзникс Л.В. Импульсные преобразователи постоянного тока. - М.: Энергия, 1974. - 256 с.
  7. Гриценко А.В., Козаченко Е.В. Новые электрические машины локомотивов: Учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта. - М.: ГОУ: Учебно-методический центр по оборудованию на железнодорожном транспорте, 2008. - 271 с.
  8. Основы электрического транспорта: Учебник для студ. высш. учеб. заведений / (М.А. Слепцов, Г.П. Долаберидзе, А.В. Прокопович и др.); под общ. ред. М.А. Слепцова. - М.: Издательский центр «Академия», 2006. - 464 с.
  9. Синчук О.Н., Синчук И.О., Юрченко Н.Н., Чернышов А.А., Удовенко О.А., Пасько О.В., Гузов Э.С. Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов. - Київ: ІЕДНАНУ, 2006. - 252 с.
- Рукопис подано до редакції 22.04.16

УДК 622.625.28-83

Е.С. ГУЗОВ, канд. техн. наук, проф., І.О. СІНЧУК, канд. техн. наук, доц.,  
Д.О. КАЛЬМУС, асистент, Криворізький національний університет

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В ТЯГОВОМУ ДВИГУНІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ПОСЛІДОВНОЮ ОБМОТКОЮ ЗБУДЖЕННЯ

Аналіз парку електричних машин сучасних підприємств показує, що найбільш поширеними залишаються двигуни постійного струму з послідовною обмоткою збудження. Наряду з існуючими перевагами яких, основним недоліком залишається складність переходу останніх в режим гальмування, та пов'язані з цим незручності в роботі транспортного засобу. Так один з найпоширеніших видів гальмування, як електродинамічне, обмежено значенням критичної частоти обертання, а режим противмикання – максимальним значенням струму гальмування. Тому для збереження ресурсу роботи двигунів та розширення діапазону застосування режиму динамічного гальмування, було проведено аналіз перехідних процесів у двигуні постійного струму з послідовною обмоткою збудження. Відзначено, що дослідження електромагнітних процесів даного виду електричних двигунів ускладнене, тим що в двигунах послідовного збудження магніторушійна сила, як наслідок, і магнітний потік змінюється із зміною струму якоря. Для можливості проведення досліджень було використано лабораторний стенд, який дозволив провести експеримент, та побудувати криву намагнічення. Було проведено її апроксимацію, та побудовано графіки. Аналіз графіків показує, що в зоні низьких швидкостей найбільш близьким є вираз гіперболічного синуса, а в зоні насичення гіперболічний. Отримані завдяки аналітичному виразу кривої намагнічення вирази дали можливість побудувати поверхні швидкості протікання електромагнітних процесів у двигуні постійного струму з послідовною обмоткою збудження в режимах противмикання та електродинамічного гальмування. Аналіз отриманих поверхонь показує, що перемикання з одного режиму електричного гальмування на інший буде супроводжуватись значними кидками струму двигунів, що не є бажаним та суттєво погіршує стан ізоляції обмоток двигуна, чим знижує його ресурс роботи та надійність електричного гальмування, від чого в значній мірі залежить ефективність роботи рудничного електровозу. Очевидним, також, є підвищений рівень пульсацій струму двигуна у такому режимі. Отримані результати формують основні вимоги до системи гальмування транспортного засобу, які полягають у розробці чіткого алгоритму функціонування такої системи.

**Ключові слова:** електромагнітний, тяговий двигун, надійність, електричне гальмування, електропривод

**Проблема та її зв'язок з практичними завданнями.** В теперешній час на переважній більшості транспортних засобів з електричним приводом ведучих коліс, в якості тягових двигунів (ТД) використовуються в основному електродвигуни постійного струму послідовного (переважно) або змішаного (рідше) збудження. В повній мірі це відноситься і до рудникових видів

електровозів [1]. Між тим, для двигунів послідовного збудження характерним є погіршення електромеханічних характеристик в процесі гальмування при зменшенні швидкості електровозу. Тому на практиці для зупинки електропотягів з вищезгаданими типами ТД застосовують не динамічне, як найбільш сприйнятне, а гальмування із противмиканням. При цьому спостерігається суттєве зростання рівня струму двигуна, що є причиною підвищеного нагрівання його обмоток з послідовним збільшенням вірогідності поломки.

Особливо це проявляється при маневрових роботах електропотягів, коли відбувається завантаження або розвантаження гірської породи у вагонетки. Тоді час роботи двигунів у режимі гальмування сягає понад 50 % загального часу. Саме тому режимам гальмування у процесі електровозного відкочування приділяється особлива увага, адже ефективне функціонування електричного обладнання електровозу без врахування особливостей цих режимів неможливе [1].

**Аналіз досліджень та публікацій.** Як відомо [1], досить ефективним видом електричного гальмування ТД постійного струму послідовного збудження тягових електроприводів рудникових електровозів як з реостатним способом керування рівнем напруги на затискачах двигуна, так і імпульсному є електродинамічне. Однак область його дії обмежена, та визначається зіставленням активних втрат у якорі двигуна та відповідної кривої намагнічення. А при реостатному гальмуванні, ще й спостерігається значне відхилення середнього значення струму гальмування від максимально припустимого. Тому, виникає потреба у гальмуванні локомотива механічними засобами протягом усього процесу електричного гальмування. Крім того, слід зазначити, що механічне гальмування рудникових електровозів необхідно для повної зупинки поїзда, при низькій швидкості руху, коли не настає самозбудження двигунів. Отже, як при реостатному, так і при імпульсному регулюванні рівня напруги на затискачах ТД послідовного збудження гальмування останніх настає тільки при частотах обертання перевищуючих критичне значення.

Аналіз досліджень показує, що надійне самозбудження ТД можна забезпечити шляхом створення початкового струму якоря.

Дійсно, початкове збудження ТД у режимі електродинамічного гальмування дозволяє значно зменшити інтервал швидкостей руху рудникових електровозів, при яким не відбувається самозбудження ТД. Однак існує декілька умов, від виконання яких залежить надійність гальмування.

Однією з таких умов є наявність залишкового магнітного потоку двигуна такого знаку, щоб, е.р.с. якоря, що наводиться їм, викликала струм збудження, що збільшує цей потік.

Іншою умовою самозбудження можна виділити те, що воно може настати тільки в тому випадку, якщо нахил лінійної частини залежності е.р.с. від струму збудження більше або збігається з нахилом прямої активних втрат контуру.

Для виконання першої умови самозбудження, як правило, здійснюють реверсування якірної обмотки або обмотки збудження двигуна.

Проаналізувавши другу умову самозбудження очевидно, що самозбудження двигуна в режимі гальмування при малих швидкостях обертання якоря ускладнить навіть при невеликих значеннях опору гальмівного резистора.

Для прискорення процесу збудження потрібен початковий струм у силовому ланцюзі електропривода. Найчастіше для надійного збудження двигунів застосовують ініціацію струму збудження від додаткового джерела живлення, наприклад, акумуляторної батареї або за рахунок енергії заряду конденсатора.

Аналізуючи розглянуті вище рішення, слід зазначити, що всі вони потребують залучення додаткових силових елементів, необхідних для досягнення поставленої мети, тому й не знаходять широкого застосування на практиці.

**Постановка завдання.** Провести аналіз електромагнітних процесів у двигуні постійного струму з послідовною обмоткою збудження при електричному гальмуванні тягових двигунів рудничного електровозу з розробкою рішень щодо забезпечення надійного гальмування.

**Викладення матеріалу та результати.** Електромагнітні процеси в колі якоря двигуна постійного струму з послідовною обмоткою збудження описує система рівнянь

$$\begin{cases} U + E - iR - L \frac{di}{dt} = 0 \\ E = k\Phi(i)\omega \end{cases} \quad (1)$$

де  $\omega, i$  та  $\frac{di}{dt}$  – швидкість, струм двигуна та його похідна відповідно;  $U$  – напруга живлення;  $k\Phi(i)$  – коефіцієнт магнітного потоку;  $R$  та  $L$  – відповідно активний та індуктивний опір кола гальмування.

При дослідженні перехідних режимів суттєве значення відіграє швидкість протікання електромагнітних процесів у колі двигуна, яка у наведеному вище виразі представлена першою похідною струму. Скористаємося даною залежністю для аналізу режиму гальмування.

Так для режиму противмикання справедливим є вираз [2]

$$\frac{di}{dt} = (U + k\Phi(i)\omega - iR)/L. \quad (2)$$

Тоді для режиму динамічного гальмування:

$$\frac{di}{dt} = (k\Phi(i)\omega - iR)/L. \quad (3)$$

Але для двигуна постійного струму з послідовною обмоткою збудження обов'язковим є врахування залежності коефіцієнту магнітного потоку від струму двигуна. Це можна зробити завдяки експериментально знятій характеристиці  $k\Phi(i)$ .

Залежність  $k\Phi = f(I)$  називається кривою намагнічування. За звичай вона задається в графічному виді. Однак в двигунах послідовного збудження магніторухійна сила, як наслідок, і магнітний потік змінюється з зміною струму якоря.

По причині відсутності задовільного математичного опису кривої намагнічування електромагнітних процесів у двигуні постійного струму послідовного збудження являється складним, тому застосовують різноманітні засоби апроксимації кривої намагнічення.

Для цієї мети використовуються вирази, що містять одну із простих функцій, таких як логарифм, експонента, гіперболічні функції або їх комбінації. [3,4].

Для аналітичного представлення використовуються такі функції:  $k\Phi = \frac{I}{p_1 + p_2 \cdot I}$ ;

$$k\Phi = \frac{\arcsin\left(\frac{I}{p_1}\right)}{p_2};$$

$$k\Phi = p_1 \cdot \sqrt{p_2 \cdot I}.$$

Отримані значення зрівнюються з кривою намагнічування отриманої на експериментальній установці (рис. 1).

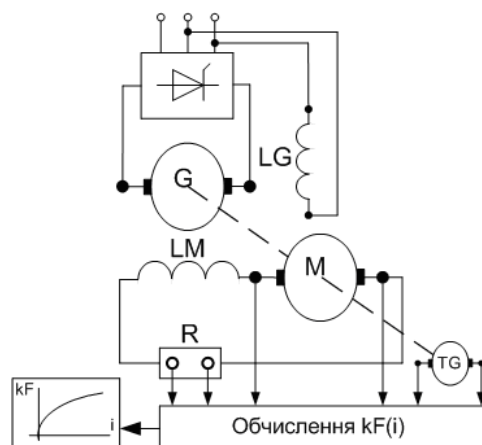


Рис. 1. Установка для зняття кривих намагнічення

Графіки кривих намагнічення, отриманих за допомогою аналітичних виразів, і зняту експериментальним шляхом зображені на рис. 2.

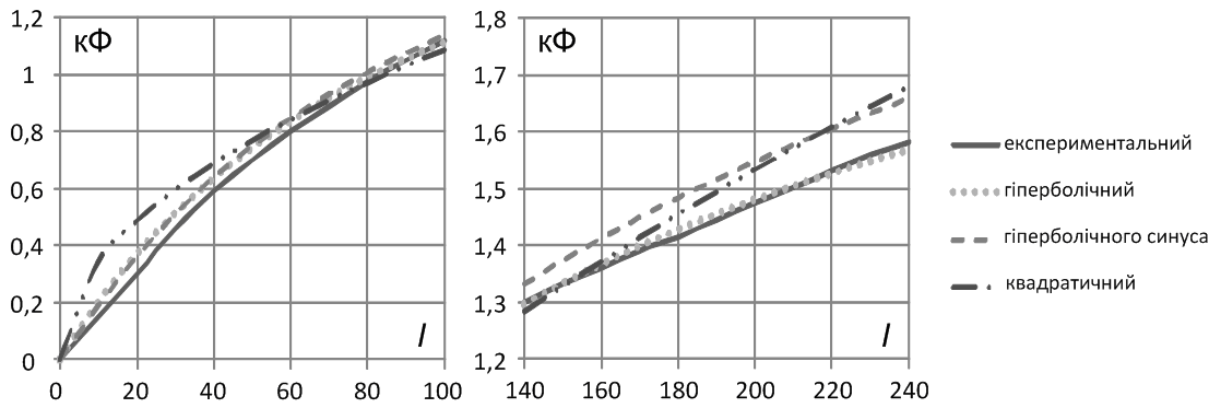
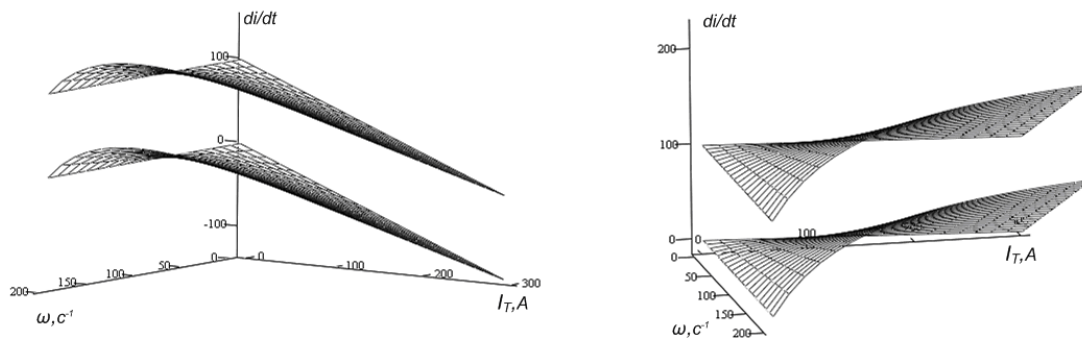
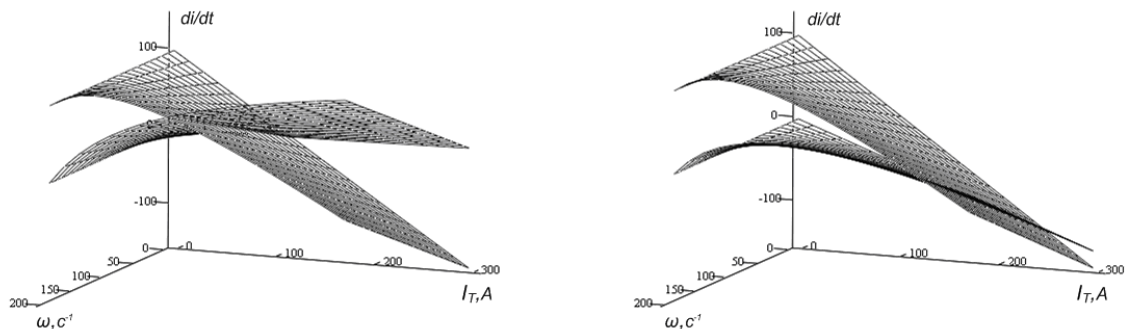


Рис.2. Графіки кривих намагнічування

Тоді за виразами (2) та (3) будемо поверхні залежності швидкості протікання електромагнітних процесів у двигуні від струму гальмування при різних значеннях швидкості обертання та додатковому опорі у колі якоря двигунів.

Рис. 3. Графіки  $di/dt=f(i)$  при різних значеннях швидкості обертання та додатковому опорі у колі якоря.Рис. 4. Графіки  $di/dt=f(i)$  при різних значеннях швидкості обертання та додатковому опорі у колі якоря.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** З аналізу графіків кривої намагнічення видно, що в зоні низьких швидкостей найбільш близьким є вираз гіперболічного синуса, а в зоні насичення гіперболічний. Аналіз отриманих кривих (рис. 3,4) показує що траєкторії протікання електромагнітних процесів в режимах противмикання та динамічного гальмування суттєво різняться при неузгодженості параметрів системи гальмування. Таким чином часте перемикавання з одного режиму електричного гальмування на інший буде супроводжуватись значними кидками струму двигунів, що не є бажаним та суттєво погіршує стан ізоляції обмоток двигуна, чим знижує його ресурс роботи та надійність електричного гальмування, від чого в значній мірі залежить ефективність роботи рудничного електровозу. Очевидним, також, є підвищений рівень пульсацій струму двигуна у такому режимі. Тому при імпульсному регулюванні тягових двигунів гальмування з чергуванням режимів противмикання та динамічного гальмування

ня, при використанні стандартних тягових агрегатів, не є прийнятним, і потребує схемних рішень щодо доцільності їх відокремлення.

Отримані результати визначають основні вимоги до системи гальмування транспортної засоби, реалізація яких неможлива без розробки чіткого алгоритму функціонування таких систем. Подальші дослідження повинні бути направлені на розроблення такого алгоритму, який буде відповідати визначеним вимогам.

### Список літератури

1. Волотковский С.А. Рудничная электровозная тяга. - М.: Недра, 1981. - 389с.
2. Пироженов В.Х. Рудничные электровозы с тиристорным приводом. - К.: Техніка, 1981. - 159 с.
3. Городецкий П.Г. Обзор аналитических выражений кривых намагничивания и гистерезисных петель. – Киев: Воениздат.
4. Михайлов С.П., Литвинцев А.А. Аппроксимация экспериментальных кривых намагничивания с помощью рациональных функций. – Дефектоскопия, 1995, № 6.
5. Синчук О.Н. Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов / О.Н. Синчук, И.О. Синчук, Н.Н. Юрченко, А.А. Чернышов, О.А. Удовенко, О.В. Пасько, Э.С. Гузов. Научное издание. – Київ: ІЕДНАУ, 2006. – 252с.
6. Тихменев Б.Н., Трахтман Л.Н. Подвижный состав электрифицированных железных дорог. - М.: Транспорт, 1980. - 471 с.
7. Зеленов А.Б. Теория электропривода. Часть 1. Алчевск: ИПЦ «Ладо», ДонГТУ, 2005.
8. Алексеев Н.И. Оптимизация систем электрической тяги в подземных выработках шахт. - М.: Недра, 1979. – 252.

Рукопис подано до редакції 22.04.16

УДК 621.316.925:622.82

Д.О. КАЛЬМУС, асистент, М.М. ГРАЧОВ, магістрант  
Криворізький національний університет

### ДОСЛІДЖЕННЯ ГРАНИЧНИХ УМОВ ЕФЕКТИВНОГО ПЕРЕХОДУ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ РУДНИКОВИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ З РЕЖИМУ ТЯГИ У РЕЖИМ ГАЛЬМУВАННЯ

Важливою складовою для побудови надійної системи керування електроприводом рудникового електровозу є визначення граничних умов переходу електроприводу із режиму тяги в режим динамічного гальмування. Особливо несприятливо на роботі імпульсних систем управління позначаються зниження і спотворення напруги на струмознімачах електроприводу, що істотно знижує надійність та ефективність гальмування тягового електроприводу і може служити причиною втрати керованості. Існують різні методи вирішення цієї задачі, але методи, ґрунтовані на використуванні накопиченої енергії у конденсаторі вхідного фільтру отримали найбільше поширення. Метою цієї роботи є дослідження електромагнітних процесів у тяговому двигуні рудничного електровозу при переході системи електроприводу з режиму тяги у режим гальмування. Проведено аналіз електромагнітних процесів у тягових двигунах при переході системи електроприводу з режиму тяги у режим гальмування. З аналізу була встановлена залежність, що дозволяє зробити оцінку граничних умов переходу з режиму тяги у режим гальмування в залежності від ряду факторів, які враховують конструктивні особливості системи електроприводу та початкові умови у колі гальмування.

**Ключові слова:** тяговий, електровоз, електропривод, гальмування, протипривідження

**Проблема та її зв'язок з практичними завданнями.** В процесі руху рудничного електровоза напруга на його струмознімачах може змінюватись в широких межах відносно номінального значення. Виникаючи під час цього, так звані, зникнення і зниження напруги живлення можуть служити причиною неможливості переведення електроприводу в гальмівний режим, а також причиною втрати керованості, що істотно знижує надійність і ефективність гальмування тягового електроприводу.

Тому, для побудови надійної системи керування електроприводом рудникового електровозу, важливою складовою є визначення граничних умов можливості переходу роботи електроприводу із режиму тяги в режим динамічного гальмування.

**Аналіз досліджень та публікацій.** На практиці, для вирішення цієї задачі застосовують різні методи. Найбільше поширення отримали методи, які базуються на використуванні енер-



гії, що накопичується у конденсаторі вхідного фільтру, або використовують можливості системи керування.

Дійсно, в імпульсних СК тяговим приводом транспортних засобів, які живляться від контактної мережі, цілком резонно, в періоди можливих порушень нормальних умов струмознімання, використовувати для живлення ланцюгів заряд, що накопичується в конденсаторах вхідних фільтрів, що застосовуються для згладжування пульсацій змінної складової струму мережі. ТД в цьому випадку необхідно переводити в режим вільного вибігу.

У міру зниження напруги на обкладках конденсатора від початкового рівня до якогось критичного рівня, нижче якого окремі вузли СК втрачають працездатність, забезпечується безвідмовне функціонування електроприводу.

Час, протягом якого система управління працює за рахунок енергії, запасеної конденсатором, при зниженні напруги на ньому до критичного рівня, має вибиратися з умов забезпечення працездатності СК при зникненні напруги на струмознімачі, що виникають при проїздах ізоляторів, а так само інших короточасних порушеннях контакту "струмознімач - контактна мережа", та може досягати декількох секунд.

**Постановка завдання.** Провести дослідження електромагнітних процесів у ТД рудникового електровозу при переході системи електроприводу з режиму тяги у режим гальмування.

**Викладення матеріалу та результати.** Під час зникнення напруги, що підводиться до струмоприймача електроприводу, живлення системи управління і прискорення процесу самозбудження ТД при переході його в режим електродинамічного гальмування відбувається за рахунок енергії збереженої конденсатором вхідного фільтра  $C_\phi$ .

Найбільш важкі умови переходу до гальмування утворюються при низькій швидкості обертання ТД, коли е.р.с. якоря менше рівня  $U_{2нрсф}$ . Створення початкового гальмівного струму в обмотці LM відбувається в короткий відрізок часу (час перемикання силових контакторів, рівний кілька сотих секунди). При цьому, під час провідного стану IP конденсатор  $C_\phi$  розряджається на активний опір обмотки LM. Зміна напруги на конденсаторі  $C_\phi$  і струму в обмотці LM відбувається відповідно з рівняннями

$$L_{LM} \frac{di_{LM}}{dt} + i_{LM} R_{LM} + U_{сф} = 0. \quad (1)$$

$$i_{LM} = C_\phi \frac{dU_{сф}}{dt}. \quad (2)$$

Після ряду перетворень спільне рішення рівняння (1), (2) і з урахуванням (2),  $i_{LM}(t)$  дорівнюватиме

$$i_{LM}(t) = C_\phi (p_1 A_1 e^{p_1 t} + p_2 A_2 e^{p_2 t}) \quad (3)$$

де  $p_1, p_2$  - коріння характеристичного рівняння

$$p^2 + 2\delta_1 p + w_2^2 = 0 \quad (4)$$

Стосовно до параметрів контуру  $L_{LM}, R_{LM}, C_\phi$  коли  $R_{LM} < 2\sqrt{\frac{L_{LM}}{C_\phi}}$  являють пару комплексних спряжених чисел:  $p_{1,2} = \delta \pm jw_3$ , де  $w_3$  - частота власних згасаючих коливань

$$w_3 = \sqrt{w_2^2 - \delta^2} \quad (5)$$

При будь-яких заданих початкових умовах функція повинна бути речовинною функцією часу, отже

$$U_c(t) = U_o e^{-\delta t} \cos(w_3 t + \Psi), \quad (6)$$

де  $U_o$  - амплітуда гармонійних коливань;  $\Psi$  - початкова фаза гармонійного коливання.

Як видно з виразу 6, напруга на конденсаторі описується добутком косинусоїдальної і експоненційної функцією, тобто має характер вільних згасаючих коливань.

Струм, що протікає в розглянутому контурі можна визначити з виразу

$$i(t) = C_\phi U_o e^{-\delta t} (\delta \cos(w_3 t + \Psi) + w_3 \sin(w_3 t + \Psi)) \quad (7)$$

Таким чином, під час привідного стану ІР, конденсатор  $C_\phi$  розряджається на активний опір обмотки збудження і створює в ній струм який змінюється відповідно до вираження (7).

Після виключення ІР ланцюг обмотки  $LM$  шунтується зворотнім діодом VD1. Запасена індуктивністю  $LM$  енергія гаситься в активному опорі обмотки збудження  $R_{LM}$ . Струм в контурі  $L_{LM} - R_{LM} - VD1$  може бути визначений з рівняння

$$L_{LM} \frac{di_{LM}}{dt} + i_{LM} R_{LM} = 0 \quad (8)$$

Беручи початкове значення струму рівним  $I_o$ , тобто кінцевому значенню струму в обмотці збудження під час провідного стану, рішення рівняння (8) запишемо у вигляді

$$i_{LM}(t) = I_o e^{-\frac{K_{LM}}{L_{LM}} t} \quad (9)$$

На окремих відрізках часу імпульсного циклу значення струму в обмотці  $LM$  і напруги легко визначається за допомогою аналітичних виразів (6), (7), (9).

Для того щоб проаналізувати час розряду  $t_{p2}$  конденсатора  $C_\phi$  до рівня  $U_{2np}$  при різних значеннях його ємності, початкового рівня напруги, частоти і шпаруватості регулювання, необхідно виробляти послідовність розрахунків для кожного імпульсного циклу, так як кінцеві значення напруги в конденсаторі  $C_\phi$  і струму в  $LM$  одного стану ІР є початковим для іншого. При цьому необхідно враховувати, що для забезпечення безаварійного переключу електроприводу в гальмівний режим має виконуватися умова

$$t_{p2} \geq t_{пск}, \quad (10)$$

де  $t_{пск}$  - час перемикання силових контакторів ходу і гальмування.

В іншому випадку, коли не виконується умова (10), відбувається повний розряд конденсатора  $C_\phi$  і зниження струму в  $LM$ . Тоді, якщо швидкість обертання ТД  $\omega_D < \omega_{кр1}$  і струм в обмотці  $LM$   $i_{LM} < 0,05 I_n$ , після завершення перемикання контакторів електродинамічне гальмування не настає, а при  $\omega_D < \omega_{кр1}$  виникає струм понад номінального значення.

Перш ніж здійснити пошуки оптимальних значень факторів, що впливають на час розряду конденсатора  $C_\phi$  до граничного рівня  $U_2$  початковим струмом збудження, визначимо межі варіювання цих факторів.

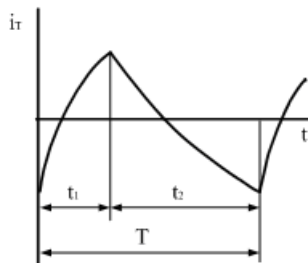
Оскільки створення ініціюючого гальмівного струму відбувається на початку імпульсного регулювання процесу гальмування, робоча частота ІР  $f_{ip}$  починає змінюватися в функції змінної складової струму від мінімального заданого значення в сторону збільшення. Оскільки зворотний зв'язок по змінній складовій струму ТД береться за середнім значенням, можна прийняти, що  $f_{ip}$  за час створення ініціюючого гальмівного струму постійна і дорівнює мінімальному початковому значенню.

Стосовно до розглянутих умов створення в обмотці  $LM$  початкового гальмівного струму, важливим є спосіб регулювання ІР. Причому, необхідно враховувати, що для даного випадку доцільно стабілізувати струм збудження, забезпечив тим самим економічні витрати енергії накопиченої в конденсаторі  $C_\phi$ .

Жорстку стабілізацію струму можна здійснити при регулюванні струму за заданими рівнями або при обмеженні верхнього рівня його пульсацій  $I_{0ГР}$ . Останній спосіб регулювання більш простий при реалізації. При цьому мінімально допустиме значення верхнього рівня пульсацій ініціюючого струму в обмотці  $LM$  вибирається виходячи з того, що значення нижнього рівня його пульсацій не повинно бути менше граничного значення  $I_{кр1}$ . Якщо ж ця умова не виконується, то при закінченні переходу схеми в режим гальмування, в момент закінчення імпульсного циклу, при  $\omega_D < \omega_{кр1}$  гальмування не настає.

Розрахунок величини пульсація відбувається в результаті рішення (6), (7), (8). За час  $t_1$  (рис. 1) струм  $i_{LM}$  наростає відповідно до рівняння (7), для якого початкові умови отримані при спільному вирішенні з (6)

$$U_o = \sqrt{\frac{I_{кр\min}^2 + C_\phi^2 \omega_3^2 U_1^2}{C_\phi^2 \omega_3^2}}; \quad \Psi_1 = \arccos \frac{U_1}{U_o}. \quad (11)$$



**Рис. 1.** Діаграма змінної складової гальмівного струму:  $T$  – період;  $t_1$  – час провідного стану імпульсного регулятора;  $t_2$  – час закритого стану імпульсного регулятора

Підставивши в (9)  $I_{озг}$  отримаємо нерівність

$$I_{озг} \geq I_{кр\min} e^{\frac{K_{LM}}{L_{LM}} t_2} \quad (12)$$

де  $t_2 = T - t_1$ , див. рис. 1.

Якщо врахувати, що перехід до гальмування ТД може відбуватися при  $\omega_o < \omega_{кр1}$  і максимальних значеннях  $U_{сф}$ , тоді

$$\frac{di_{LM}}{dt} \rightarrow \max, t_1 \rightarrow 0, t_2 \rightarrow T.$$

Підставивши в (12) значення періоду, виражене через частоту, отримаємо

$$I_{озг} \geq I_{кр\min} e^{\frac{K_{LM}}{f_{ip} L_{LM}}} \quad (13)$$

або

$$I_{озг} \geq K I_n e^{\frac{K_{LM}}{f_{ip} L_{LM}}} \quad (14)$$

де  $K = 0,05 \div 0,13$ .

Максимально допустиме значення  $I_{озг}$  визначається з розрахунку, що середнє значення струму не повинно перевищувати  $0,75 I_n$ . Остаточні межі допустимих значень  $I_{озг}$  обмежуються нерівністю

$$K I_n e^{\frac{K_{LM}}{f_{ip} L_{LM}}} \leq I_{озг} \leq 0,75 I_n + \frac{\Delta I}{2} \quad (15)$$

Стосовно до конкретних параметрів тягового електроприводу, час розряду  $t_{p2}$  конденсатора  $C_\phi$  до напруги  $U_{2нрсф}$  відбувається в період ініціації гальмівного режиму, залежить від початкової напруги  $U_{2н}$  на конденсаторі  $C_\phi$ , його ємності, комутованого струму  $i_k$ , робочої частоти  $f_{ip}$  перетворювача. Причому для забезпечення безаварійного переключу електропривода в гальмівний режим має виконуватися умова (10).

Як було вище зазначено, за час створення ініціюючого струму в обмотці LM зміна  $f_{ip}$  незначна, тому приймаємо  $f_{ip} = \text{const}$  і дорівнює початковому значенню.

Таким чином, отримані математичні вирази для визначення параметрів системи при початковому збудженні ТД в режимі гальмування зарядом конденсатора вхідного фільтра, що дозволить оцінити тривалість часу ефективного регулювання струму збудження, в залежності від ємності конденсатора, комутованого струму збудження, початкової напруги на конденсаторі.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** З аналізу електромагнітних процесів у ТД рудникових електровозів при переході системи електроприводу з режиму тяги у режим гальмування була встановлена залежність, що дозволяє зробити оцінку граничних умов переходу

з режиму тяги у режим гальмування в залежності від ряду факторів, які враховують конструктивні особливості системи електроприводу та початкові умови у колі гальмування.

### Список літератури

1. Волотковский С.А. Рудничная электровозная тяга. - М.: Недра, 1981. - 389с.
  2. Синчук О.Н. Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов / О.Н. Синчук, И.О. Синчук, Н.Н. Юрченко, А.А. Чернышов, О.А. Удовенко, О.В. Пасько, Э.С. Гузов. Научное издание. – Київ: ІЕДНАУ, 2006. – 252с.
  3. Тихменев Б.Н., Трахтман Л.Н. Подвижный состав электрифицированных железных дорог. - М.: Транспорт, 1980. - 471 с.
  4. Алексеев Н.И. Оптимизация систем электрической тяги в подземных выработках шахт. - М.: Недра, 1979. - 252 с.
  5. Синчук О.Н., Чумак В.В., Ершов О.В. Импульсные системы управления и защита на рудничном электровозном транспорте. Монография – АДЕФ – Украина, 1998. – 280 с.
  6. Гаврилов Я.И., Мнацаканов В.А. Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями. - М.: Транспорт, 1986. - 229 с.
- Рукопис подано до редакції 16.04.16

УДК 621.316.14

А.Г. ЛИКАРЕНКО, канд.техн.наук, доц., А.А. ПЕТРИЧЕНКО, ассистент,  
Р.В. ЗИМАНКОВ, аспирант, Криворожский национальный университет

## ОЦЕНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ШАХТ КРИВБАССА В НЫНЕШНИХ УСЛОВИЯХ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В статье приведены результаты исследований состояния изоляции распределительных сетей шахт Криворожского железорудного бассейна. Анализ параметров изоляции сетей железорудных шахт является важным этапом для повышения эффективности функционирования существующих и разработки новых аппаратов защиты от утечек тока, задача которых осуществлять безопасность горнорабочих при эксплуатации электротехнических комплексов в подземных горных выработках. Эффективная и стабильная работа аппаратов защиты от утечек определяется правильностью измерения активного сопротивления и емкости изоляции сети, т.е. косвенного определения токов утечки, дальнейшей компенсации емкостных токов утечки и обеспечения достаточно быстрого отключения сети при повреждении изоляции или прикосновении человека. Проведен анализ и статистическая оценка электрических параметров изоляции сетей железорудных шахт. Полученные результаты рекомендуется принимать в качестве исходных данных при разработке эксплуатационно-технических требований к устройствам защитного отключения в распределительных сетях железорудных шахт.

**Ключевые слова:** железорудные шахты, распределительная сеть, ток утечки, аппарат защиты от утечек

**Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями.** Необходимость проведения экспериментальных исследований по установлению диапазонов изменения параметров изоляции рудничных распределительных сетей относительно земли существовала уже давно и обусловлена тем, что на шахтах Кривбасса такие полноценные исследования проводились лишь в период 1978-1980 гг. [2]. Поэтому результаты этих исследований сегодня не отражают фактическое состояние изоляции нынешних электрических сетей. Это связано с тем, что за истекшее с того момента время произошли существенные изменения как в схемах электроснабжения горных участков, так и в применении другого электрооборудования (регулируемого электропривода), кабельной продукции, коммутационной и защитной аппаратуре.

**Изложение материала и результаты.** Экспериментальные исследования были произведены на следующих объектах: ш. Гвардейская, ш. Октябрьская, ш. Родина, ш. Ленина (ПАО «КЖРК»), а также на ш. Артем-1 и ш. Артем-2. При этом следует отметить, что горногеологические и горнотехнические условия месторождений примерно одинаковы почти для всех шахт Кривбасса, что позволяет предположить, что результаты исследований по ряду шахт можно распространить и на остальные шахты Криворожского бассейна.

Измерение электрических параметров изоляции сетей относительно земли производились методом КГРИ [3].

По результатам экспериментов полная и активная проводимости определялись расчетным путем при искусственном смещении нейтрали трансформатора на середину вектора линейного напряжения.

Емкость электрических сетей определялась расчетным путем по результатам измерений полного и активного сопротивлений относительно земли.

Измерения производились после отключения от сети реле утечки, что позволило получить электрические параметры «чистых» сетей относительно земли.

Так как активное сопротивление и емкость изоляции сети являются случайными величинами, их удобно для наглядности представить в виде графиков.

Согласно теории вероятности задать случайную величину – задать функцию ее распределения  $F(x) = P(X < x)$ .

Эта функция показывает вероятность того, что случайная величина  $X$  примет значение меньше, чем произвольное действительное значение  $x$ .

Результаты экспериментов также можно представить и в виде плотности распределения вероятностей  $P(x) = d[F(x)]/dx$ .

Расчет функций и плотностей распределения активного сопротивления и емкости сетей относительно земли приведен в табл. 1.

Таблица 1  
Расчет функций и плотностей распределения параметров изоляции сетей железорудных шахт Кривбасса

| Интервал                           | Абсолютная частота, m | Относительная частота, $w = m_i / \sum m$ | Плотность распределения, $w/h$ | Функция распределения вероятности |
|------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Активное сопротивление, кОм</b> |                       |                                           |                                |                                   |
| 0-10                               | 22                    | 0,366                                     | 0,036                          | 0,366                             |
| 10-20                              | 17                    | 0,283                                     | 0,028                          | 0,65                              |
| 20-30                              | 12                    | 0,2                                       | 0,02                           | 0,85                              |
| 30-40                              | 6                     | 0,1                                       | 0,01                           | 0,95                              |
| 40-50                              | 2                     | 0,033                                     | 0,0033                         | 0,98                              |
| 50-60                              | 1                     | 0,016                                     | 0,0013                         | 1                                 |
| <b>Емкость, мкФ</b>                |                       |                                           |                                |                                   |
| 0-0,5                              | 5                     | 0,083                                     | 0,166                          | 0,083                             |
| 0,5-1,0                            | 11                    | 0,183                                     | 0,366                          | 0,266                             |
| 1,0-1,5                            | 10                    | 0,166                                     | 0,333                          | 0,433                             |
| 1,5-2,0                            | 12                    | 0,2                                       | 0,4                            | 0,633                             |
| 2,0-2,5                            | 7                     | 0,116                                     | 0,233                          | 0,75                              |
| 2,5-3,0                            | 10                    | 0,166                                     | 0,333                          | 0,916                             |
| 3,0-3,5                            | 3                     | 0,05                                      | 0,1                            | 0,966                             |
| 3,5-4,0                            | 2                     | 0,033                                     | 0,066                          | 1                                 |

где  $h$  - длина соответствующего интервала.

Графически функции и плотности распределения параметров изоляции сетей представлены на рис. 1,2.

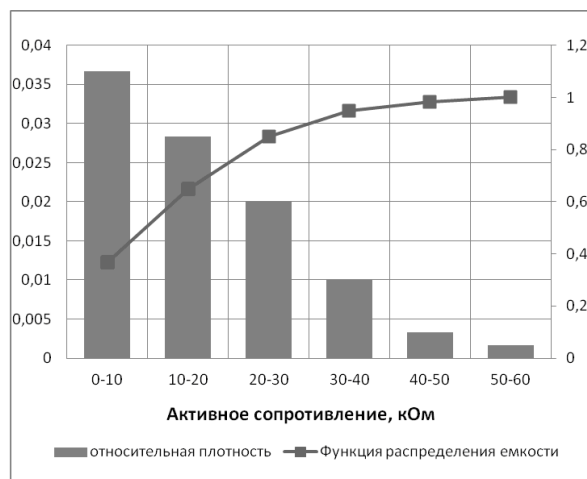


Рис. 1. Функция и плотность распределения активного сопротивления изоляции электрических сетей

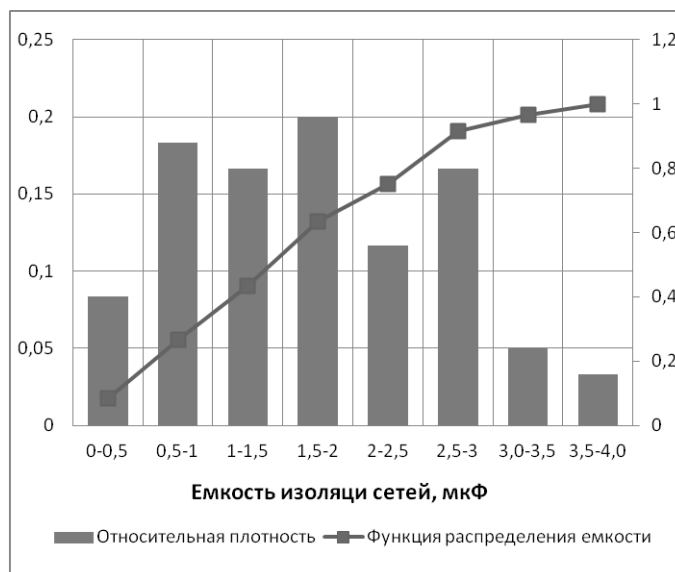


Рис. 2. Функция и плотность распределения емкости изоляции электрических сетей

Анализ и оценка полученных результатов исследований электрических параметров сетей позволил установить диапазон их изменения и устойчивые уровни [4]. Эти установленные данные приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Диапазон изменений и устойчивые уровни электрических параметров сетей железорудных шахт Кривбасса относительно земли

| Наименование параметра      | Значения параметров |      | Устойчивый уровень |
|-----------------------------|---------------------|------|--------------------|
|                             | min                 | max  |                    |
| Активное сопротивление, кОм | 3,94                | 52,2 | 4,0-30,0           |
| Емкость, мкФ                | 0,235               | 3,72 | 0,5-3,0            |

Для статистической обработки и дальнейшей оценке полученных результатов исследования весь массив полученных данных об электрических параметрах изоляции сетей железорудных шахт относительно земли был систематизирован согласно разбиения рабочего диапазона емкости изоляции сетей (0 – 3)мкФ на интервалы. Были установлены парные статистические значения емкости и активного сопротивления изоляции сетей, попадающих в соответствующий интервал разбиения (табл. 3).

Таблица 3

Результаты систематизации электрических параметров изоляции сети

| Интервал<br>0-0,5 мкФ |       | Интервал<br>0,5-1,0 |       | Интервал<br>1,0-1,5 мкФ |       | Интервал<br>1,5-2,0 мкФ |      | Интервал<br>2,0-2,5 мкФ |      | Интервал<br>2,5-3,0 мкФ |      |
|-----------------------|-------|---------------------|-------|-------------------------|-------|-------------------------|------|-------------------------|------|-------------------------|------|
| 49,13                 | 0,235 | 22,92               | 0,568 | 15,52                   | 1,03  | 24,02                   | 1,52 | 7,2                     | 2,02 | 28,8                    | 2,52 |
| 24,02                 | 0,387 | 28,8                | 0,6   | 18,18                   | 1,035 | 8,93                    | 1,54 | 14,6                    | 2,12 | 9,42                    | 2,57 |
| 28,8                  | 0,465 | 22,06               | 0,641 | 15,43                   | 1,04  | 15,7                    | 1,57 | 16,7                    | 2,25 | 13,6                    | 2,62 |
| 20,74                 | 0,47  | 36,3                | 0,658 | 52,2                    | 1,06  | 5,61                    | 1,58 | 12,06                   | 2,32 | 7,35                    | 2,68 |
| 17,28                 | 0,498 | 21,03               | 0,73  | 9,82                    | 1,095 | 37,04                   | 1,6  | 14,7                    | 2,36 | 6,35                    | 2,75 |
|                       |       | 39,3                | 0,79  | 28,7                    | 1,13  | 7,41                    | 1,66 | 8,15                    | 2,4  | 18,7                    | 2,8  |
|                       |       | 38,7                | 0,8   | 8,91                    | 1,194 | 8,78                    | 1,72 | 15,4                    | 2,44 | 3,94                    | 2,87 |
|                       |       | 20,42               | 0,82  | 41,27                   | 1,29  | 24,28                   | 1,78 |                         |      | 7,78                    | 2,87 |
|                       |       | 17,52               | 0,825 | 35,1                    | 1,32  | 8,64                    | 1,85 |                         |      | 4,6                     | 2,94 |
|                       |       | 12,8                | 0,89  | 7,45                    | 1,41  | 14,8                    | 1,88 |                         |      | 7,41                    | 2,96 |
|                       |       | 39,3                | 0,9   |                         |       | 8,65                    | 1,92 |                         |      |                         |      |
|                       |       |                     |       |                         |       | 13,08                   | 1,96 |                         |      |                         |      |

Полученные данные были обработаны методами математической статистики [5,6] с помощью пакета прикладных программ Microsoft Excel и приведены в табл. 4.

Таблица 4

Статистические значения параметров изоляции сетей железорудных шахт

| Интервалы разбиения, мкФ | Активное сопротивление, кОм |                   |                   | Емкость, мкФ |                   |                   | Количество измерений<br>n |
|--------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|--------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
|                          | $A \approx \bar{x}$         | $\bar{\sigma}(x)$ | $\pm \varepsilon$ | $\bar{X}$    | $\bar{\sigma}(x)$ | $\pm \varepsilon$ |                           |
| 0-0,5                    | 27,994                      | 12,555            | 8,005             | 0,411        | 0,106             | 0,093             | 5                         |
| 0,5-1,0                  | 27,195                      | 9,696             | 5,73              | 0,747        | 0,115             | 0,068             | 11                        |
| 1,0-1,5                  | 23,258                      | 15,33             | 9,501             | 1,16         | 0,136             | 0,084             | 10                        |
| 1,5-2,0                  | 14,745                      | 9,335             | 5,28              | 1,715        | 0,158             | 0,089             | 12                        |
| 2,0-2,5                  | 12,687                      | 3,702             | 2,743             | 2,272        | 0,154             | 0,114             | 7                         |
| 2,5-3,0                  | 10,795                      | 7,703             | 4,774             | 2,758        | 0,155             | 0,096             | 10                        |

где  $A \approx \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$  – наиболее вероятное значение (математическое ожидание) результата

технического измерения параметров изоляции сетей;  $\bar{\sigma}(x) \approx \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$  – среднеквадратическое отклонение выборки;  $\varepsilon = t_\gamma \cdot S_x$  – доверительная граница погрешности;  $t_\gamma$  – коэффициент доверия, зависящий от объема выборки  $\sum n$  и определяемый по справочным данным при принятой двухсторонней вероятности  $\gamma = 0,95$ ;  $S_x = S/\sqrt{n} \approx \bar{\sigma}(x)/\sqrt{n}$  – среднеквадратическое отклонение результата.

Гистограмма наиболее вероятных значений активного сопротивления и емкости изоляции сетей железорудных шахт, построенная на основании полученных данных табл. 4, приведена на рис. 3.

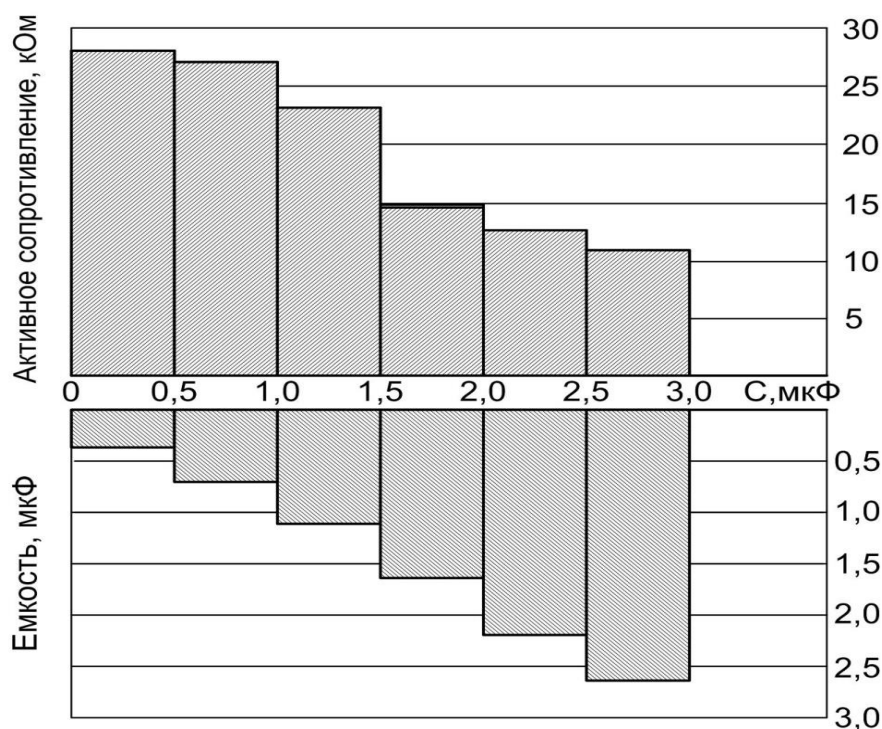


Рис. 3. Гистограмма вероятных значений активного сопротивления и емкости изоляции по интервалам рабочего диапазона емкости сети

**Выводы и направления дальнейших исследований.** Анализ полученной гистограммы, а также установленный коэффициент корреляции Пирсона  $R_{R,C} = -0,566$  для всего рабочего диапазона емкости изоляции свидетельствует об обратной средней взаимосвязи между емкостью и активным сопротивлением изоляции сетей железорудных шахт.

Полученные и приведенные выше данные об электрических параметрах сетей необходимо принять в качестве исходных при разработке эксплуатационно – технических требований к УЗО, применяемых в железорудных шахтах.

#### Список литературы

1. Розен В.П. Оцінювання енергоефективності електроспоживання вугільних шахт [Текст] / В.П. Розен, Л.В. Давиденко, В.І. Волинець // Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах: Матеріали IV-ої міжнародної науково-технічної конференції – Луцьк: РВВ ЛДТУ, 2012. – С. 130 – 132.
2. Пархоменко Р.А. К вопросу оценки процесса электропотребления горнорудных предприятий в условиях неопределенности и неполноты информации [Текст] / Р.А. Пархоменко, А.Н. Яловая, М.А. Баулина // Электромеханика и энергетические системы, методы моделирования та оптимізації: Збірник матеріалів конференції Міжнародної 3 науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів. – Кременчук: КрНУ, 2013. – С.190-191.
3. Messner S. MESSAGE- MACRO: linking an energy supply model with a macroeconomic module and solving it iteratively / S. Messner, L. Schattenholzer // Energy. – 2000. – N 25. – P. 267 – 285.
4. Праховник А.В. Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий / А.В. Праховник, В.П. Розен, В.В. Дегтярев // М.: Недра, 1985 - 232 с.
5. Олейников В.К. Анализ и планирование электропотребления на горных предприятиях / В.К. Олейников // М.: Недра, 1983. – 192 с.
6. Айвазян С. А. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности / С. А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин // М.: Финансы и статистика, 1989.— 607 с.
7. Parkchomenko R. Dynamics appraisal of electrical energy consumption process of iron ore mines in conditions of indeterminacy and insufficiency of information [Electronic source] / R.O. Parkchomenko // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 2. – P. 332–335. Access mode: [http://www.metaljournal.com.ua/assets/MMI\\_2014\\_6/MMI\\_2015\\_2/051-Parchomenko.pdf](http://www.metaljournal.com.ua/assets/MMI_2014_6/MMI_2015_2/051-Parchomenko.pdf)
8. Синчук И.О. Потенциал электроэнергоэффективности и пути его реализации на производствах с подземными способами добычи железорудного сырья. Монография / И.О. Синчук, Э.С. Гузов, А.Н. Яловая, С.Н. Бойко // под ред. докт. техн. наук, профессора О.Н. Синчука. – Кременчук: Изд. ЧП Щербатых А.В. – 2015. – 296 с.
9. Синчук О.Н. Оценка состояния и определения тактики повышения эффективности работы участковых подстанций железорудных шахт / О.Н. Синчук, С.Н. Лесной, Р.А. Пархоменко, А.Н. Яловая // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. – Кіровоград, 2012. – Випуск 25, частина II. – С.248 – 254.
10. Розен В.П. Моделирование энергетических режимов энергоемких потребителей железорудных шахт / В.П. Розен, Э.С. Гузов, Р.О. Пархоменко // Научно-технический сборник «Гірничий вісник». Випуск №97, – Кривий Ріг: 2014. – С.176 – 180.
11. Пархоменко Р.О. Підвищення ефективності електропостачання у шахтних мережах як один із шляхів підвищення конкурентоспроможності продукції / Р.О. Пархоменко, О.В. Аніськов // Збірник тез доповідей II міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції «ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ: СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ – REMS'15»/ Київ: Національний технічний університет України «КПІ», 2015.-

Рукопись поступила в редакцию 26.04.16

УДК 621.316.925:622.82

Е.С. ГУЗОВ, канд.техн. наук, проф., І.О. СІНЧУК, канд.техн.наук, доц.,  
Д.О. КАЛЬМУС, асистент, М.І. ЛАГОДА, магістрант  
Криворізький національний університет

### ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ГАЛЬМУВАННЯ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ РУДНИКОВИХ ЕЛЕКТРОВІЗІВ

У статті розглянуто способи гальмування рудникових електровозів з електроприводом постійного струму. Відзначено актуальність та необхідність пошуку рішень щодо підвищення ефективності електричного гальмування рудникових електровозів. Встановлено, що область застосування останнього обмежена умовою самозбудження тягових двигунів, що в свою чергу ускладнює процес гальмування необхідністю застосовувати додаткові елементи з метою ініціації струму збудження. Виходячи з умови самозбудження двигунів було проведено аналіз найбільш поширених схемних рішень тягових електроприводів, виділено основні елементи, що входять до таких схем, та складено узага-



льнену структуру тягового електропривода з імпульсним регулятором. Розглянуто можливі варіанти спільного використання режиму електродинамічного гальмування і противмикання тягових двигунів. Відзначено проблеми, які виникають при такому способі гальмування. Складено рекомендації щодо застосування режимів гальмування. Визначено основні функції, які має виконувати алгоритм ефективного гальмування. Зазначено, що головним завданням є забезпечення широкого діапазону застосування та запобігання відмовам системи електричного гальмування.

**Ключові слова:** гальмування, електровоз, противімкнення, тяга, електромеханічні характеристики

**Проблема та її зв'язок з практичними завданнями.** Найбільш широко на усіх типах електровозів використовуються електричні двигуни постійного струму (ТЕД ПС) послідовного збудження, які мають достатньо високий к.к.д., раціональні для цілей тяги електромеханічні характеристики, які дозволяють здійснювати регулювання частоти обертання якоря ТЕД ПС відносно простими засобами [1].

Найбільш ефективним з яких являється імпульсне регулювання [2]. Але, разом з тим, при застосуванні імпульсних систем, залишається не вирішеним ряд актуальних задач [3,4]. Одною з яких є підвищення ефективності процесу електричного гальмування [3].

**Аналіз досліджень та публікацій.** Досить ефективним видом електричного гальмування тягових двигунів постійного струму послідовного збудження тягових електроприводів рудникових електровозів як з реостатним способом керування рівнем напруги на затискачах двигуна, так і імпульсному є електродинамічне [5]. Однак область його дії обмежена, та визначається умовами самозбудження двигунів [6-8]. Однією з таких умов є збільшення залишкового магнітного потоку двигуна, а іншою те, що швидкість обертання повинна перевищувати критичне значення, при якому гальмування двигунів не настає. І якщо виконання першої умови не викликає труднощів, і, як правило, забезпечується доволі простими схемними рішеннями, то для виконання другої умови намагаються різними методами зменшити значення критичної частоти обертання.

**Постановка завдання.** Метою роботи є обґрунтування структури алгоритму ефективного гальмування тягових електроприводів постійного струму рудникових видів контактних електровозів.

**Викладення матеріалу та результати.** Виходячи з поставлених умов, авторами проведено аналіз найбільш поширених структур тягових електроприводів. Як було зазначено вище, перша умова самозбудження двигуна забезпечується схемними рішеннями. Звідси можна виділити дві, найбільш розповсюджені структури: з реверсуванням обмотки якоря (збудження) та без реверсування [6]. Окремо треба зазначити, що реверсування обмотки збудження не є бажаним, оскільки виникає можливість розмагнічення останньої, та у зв'язку з цим суттєво підвищується вірогідність зриву гальмування. Тому структури з реверсором обмотки якоря знайшли більше розповсюдження [4].

При роботі електропривода з частотою обертання близькою до критичного значення та нижче, застосовують ініціацію струму збудження від додаткового джерела живлення, наприклад, акумуляторної батареї або за рахунок енергії заряду конденсатора, що прискорює процес збудження та підвищує надійність електричного гальмування.

Існують також схеми, в яких є можливість живлення обмотки збудження від джерела на період гальмування. Але для таких рішень характерним є складність їх реалізації, тому вони потребують суттєвого вдосконалення [3].

З практичної точки зору для рудникових електровозів можна виділити такі види гальмування, як електричне, механічне та комбінація цих способів.

У свою чергу найбільш поширені методи електричного гальмування це противмикання та динамічне гальмування. Комбінація методів гальмування припускає чергування режимів з регулюванням часу їх тривалості.

Так в схемі (рис.1) для досягнення поставленої меті в силову частину електропривода введенні елементи стимуляції гальмівних режимів ТД-VD1, С. Необхідне збудження двигуна, при переводі його в гальмівний режим, створюється за допомогою реверса струму якорної обмотки і включення двигуна на гальмівний резистор R. Імпульс на збудження ТД подається за рахунок енергії заряду конденсатора С по ланцюгу: С-КМ2-ЛМ-М-Р-С.

До недоліків розглянутої схеми слід відвести залежність часу дій і величину начального імпульсу струму, який створюється при переводі ТД в гальмівний режим, від напруги живлен-

ня; можливість самостійного розряду конденсатора С через струми втрат схеми і самого конденсатора С при тривалому часі відсутності напруги на струмоприймачах електропривода РЕ.

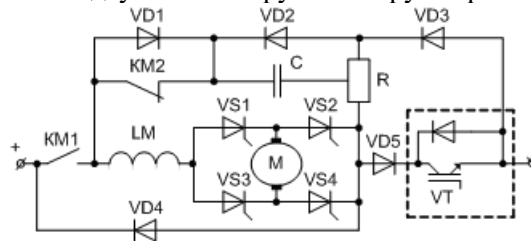


Рис. 1. Схема тягового ЕП з елементами стимуляції гальмівних режимів

Схема (рис. 2) не містить силових елементів, а самозбудження двигуна при переході в гальмівний режим здійснюється шляхом короткочасного замикання тиристора VS перед вимиканням контактора КМ.

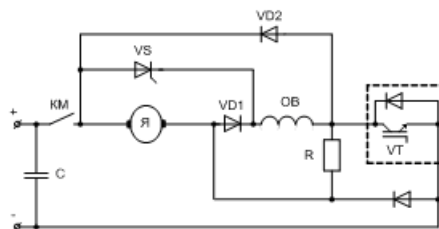


Рис. 2. Схема тягового ЕП з переходом в гальмівний режим без реверсу обмоток

Також, в якості можливих варіантів структури тягового електроприводу, можна розглянути перетворювач з дворівневим регулюванням напруги при послідовно-паралельному з'єднанні тягових електричних двигунів.

Таке включення імпульсного перетворювача має взаємопов'язані ланцюга управління двома тяговими двигунами електровоза. Електропривод може працювати в тяговому або гальмівному режимі.

У тяговому режимі в процесі імпульсної комутації тягові двигуни переключаються на протязі кожного періоду з послідовного на паралельне з'єднання. Перемикання відбувається в наступній послідовності.

На першому рівні регулювання напруги двигуни з'єднуються послідовно і до кожного двигуна прикладається імпульс напруги рівний половині номінального. За рахунок широтно-імпульсної модуляції напруга на двигунах на першому рівні регулюється від нуля до напруги, який дорівнює половині номінального.

Іноді для ініціації гальмівних режимів ТД практикується додаткове харчування обмоток збудження від акумуляторної батареї. Така постановка вирішення питання дозволяє отримати стабільні гальмівні характеристики незалежно від початкової швидкості гальмування. Однак, при цьому виникає необхідність спеціального догляду за схемою збудження, пов'язаному зі специфікою експлуатації акумуляторних батарей.

Аналізуючи розглянуті вище схемні рішення, слід також відзначити, що всі вони характеризуються загальним і важливим недоліком, - потребою в додаткових силових елементах або настройках, необхідних для досягнення поставленої мети.

Аналіз схем тягових електроприводів рудникових електровозів дозволив скласти узагальнену структуру тягового електропривода з імпульсним регулюванням (рис. 3) до якої входять: двигун Д, його обмотка якоря та збудження відповідно Я, LM; імпульсний регулятор ІР з силовим ключом VT; джерело живлення ДЖ; реверсор Р, що містить ключі VS1-VS4; блок гальмування, до якого входять керований ключ VS5 та некеровані VD1, VD2; блок резисторів БР з щаблями реостата а, b, с та контактами прискорення, рушійного режиму та режиму гальмування відповідно 1, 2, KM1, KM2.

Розглянемо можливі варіанти спільного використання режиму електродинамічного гальмування ТЕД ПС і противмикання. Імпульсне керування тяговим електроприводом дозволяє здій-



регулювання гальмового струму тягових двигунів за умовами зчеплення залежно від заданого уповільнення;

обмеження струму гальмування в ланцюгах тягового електроприводу при перевантаженнях.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** З аналізу результатів роботи, можна зробити висновок, що імпульсне керування тяговим електроприводом дозволяє здійснювати комбінацію режимів гальмування, що підвищує ефективність електричного гальмування рудникових електровозів в цілому. При цьому виникає необхідність у створенні алгоритму ефективного гальмування електропривода тягових двигунів рудникового електровозу, також визначено, що основні функції, які він має виконувати є забезпечення широкого діапазону застосування та запобігання відмовах системи електричного гальмування.

#### *Список літератури:*

1. Волотковский С.А. Рудничная электровозная тяга. – М.: Недра, 1981. – 389 с.
2. Синчук О.Н. Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов / О.Н. Синчук, И.О. Синчук, Н.Н. Юрченко, А.А. Чернышов, О.А. Удовенко, О.В. Пасько, Э.С. Гузов. Научное издание. – Київ: ІЕДНАНУ, 2006. – 252с.
3. Синчук О.Н., Чумак В.В., Ершов О.В. Импульсные системы управления и защита на рудничном электровозном транспорте. Монография – АДЕФ – Украина, 1998. – 280 с.
4. Синчук О.Н. Шахтный электровозный транспорт. Теория, конструкции, электрооборудование / О.Н. Синчук, Э.С. Гузов, В.Л. Дебелый, Л.Л. Дебелый; под ред. докт. техн. наук, проф. О.Н. Синчука. – Кривой Рог - Донецк: ЧП Щербатых А. В., 2015. – 296 с.
5. Тихменев Б.Н., Трахтман Л.Н. Подвижный состав электрифицированных железных дорог. - М.: Транспорт, 1980. - 471 с.
6. Зеленов А.Б. Теория электропривода. Часть 1. Алчевск: ИПЦ «Ладо», ДонГТУ, 2005.
7. Алексеев Н.И. Оптимизация систем электрической тяги в подземных выработках шахт. - М.: Недра, 1979. - 252 с.
8. Гаврилов Я.И., Мнацаканов В.А. Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями. - М.: Транспорт, 1986. - 229 с.

Рукопис подано до редакції 14.03.16

УДК 621.316.925:622.82

Д. О. КАЛЬМУС, асистент, І. І. КОВАЛЕНКО, студент  
Криворізький національний університет

### **ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ПРИВОДА РУДНИКОВОГО КОНТАКТНОГО ЕЛЕКТРОВОЗА ЗАСОБАМИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ**

Тяговий електропривод рудникового контакторного електровоза має ряд проблем з надійністю роботи. Зокрема постає питання про підвищення функціонування контактних рудникових електровозів при порушеннях нормальних умов живлення. В теперішній час є ряд рішень спрямованих на забезпечення безаварійного функціонування електроприводу при зниженні або зникненні напруги живлення, розроблені системи координуючі інтервал часу формування замикаючих і відкриваючих імпульсів. Але даний варіант підвищення надійності не захищає від помилкових імпульсів перешкод. Так при відхиленні від номінальних значень або навіть зникненні напруги живлення можуть виникати аварійні режими. Метою даного способу є підвищення надійності роботи тягових електроприводів контактних електровозів засобами системи керування. Зникнення напруги живлення є найбільш несприятливою ситуацією. При цьому зі зменшенням напруги конденсатора від якого живиться система керування виникають імпульсні перешкоди в результаті відбувається перемикання імпульсної апаратури. Інформація про перемикання контакторів надходить на керуючий вхід, змінюючи в сторону зменшення його вихідну напругу за допомогою чого здійснюється контроль співвідношення величини напруги пропорційного пульсаціям струму і напруги пропорційного рівню їх обмеження. При перевищенні струмом цього рівня, і при відсутності процесу перезарядження конденсатора, а також якщо струм в силовому ланцюзі двигуна наростає, то формується позачерговий імпульс на відмикання ключа. Якщо імпульс перешкоди виникає в керуючому ланцюзі в період закритого стану ІР, струм двигуна починає наростати. Таким чином оперативно розпізнається порушення нормального режиму роботи ІР на ранній стадії. При цьому також формується позачерговий коригувальний імпульс. Тому, в разі зникнення напруги в мережі живлення струм

розряду конденсатора вхідного фільтра, під час створення ініціюючого гальмівного струму, не перевищує заданого рівня. З метою запобігання аварійних ситуацій, що можуть виникнути при тривалих зникненнях напруги живлення на струмознімачі транспортного засобу, необхідно зберігати керованість електроприводу при порушенні нормального режиму живлення. Для чого під час зникнення напруги живлення, режим роботи системи управління повинен вибиратися автоматично, виходячи з умов руху характеру зміни рівнів напруги на струмознімачі і конденсаторі.

**Ключові слова:** надійність, контактний електровоз, електропривод, система керування, гальмування

**Проблема та її зв'язок з практичними завданнями.** В теперешній час незважаючи на велике різноманіття існуючих способів і пристроїв, що підвищують ефективність функціонування контактних рудникових електровозів питання надійної роботи останніх при порушеннях нормальних умов струмознімання мало опрацьований. Тому актуальним є напрямок раціонального використання технічних можливостей електрообладнання електровозу для запобігання аварійних режимів при збереженні керованості транспортного засобу. Зокрема накопичувальних конденсаторів вхідного фільтра, наприклад, використання їх в якості джерела живлення акумулює енергію обертових ТД в короточасних гальмівних режимах.

**Аналіз досліджень та публікацій.** При роботі рудникового електровозу можливі відхилення напруги живлення від номінального значення, в зв'язку з чим, при виконанні певних умов, можуть відбуватися передумови виникнення аварійних режимів, що знижують ефективність роботи електровоза. В даний час є ряд рішень, спрямованих на забезпечення безаварійного функціонування електроприводу в умовах знижень і зникнень напруги живлення. Це установка на електровозах спеціальних генераторів напруги, гальмування тягових двигунів при порушенні нормального режиму живлення, застосування контактно-акумуляторних електровозів.

Так розроблені системи координуючі інтервал часу формування замикаючих і відкриваючих імпульсів кожен період роботи. До недоліків систем управління, побудованих за таким принципом, слід віднести відсутність захисту від помилкових імпульсів перешкод, а також неможливість регулювання частоти імпульсним регулятором щодо раціонального закону. Відомі пристрої, в яких при зникненні напруги в мережі живлення перешкоджають черговим імпульсам системи управління надходити на керуючі електроди. Однак, такі пристрої не можуть автоматично підтримувати робочий режим електроприводу при зникненні напруги в мережі живлення. В цьому випадку для забезпечення працездатності електроприводу при повторній появі напруги необхідно починати регулювання з нуля. З метою підтримки робочого режиму керування електроприводом при короточасних зниканнях напруги живлення, в ряді систем використовується енергія заряду конденсатора вхідного фільтра для збереження працездатності управління. Недоліком таких пристроїв є неможливість підтримки робочого режиму при тривалих порушеннях нормальних умов струмознімання. В результаті цього електропривод стає некерованим, виключається можливість переключення електроприводу в режим гальмування, а в разі потреби екстреного гальмування може привести до аварійної ситуації і є неприпустимим.

Таким чином, відмічені шляхи вирішення цього завдання не є достатньо ефективними, тому що для досягнення поставленої мети вимагають застосування додаткового електрообладнання, а в деяких випадках ведуть до зниження продуктивності електровозної відкатки.

**Постановка завдання.** Провести аналіз можливості запобігання аварійних ситуацій і підвищення надійності роботи тягових електроприводів контактних електровозів засобами системи управління.

**Викладення матеріалу та результати.** Зникнення напруги в мережі живлення найчастіше відбувається під час переходу електроприводу в режим гальмування, і є найбільш несприятливою ситуацією. При цьому, одночасно зі зменшенням напруги на конденсаторі, від якого в даному випадку живиться вся система управління, виникають імпульсні перешкоди, які є результатом перемикання комутаційної апаратури. У зв'язку з цим на час перемикання силових контакторів режиму тяги і режиму гальмування, в перебігу якого відбувається процес створення ініціюючого гальмівного струму, автоматично зменшується рівень максимальних пульсацій струму. Інформація про переключення контакторів надходить на керуючий вхід, змінюючи в сторону зменшення його вихідну напругу, котра є опорною. За допомогою чого здійснює контроль співвідношення величини напруги пропорційного пульсаціям струму і напруги пропорційного рівню їх обмеження. При перевищенні струмом цього рівня, і при відсутності процесу перезарядження конденсатора, а також якщо струм в силовому ланцюзі двигуна наростає, то формується позачерговий імпульс на відмикання ключа. Якщо імпульс перешкоди виникає в

керуючому ланцюзі в період закритого стану ІР, струм двигуна починає наростати. Таким чином оперативно розпізнається порушення нормального режиму роботи ІР на ранній стадії. При цьому також формується позачерговий коригувальний імпульс. Тому, в разі зникнення напруги в мережі живлення струм розряду конденсатора вхідного фільтра, під час створення ініціюючого гальмівного струму, не перевищує заданого рівня. З метою запобігання аварійних ситуацій, що можуть виникнути при тривалих зникненнях напруги живлення на струмознімачі транспортного засобу, необхідно зберігати керованість електроприводу при порушенні нормального режиму живлення. Для чого під час зникнення напруги живлення, режим роботи системи управління повинен вибиратися автоматично, виходячи з умов руху характеру зміни рівнів напруги на струмознімачі і конденсаторі.

Поставлена мета досягається за рахунок виконання системою управління наступних операцій:

- контроль напруги  $U_{mc}$  на струмознімачами електроприводу;
- контроль напруги  $U_{cf}$  на конденсаторі  $C_f$ ;
- контроль швидкості обертання ТД;
- формування дозволяючого впливу на роботу ТД електроприводу в режимі тяги при наявності напруги на конденсаторі  $C_f$  де верхнього контрольованого рівня  $U_1$ , а також при зниженні напруги на конденсаторі  $U_f$  нижче рівня  $U_2$ , якщо напруга в контактній мережі перевищує другий (нижній) контрольований рівень  $U_2$ , де  $U_2$  - напруга нижче якого система вразлива працює не в режимі;
- формування керуючого впливу на перехід ТД в режим вільного вибігу при зниженні напруги  $U_{mc}$  нижче рівня  $U_2$ , напруги  $U_{cf}$ , до рівня  $U_1$ ;
- використання енергії заряду конденсатора  $C_f$  для збереження працездатності системи управління;
- формування керуючого впливу на переключ ТД електроприводу в режим електродинамічного гальмування при зниженнях напруги  $U_{cf}$  до рівня  $U_2$ ;
- формування заборони впливу на переключ ТД в режим електродинамічного гальмування при зниженнях напруги на конденсаторі  $C_f$  до рівня  $U_2$ , якщо їх швидкість обертання дорівнює або близька до нуля;
- заряд конденсатора  $C_f$ , в режимі гальмування за рахунок е.р.с. ТД;
- повернення ТД в режим вільного вибігу після заряду конденсатора  $C_f$  до напруги вище рівня  $U_1$ , в разі якщо напруга  $U_{mc}$  не відновилося вище рівня  $U_2$ ;
- формування керуючого впливу на переключ ТД в режим тяги при заряді конденсатора  $C_f$  до напруги вище рівня  $U_1$ , в разі якщо напруга  $U_{mc}$  відновилося вище рівня  $U_2$

При виникненні тривалих зникнень напруги мережі живлення, час роботи електроприводу в режимі вільного вибігу, після чергових підзарядів конденсатора  $C_f$  в режим гальмування, залежить від ємності конденсатора  $C_f$  і інтервалу напруги  $U_1$  і  $U_2$ . Але так як відповідно до логіки роботи вказано способу, значення рівня  $U_1$  має вибиратися нижче номінального рівня напруги мережі живлення, інтервал напруги  $U_1 \div U_2$  називається обмеженням як по верхньому, так і по нижньому рівню.

У зв'язку з цим для реалізації зазначеного способу виникає потреба у використанні конденсатора  $C_f$  з великою ємністю, необхідної для накопичення достатньої кількості заряду, що забезпечує роботу схеми управління електроприводу в режимі вільного вибігу при відсутньому напрузі мережі живлення. Щоб збільшити час вільного вибігу, не вдаючись до істотного збільшення габаритів конденсатора  $C_f$ , доцільно автоматично змінювати значення першого контрольованого рівня  $U_1$  в бік збільшення, при переході електроприводу в гальмівний режим.

Після заряду конденсатора  $C_f$  в режимі гальмування, до збільшеного значення першого контрольованого рівня  $U_1$ , цього контрольованому рівню привласнюють попереднє значення.

Таким чином, якщо виконуються логічні умови  $U_{cf} > U_1$  та  $U_{c3} > U_2$ , що дозволяє роботу імпульсного регулятора ІР.

При зниженні напруги  $U_{cf}$  на конденсаторі вхідного фільтра та виконанні логічних умов  $U_1 \geq U_{cf} > U_2$  та  $U_{c3} > U_2$  ТД продовжують працювати в руховому режимі. Коли напруга  $U_{cf}$  знижуючись досягає рівня  $U_1$ , та після виконання логічного умови  $U_1 \geq U_{cf} > U_2$  та  $U_{c3} \leq U_2$  ТД переходять в режим вільного бігу.

Після подальшого зниження  $U_{cf}$  і виконанні умов  $U_{cf} \leq U_2$  та  $U_{cz} \leq U_2$  система керування переводить силову схему в режим гальмування. Після закінчення перевинятків в силовій схемі формується керуючий вплив на дозвіл роботи ІР.

Після заряду конденсатора  $C_f$  в режимі електродинамічного гальмування до рівня  $U_{1y}$  і виконанні умови  $U_{cz} < U_2$ , ТД переводяться в режим вільного вибігу.

Процес повторюється поки напруга  $U_{cz}$  не перевищить рівень  $U_2$  або не відбудеться зупинка електровоза.

Якщо електровоз знаходиться в нерухомому стані і виникають всілякі зміни напруг  $U_{cz}$ ,  $U_{cf}$  з тахогенератора надходить сигнал що забороняє роботу.

Таким чином виконання системою управління вище описаних операцій дозволяє підвищити надійність керування електроприводом, зберегти його керованість при тривалих зникнення напруги на струмознімачах рудникового електровозу. При цьому збільшується час вільного вибігу тягового двигуна, в перебігу якого він може перейти, при необхідності, в режим екстреного гальмування або автоматично перейти в руховий режим після відновлення напруги  $U_{cz}$ .

Запропонована система рис. 1 має ряд оригінальних технічних рішень. Створено комплекс захистів, що запобігають аварійним режимам внаслідок порушення струмознімання, різких змін напруги, імпульсних перешкод, що дозволяє виключити найбільш небезпечний режим ІР без ускладнення силовій схеми.

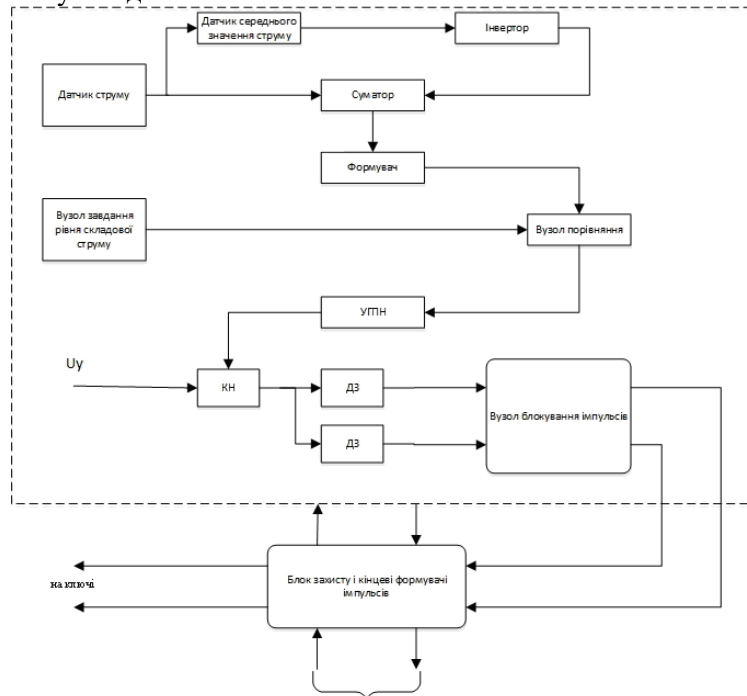


Рис. 1. Структурна схема системи управління імпульсним регулятором

Однією з особливостей системи управління являється застосування широтного способу регулювання з частотою, що змінюється. Частота комутації ІР змінюється автоматично, завдяки чому пульсації струму в двигуні підтримуються на заданому рівні. Це дозволяє в кілька разів зменшити додаткові втрати в двигунах від пульсацій струму при одночасному збільшенні діапазону регулювання.

Така структура дозволяє виконувати такі функції:

забезпечувати перемикання силовій схеми електроприводу в відповідний режим (тяга або гальмування);

при переході електроприводу в режим електродинамічного гальмування дозволяє сформувати напругу управління  $U_y$  СУ відповідно до початкових умовами гальмування;

при переході від гальмівного режиму в руховий здійснює швидкий скидання напруги управління СУ до мінімального значення;

здійснює блокування керуючих імпульсів СУ під час перемикання комутаційної апаратури і в період формування необхідного початкового значення напруги завдання;

дозволяє реалізувати силову схемою стимуляцію режиму електродинамічного гальмування ТД шляхом створення початкового струму в обмотках двигуна від основного джерела живлення.

Якщо при переході електроприводу в гальмівний режим  $U_y$  достатньо велике СУ забезпечує швидке його зниження до необхідного за початковими умовами гальмування, та забезпечує обмеження ініційованого струму на заданому рівні, поки повністю не збирається схема гальмування.

Більш прийнятний в даному випадку спосіб широтно-імпульсного регулювання напруги з обмеженням верхнього рівня пульсацій струму. При цьому імпульси системи управління із за-

даною шпаруватістю надходять на керуючі електроди. Після наростання струму в обмотці збудження до значення обмеження  $I_{огр}$  система управління формує позачергові імпульси, що надходять до регулятора. Виникають позачергові замикання силового ключа.

Таким чином система управління робочими режимами електроприводу дозволяє обмежувати на заданому рівні початковий гальмівний струм ТД.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** При роботі рудникового електровозу можливі відхилення напруги живлення від номінального значення, в зв'язку з чим, можуть відбуватися передумови виникнення аварійних режимів, що знижують ефективність роботи рудникового електровозу.

В даний час є ряд рішень, спрямованих на забезпечення безаварійного функціонування електроприводу в умовах знижень і зникнень напруги живлення. Це установка на електровозах спеціальних генераторів напруги, гальмування тягових двигунів при порушенні нормального режиму живлення, застосування контактно-акумуляторних електровозів.

Недоліком таких пристроїв є неможливість підтримки робочого режиму при тривалих порушеннях нормальних умов струмознімання. В результаті цього електропривод стає некерованим, виключається можливість переключення електроприводу в режим гальмування, а в разі потреби екстреного гальмування може привести до аварійної ситуації і є неприпустимим.

### Список літератури

1. **Волотковский С.А.** Рудничная электровозная тяга. - М.: Недра, 1981. - 389с.
2. **Синчук О.Н.** Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов / О.Н. Синчук, И.О. Синчук, Н.Н. Юрченко, А.А. Чернышов, О.А. Удовенко, О.В. Пасько, Э.С. Гузов. Научное издание. – Київ: ІЕДНАНУ, 2006. – 252с.
3. **Тихменев Б.Н., Трахтман Л.Н.** Подвижный состав электрифицированных железных дорог. - М.: Транспорт, 1980. - 471 с.
4. **Алексеев Н.И.** Оптимизация систем электрической тяги в подземных выработках шахт. - М.: Недра, 1979. - 252 с.
5. **Синчук О.Н., Чумак В.В., Ершов О.В.** Импульсные системы управления и защита на рудничном электровозном транспорте. Монография – АДЕФ – Украина, 1998. – 280 с.
6. **Якимец С.Н.** Структура та режими функціонування тягового електротехнічного комплексу двохосових електровозів: автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Кременчук. – 2011.
7. **Проценко Д.** Підвищення енергоефективності керування тяговим двигуном рухомого складу міського електротранспорту/ Дмитро Проценко, Вадим Чуба // Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании. – Дніпропетровськ, 2010. – С. 18.
8. **Гаврилов Я.И., Мнацаканов В.А.** Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями. - М.: Транспорт, 1986. - 229 с.

Рукопис подано до редакції 28.03.16

УДК 622.7: 658.562

А.И.САВИЦКИЙ, канд. техн. наук, доц., М.А. ТИМОШЕНКО, аспирант  
Криворожский национальный университет

### УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОЦИКЛОМ ВТОРОЙ СТАДИИ РУДОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Основными направлениями достижения экономического эффекта в обогащении железной руды является увеличение производительности технологических агрегатов и повышение качества получаемого продукта, что требует комплексной автоматизации обогатительных процессов. Управление обогатительным комплексом требует значительных затрат – дорогостоящего измерительного оборудования и значительных вычислительных мощностей. Кроме того, процесс обогащения железной руды целесообразно рассматривать как распределенную систему, состоящую из отдельных технологических процессов с отдельными системами управления, связанными между собой и влияющими друг на друга. Рассматривая гидроциклон одной, отдельно взятой, второй стадии измельчения можно значительно упростить вычисления и рассмотреть возможные реакции. Таким образом, встает вопрос разработки системы управления, которая учитывала бы рассмотренные аспекты. Решение задачи разработки такой системы управления обуславливает актуальность данной работы. Ее целью является разработка системы управления гидроциклоном второй стадии измельчения с учетом его позиции в иерархии общей системы. Обусловлены основные параметры, влияющие на работу гидроциклона в комплексе с зумпфом и возможные управляющие воздействия. Рассмотрены основ-



ные способы управления технологическим комплексом зумпф-гидроциклон. Разработана система управления рассмотренным технологическим комплексом при детерминированных параметрах. Указаны направления дальнейших исследований – использование современных интеллектуальных средств автоматизации и усовершенствование распределенного управления комплексом обогащения железной руды.

**Ключевые слова:** гидроциклон, зумпф, система управления, мельница, обогащение, распределенные системы, плотность, производительность

**Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями.** В условиях конкурентного рынка основным направлением развития производства есть снижение себестоимости продукции. Она достигается с помощью комплексной оптимизации производственных процессов на основе внедрения инновационных технологий. Существующий мировой опыт свидетельствует, что повышение уровня автоматизации технологических процессов – основное направление в решении вопроса ресурсоэффективности.

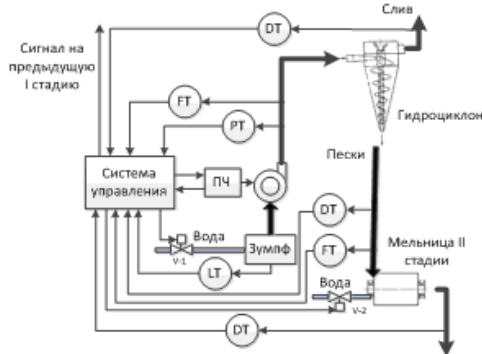
**Анализ исследований и публикаций.** С ростом количества управляемых механизмов и датчиков, усложнением алгоритмов управления более эффективным становится применение распределенных систем. Обогащительный процесс является достаточно сложным и трудоемким, если рассматривать его с точки зрения автоматизированного управления, и это обуславливает необходимость децентрализации управления и декомпозиции при анализе в смысле системного подхода по отношению к общей технологической задаче всех стадий. Данный подход позволит достигнуть большего быстродействия, благодаря распределению задач между параллельно работающим оборудованием, большую устойчивость к сбоям и более простую реконфигурацию, и модернизацию системы в будущем [1,2].

При эффективной работе системы автоматического управления гидроциклоном оптимизируются качественные и количественные параметры потоков со снижением себестоимости концентрата в целом. Регулирование гидроциклона направлено на достижение двух целей: количественной (продуктивность по готовому продукту) и качественной (эффективность разделения и гранулометрический состав).

**Постановка задачи.** По технологическим требованиям к гидроциклонам требуется постоянное регулирование количества твердого в пульпе при помощи подачи технологической воды в зумпф. Из-за постепенного изменения концентрации твердой фазы, неопределенного изменения гранулометрического состава и минералогических свойств сырья происходит колебание свойств пульпы. Это колебание обуславливает изменять давление подачи пульпы в гидроциклон. Изменения этого давления производится при помощи частотно-регулируемого привода насоса [3].

**Изложение материала и результаты.** Ранее [4] была рассмотрена система управления процессом обогащения на основе применения средств нечеткой логики. Рассмотрим отдельно процессы разделения в гидроциклоне второй стадии.

В технологических схемах обогащательных фабрик, во второй стадии, обычно применяют несколько гидроциклонов (каждый со своим приводом). Мы будем считать, что остальные гидроциклоны загружаются полностью согласно проектным нормам, и колебание производительности стадии происходит только в пределах производительности одного гидроциклона. Схема управления представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема управления гидроциклоном во второй стадии обогащения

Система управления включает в себя датчики плотности  $DT$ , измеряющие плотности слива и песков  $\rho_{сл}$  и  $\rho_{п}$ ; датчик уровня  $LT$ , измеряющий высоту уровня пульпы в зумпфе гидроциклона  $h$ ; расходомеры  $FT$ , отражающие производительности по пескам и по сливу ( $Q_{п}$  и  $Q_{сл}$ ) и манометр  $PT$  для измерения напора насоса гидроциклона  $P$ . Также с помощью преобразователя частоты ( $ПЧ$ ) отдельно обрабатываются данные о скорости вращения двигателя насоса.

На основе собранных данных система управления рассчитывает значение управляющего воздействия. Управление осуществляется добавлением воды в зумпф, при необходимости, и

регулированием скорости вращения двигателя насоса гидроциклона с помощью преобразователя частоты.

Основой управления является поддержание соотношения производительностей по сливу и по пескам на определенном уровне. Это выражается критерием

$$K = Q_{\text{сл}}/Q_{\text{п}}; \rho_{\text{сл}} \leq \rho_{\text{сл.н}}; \rho_{\text{п}} \geq \rho_{\text{п.н}} \quad (1)$$

Поддержание этого критерия на оптимальном уровне обеспечивает требуемое разделение в гидроциклоне. Известно [5,6], что на эффективность разделения при постоянстве остальных параметров влияет скорость подачи материала в гидроциклон. Сама же скорость подачи напрямую зависит от напора насоса  $P$ . Зависимости общей производительности гидроциклона и выхода песков от напора насоса гидроциклона показаны они на рисунке 2.  $K_{\text{п}}$  – расчетный коэффициент выхода твердого в пески (% или доли ед.).

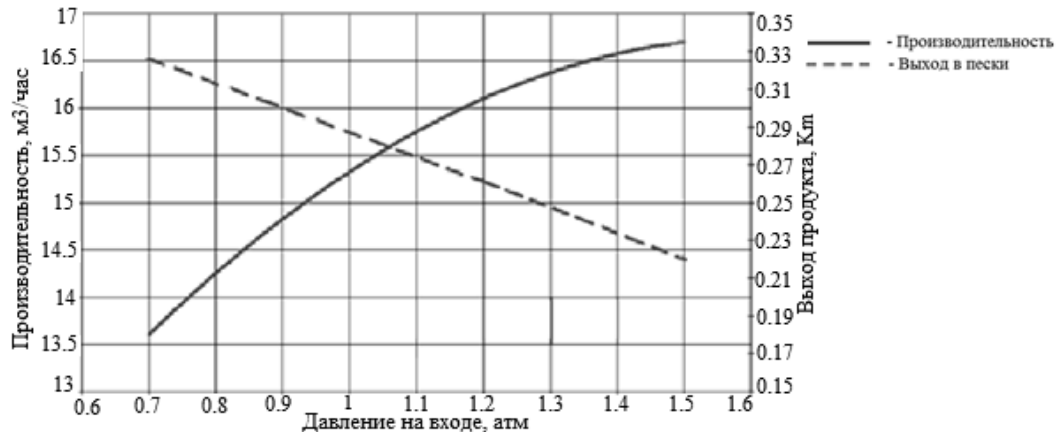


Рис. 2. Зависимость производительности и выхода песков от давления на входе

Из графиков видно, что с ростом мощности насоса возрастает также производительность и при оптимальном режиме мощности насоса продуктивность достигает пика, но при дальнейшем увеличении скорости вращения насоса его мощность будет возрастать, и пульпа на вход гидроциклона будет подаваться с еще большим давлением, что негативно отразится на эффективности разделения. При слишком высоком давлении на входе, начальная скорость движения частиц в гидроциклоне будет слишком высокой, что повлияет на движение пульпы – изменится диаметр воздушного столба, песковая насадка будет забиваться шламом, а в слив же не будет уходить почти ничего [7].

Таким образом, следует поддерживать напор насоса в некотором оптимальном диапазоне. Но также необходимо учитывать уровень пульпы в зумпфе гидроциклона. Он не должен быть выше допустимого, но также он не должен быть слишком низким, так как в таком случае насос «захлебнется» и возможен срыв работы гидроциклона. Поэтому, кроме регулирования скорости вращения двигателя насоса, необходимо также поддерживать уровень пульпы в зумпфе. С этой целью регулируется количество добавочной воды  $Q_{\text{в}}$  через клапан  $V-1$ . Также с помощью клапана  $V-2$  регулируется подача дополнительной воды в мельницу.



Рис. 3. Алгоритмическая структурная схема системы управления при детерминированных параметрах

При управлении с детерминированными параметрами, требуемые управляющие воздействия рассчитываются с помощью формул. Для объемной производительности гидроциклона часто применяют зависимость Поварова:

$$Q = 5K_d K_\alpha d_{\text{num}} d_{\text{cl}} \sqrt{gP}, \quad (2)$$

где  $K_d K_\alpha$  – табличные коэффициенты, зависящие от диаметра и угла конусности гидроциклона;  $K_d K_\alpha$  – диаметры питательной и сливной насадки;  $g$  – ускорение свободного падения;  $P$  – давление на входе.

Данный подход позволяет получить лишь приблизительные средние значения, так как большинство параметров применяет усреднено и не учитывает динамику работы гидроциклона как технологического механизма. Потому более целесообразным будет использование современных эмпирических методов интеллектуальных средств, которые позволят измерить производительность с учетом ее изменений во времени.

При исследовании песков гидроциклонов нового поколения, используют зависимость производительности по пескам [8]

$$Q_n = Q \frac{\gamma_n C_{me} + 100 \delta_\epsilon C_\epsilon}{360 \rho_{me} C_{me}}, \quad (3)$$

где  $Q$  – производительность по твердому,  $\rho_{me}$  – плотность твердого,  $C_{me}, C_\epsilon$  – объемное содержание твердого и воды в питании;  $\gamma_n$  – выход песков, %;  $\epsilon_\epsilon$  – извлечение воды в пески.

Большинство указанных параметров задается таблично на основе эмпирических знаний. Таким образом, учитывается давление на входе гидроциклона и влияние его на желаемый результат. Но, как и предыдущая формула, данный подход не дает возможности контроля динамических изменений. Кроме того, некоторые параметры тяжело поддаются измерению и требуют внедрения в систему дорогостоящих датчиков. Это обуславливает необходимость выведения новых зависимостей и их использования в интеллектуальных системах. Уровень пульпы в зумпфе контролируется при помощи поплавковых и радиологических датчиков уровня.

Предложенная система управления состоит из нескольких взаимосвязанных контуров, показанных на рис. 3. В контуре регулирования расхода пульпы, подающейся через двигатель в гидроциклон ( $F_{\text{дв}}$ ) подается задающее воздействие  $U_{F_{\text{дв}}}$  и, с учетом отрицательной обратной связи (блок «ОС расход дв.»), поступает на регулятор  $P_{\text{дв}}$ . Далее воздействие подается на преобразователь частоты (ПЧ), двигатель (Д) и насос (Н). База нечетких правил находится в блоке «f» и именно она определяет реакцию на величину расхода входного материала через двигатель и регулирует расход песков (F гц.) через гидроциклон (ГЦ). Данный контур регулирования тесно связан с контуром регулирования расхода пульпы, имеет свои обратную связь и регулятор. Учитывая, что пульпа может засорить пульпопровод (засохнуть при аварийном отключении, например), диаметр его проходной части может уменьшиться и для поддержания нужного напора, придется увеличить скорость вращения двигателя. Это реализовано контуром длительной коррекции через обратную связь «ОС коррекции». При регулировании плотности песков  $\rho$  учитывается требование к конечному продукту. Если требуется качество, то производительность пульпы с предыдущей стадии ( $Q_{1 \text{ стадии}}$ ) считается постоянной и управление происходит через контур регулирования добавочной воды.  $Q_{1 \text{ стадии}} = \text{const}, \text{mo } \rho = f(Q_w)$ . Если же в

приоритете количество продукта, то количество добавочной воды считается постоянным и в расчет берется производительность предыдущей стадии.  $Q_w = \text{const}, \text{mo } \rho = f(Q_{1 \text{ стадии}})$ . Вы-

бор метода регулирования производит логическое устройство.

На скорость подачи пульпы в гидроциклон также существенно влияет форма питающей насадки и угол, под которым она подает материал в механизм [9] и есть модели гидроциклонов, позволяющие регулировать этот угол. Таким образом, совместив эти способы регулирования скорости подачи материала в гидроциклон, можно добиться оптимальных результатов. Чрезмерное повышение производительности насоса гидроциклона (которое влечет за собой повы-

шенное потребление электроэнергии) можно компенсировать изменением угла наклона питающей насадки и наоборот. Существуют конструкции гидроциклонов, имеющие регулируемые или сменные песковые насадки различных размеров. С их помощью можно контролировать плотность и крупность песков и, таким образом, влиять на эффективность разделения. В горнорудной промышленности они не нашли широкого применения из-за высокой абразивности твердых железорудных пород [10].

**Выводы и направления дальнейших исследований.** Полученные результаты позволяют сказать, что рассмотрение обогатительного комплекса как децентрализованной системы, состоящей из отдельных технологических механизмов с собственными системами управления, дает возможность более эффективно управлять процессом в целом, экономя время и вычислительные ресурсы. Для более эффективного управления гидроциклоном второй стадии измельчения следует более подробно рассмотреть вопрос связи с объектами предыдущих и последующих стадий и применить современные интеллектуальные средства автоматизации.

#### Список литературы

1. Савицький О.І. Управління багатостадійним збагаченням магнетитових руд за умов неповної інформації / О.І. Савицький, В.П. Корж, С.Л. Цвіркун // Науково-дослідницький і проектний інститут «МЕХАНОБРЧЕРМЕТ». Новое в технологии и технике переработки минерального сырья. Збірник наукових праць. – Кривий Ріг – 2011, С.126-135
2. Bass L. Contribution to the theory of grinding processes / L. Bass, Z. Angew / Math. Phys. – 1954 – no 5. – pp. 283–292.
3. Ragot J. Transient study of a closed grinding circuit / [Ragot J., Roesch M., Degoul P., Berube Y.] — 2-nd IFAC Symp. "Automat. Mining, Miner. and Metal. Proc." – Pretoria. – 1977.- P. 129-142.
4. Morkun V. Optimization of the second and third stages of grinding based on fuzzy control algorithms / V. Morkun, O. Savytskyi, M. Tymoshenko. // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – №8. – P. 22–25.
5. Поваров А.И. Гидроциклоны на обогатительных фабриках. М., «Недра», 1978, 232 с.
6. Grainger-Allen T. J. N. Bubble generation in froth flotation machines – Trans. Inst. Mining Met., 1970, vol. 79, p. 15-2
7. Liudmyla Yefimenko, Mykhailo Tykhanskyi. Information systems in the technological processes automatic control development by technical condition criterion. Metallurgical and Mining Industry, 2015, No1, p.p. 28 – 31.
8. Торопов О.А. Расчет параметров гидроциклонов нового поколения / О.А. Торопов // Горный журнал. – 2008. – №6. – С. 105-108.
9. Schubert. H. Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe. – Leipzig, 1967, Bd. 11, p. 472.
10. Моркун В. С. Энергоэффективное автоматизированное управление процессом обогащения руды с распознаванием ее технологических разновидностей / В. С. Моркун, В. В. Тронь, С. А. Гончаров, Н. С. Подгородецкий. – Кривой Рог, 2014. – 326 с.

Рукопись поступила в редакцию 07.04.16

УДК 65.011.56: 622.7.01

В.С. МОРКУН, д-р техн. наук, проф.,  
Н.В. МОРКУН, В. В. ТРОНЬ, кандидаты техн. наук, доц.,  
Криворожский национальный университет

### ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ ОБОГАТИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ ЯДЕРНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВОЛЬТЕРРА-ЛАГЕРРА

В статье приведены результаты исследования методов идентификации нелинейных объектов управления обогатительного производства на основе ядерного преобразования Вольтерра-Лагерра в условиях нестабильности характеристик поступающего на переработку железорудного сырья. Рассмотрены методы определения коэффициентов Лагерра при формировании модели процессов переработки железорудного сырья.

**Ключевые слова:** автоматизация, обогащение руд, модель Вольтерра-Лагерра

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** В условиях роста цен на энергетические ресурсы важнейшим вопросом управления горнорудными предприятиями становится снижение себестоимости и энергоемкости технологических процессов добычи и переработки сырья. Одним из крупнейших потребителей энергии на предприятиях данного типа является рудообогатительная фабрики, на долю которой приходится более 20 % расходуемой

предприятием энергии. А по расходу электроэнергии доля фабрики составляет 44 %. Среди факторов, влияющих на расход электроэнергии, следует выделить нестабильность характеристик рудного материала, поступающего на обогащательную фабрику, что усложняет поддержание в технологической линии оптимальных режимных параметров. Решение данной задачи неразрывно связано с совершенствованием систем автоматического управления технологическими процессами обогащения с применением современных моделей, критериев и методов управления.

**Анализ исследований и публикаций.** Различным аспектам идентификации нелинейных объектов управления в условиях обогащательного производства посвящено значительное количество работ, в частности [1-6]. В общем виде описание процесса переработки железорудного сырья осуществляют на основе дифференциальных уравнений в частных производных. Для того, чтобы учесть пространственное распределение и изменчивость во времени характеристик рудного материала обозначим пространственно-временную переменную  $\beta(\xi, x, t)$ , описывающую содержание железа в классах крупности перерабатываемого рудного сырья, распределенного по технологической линии обогащения. В соответствии с подходом, изложенным в [7], получим

$$\frac{\partial \beta(\xi, x, t)}{\partial t} = \theta_1 \frac{\partial^2 \beta(\xi, x, t)}{\partial x^2} + \theta_2 \frac{\partial \beta(\xi, x, t)}{\partial x} + f(\beta) + wb(x)u(t), \quad (1)$$

с граничными  $\beta(\xi, 0, t) = 0$  и начальными условиями  $\beta(\xi, x, 0) = \beta_0(\xi, x)$ . Вопросы пространственно-временной декомпозиции систем, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных первого и второго порядка, рассмотрены также в работах [8-10]. На основе принципа аппроксимации непрерывной функции с использованием ряда Фурье пространственно-временная переменная  $\beta(\xi, x, t)$  системы с распределенными параметрами может быть расширена рядом пространственных базисных функций  $\{\varphi_i(x)\}_{i=1}^{\infty}$ , следующим образом [11]

$$\beta(\xi, x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \varphi_i(x) \beta_i(\xi, t), \quad (2)$$

Модель, пригодную для практического использования, предложено формировать упорядочиванием множества базисных функций по возрастанию частоты и его ограничением первыми  $n$  функциями [12]

$$\beta_n(\xi, x, t) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(x) \beta_i(\xi, t), \quad (3)$$

В результате пространственно-временная переменная разделяется на множество пространственных базисных функций и соответствующую временную модель.

Основной задачей в данном случае является выбор оптимальных пространственных базисных функций и формирование конечномерной временной модели процесса переработки рудного материала, что позволит представить исходную систему уравнений в частных производных как конечномерную систему [7]. После чего посредством пространственно-временного синтеза необходимо восстановить пространственно-временную систему.

Для моделирования нелинейных систем с распределенными параметрами предложена пространственно-временная модель Вольтерра, которая включает стационарные ряды вида [13]

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g_1(\sigma) u(t - \sigma_1) d\sigma_1 + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_2(\sigma_1, \sigma_2) u(t - \sigma_1) u(t - \sigma_2) d\sigma_1 d\sigma_2 + \\ + \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} g_n(\sigma_1, \dots, \sigma_n) u(t - \sigma_1) \dots u(t - \sigma_n) d\sigma_1 \dots d\sigma_n \quad (4)$$

В случае, когда процессы обогащения железорудного сырья являются причинными и обладают затухающей памятью предложенная зависимость может быть представлена в виде [13]

$$y(t) = y_1(t) + y_2(t) + y_3(t) + \dots, \quad (5)$$

где  $y_n(t)$  – ядра Вольтерра  $n$ -го порядка:

$$y_n(t) = \sum_{j_1=1}^m \sum_{j_2=1}^m \dots \sum_{j_n=1}^m g_n(j_1, \dots, j_n) \prod_{k=1}^n u(t - k), \quad (6)$$

где  $g_n$  – оператор  $n$ -го порядка, содержащий  $m^n$  коэффициентов.

В работе [14,15] представлен метод уменьшения количества коэффициентов в представлении модели на основе ядер Вольтерра посредством использования ортонормированных функций Лагерра. Согласно теореме приведенной в [16] нелинейный объект управления может быть описан выражением

$$y = \sum_{i=1}^{\infty} \theta_i l_i(k), \quad (7)$$

и для любого положительного  $\varepsilon$  существует  $n$  такое, что

$$\int_0^{\infty} \left[ y(t) - \sum_{i=1}^n \theta_i l_i(k) \right]^2 dt < \varepsilon, \quad (8)$$

где  $\theta_i$  - коэффициенты Лагерра;  $\varepsilon$  - допустимая интегральная ошибка.

**Постановка задачи.** Задачей работы является исследование методов идентификации нелинейных объектов управления в условиях обогащательного производства на основе ядерного преобразования Вольтерра-Лагерра.

**Изложение материала и результаты.** Как объекты управления технологические агрегаты обогащательного производства могут быть представлены в виде некоторых операторов, преобразующих векторы входных переменных в векторы выходных параметров. Влияние на характеристики рудного материала оказывается в определенных точках технологической линии – стадиях. На  $k$ -й стадии технологического процесса,  $k=1, \bar{K}$ , осуществляется изменение характеристических функций заданного физического свойства: массовой доли  $\gamma_k(\xi)$  и содержания полезного компонента  $\beta_k(\xi)$ . Например, функции крупности  $\xi \equiv d$  характеризуют гранулометрический состав частиц рудного материала  $\gamma(d)$  и содержание полезного компонента в классах крупности  $\beta(d)$ . Для общности рассуждений обозначим характеристики исходного сырья технологической линии обогащения индексом 0:  $\gamma_0(\xi)$ ,  $\beta_0(\xi)$ . Таким образом, характеристики выходного продукта технологической линии будут иметь индекс последней технологической операции  $k=K$ :  $\gamma_K(\xi)$ ,  $\beta_K(\xi)$ .

Следует отметить значительное количество параметров технологического процесса обогащения железорудного сырья, что существенно усложняет синтез модели.

Например, в условиях РОФ параметры технологического процесса обогащения железорудного сырья по промпродукту контролировались в 16 точках начиная от питания исходной рудой: стадии классификации в гидроциклоне, стадии магнитной сепарации, стадии дешламации, стадия контрольной классификации. Параметры технологического процесса обогащения железорудного сырья по хвостам контролировались в 12 точках начиная от питания исходной рудой. На рис. 1 представлены распределенные по стадиям технологической характеристики перерабатываемой руды: содержание железа в промпродукте (рис.1а) и в хвостах (рис.1б)

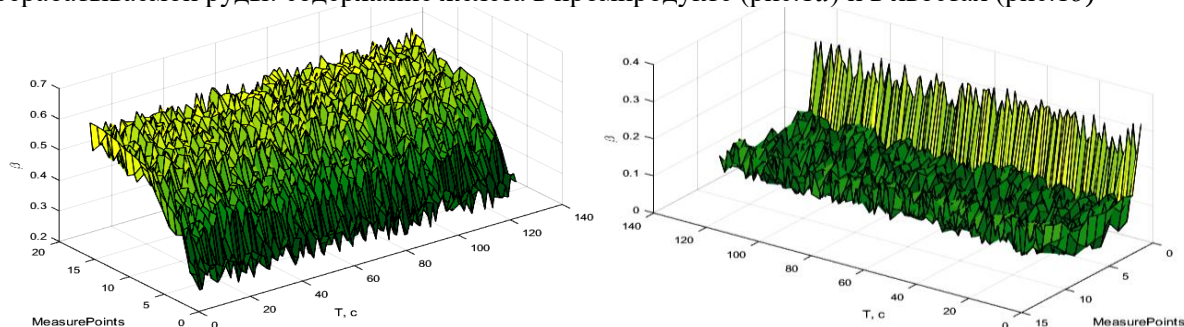


Рис 1. Распределенные по технологической линии обогащения характеристики перерабатываемой руды

Для формирования модели процессов переработки железорудного сырья использованы следующие методы определения коэффициентов Лагерра: корреляционный метод и метод наименьших квадратов. Корреляционный метод [13,15] предполагает, что входом является гауссов шум, и согласно ему вычисление коэффициентов осуществляется из выражения

$$\hat{\theta}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y(kT) l_i(kT). \quad (9)$$

Согласно второму подходу [13,16] коэффициенты вычисляют с использованием метода наименьших квадратов, а выход системы представляют в виде

$$Y = \Phi^T \theta + \Phi_u^T \theta_u + W, \quad (10)$$

где  $\Phi^T \theta$  - модель:  $\Phi^T = [\phi(T), \dots, \phi(nT)]$ ,  $\phi^T = [l_1(kt), \dots, l_n(kt)]$ ;  $\Phi_u^T \theta_u$  - разложение Лагерра для немоделлируемой динамики:  $\Phi_u^T = [\phi_u(T), \dots, \phi_u(nT)]$ ;  $W$  - воздействие случайного шума на процесс.

Следует отметить, что при нулевом математическом ожидании сигналов входа и возмущения второе и третье слагаемое стремятся к нулю. Оценку  $\theta$  по методу наименьших квадратов представляют таким образом

$$\hat{\theta} = [\Phi \Phi^T]^{-1} \Phi Y. \quad (11)$$

После подстановки модель Вольтерра-Лагерра примет вид

$$\tilde{y}(k) = \sum_{n=1}^N \sum_{j_1=1}^r \dots \sum_{j_n=1}^r \theta_n(j_1, \dots, j_n) \prod_{k=0}^n \sum_{i_k} l_{j_k}(i_k) u(k - i_k), \quad (12)$$

где  $n$  - порядок ряда Вольтерра;  $r$  - порядок приближения Лагерра;  $m$  - горизонт прогнозирования. Применительно к аппроксимации ядер Вольтерра первые два элемента разложения записывают следующим образом

$$y(t) = y_1(t) + y_2(t), \quad (13)$$

где

$$y_1(t) = \sum_{i=1}^p g_1(i) u(t-i); y_2(t) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p g_2(i, j) u(t-i) u(t-j), \quad (14)$$

где  $u_i(t)$  - ядро Вольтерра  $i$ -го порядка;  $g_i$  - оператор  $i$ -го порядка, содержащий  $p^i$  коэффициентов. Аппроксимация Лагерра для ядра Вольтерра второго порядка имеет вид

$$g_2(\tau_1, \tau_2) = L^T(\tau_1) D L(\tau_2), \quad (15)$$

где  $D = \{\theta_{ij} | i = \overline{1, r}, j = \overline{1, r}\}$ ,  $L^T(\tau) = \{l_i(\tau) | i = \overline{1, r}\}$

Таким образом, формула ядра Вольтерра второго порядка выглядит таким образом [13]

$$y_2(t) = \sum_{i_1=0}^p \sum_{i_2=0}^p u(t-i_1) u(t-i_2) L^T(t-i_1) D L(t-i_2). \quad (16)$$

При  $U^T = \{u(t), u(t-T), \dots, u(t-pT)\}$  и учитывая, что  $\Phi = \{l_{ij}(jT) | i = \overline{1, r}, j = \overline{1, p}\}$  выражения для ядра Вольтерра второго порядка с горизонтом прогнозирования в один интервал примет вид

$$y_2(t) = U^T \Phi D \Phi^T U. \quad (17)$$

Для идентификации модели Вольтерра-Лагерра второго порядка по данным входа-выхода вначале получены значения  $y_1(t)$  посредством линейной идентификации (рис. 2).

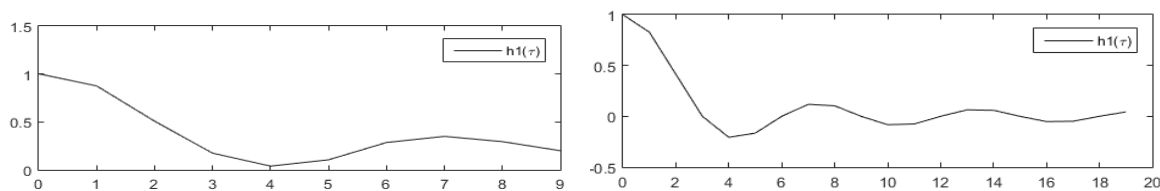


Рис. 2. Результаты идентификации ядер первого порядка

Затем разность  $y(t) - y_1(t)$  использована как исходные данные идентификации ряда второго порядка. С учетом изложенного выражения для  $y_2(t)$  найдено решение для матрицы  $D$ .

Задача идентификации представлена в виде [13]

$$\left\| \sum_{r=p}^{NS} y_2(t) - (\Phi^T U)^T D (\Phi^T U) \right\|_2 \rightarrow \min \quad (18)$$

где  $NS$  - количество точек в исходных данных «вход-выход». Полагая, что существует точное решение для  $y_2(t)$ , уравнение запишется

$$y_2(t) = (\Phi^T U)^T D (\Phi^T U) \quad (19)$$

Умножив обе части на  $(\Phi^T U)$  и решив относительно  $D$  получим решение для одной точки данных

$$D = \left[ (\Phi^T U) (\Phi^T U)^T \right]^{-1} (\Phi^T U) y_2(t) (\Phi^T U)^T \left[ (\Phi^T U) (\Phi^T U)^T \right]^{-1}. \quad (20)$$

Результаты идентификации ядер модели Вольтерра-Лагерра представлены на рис. 3.

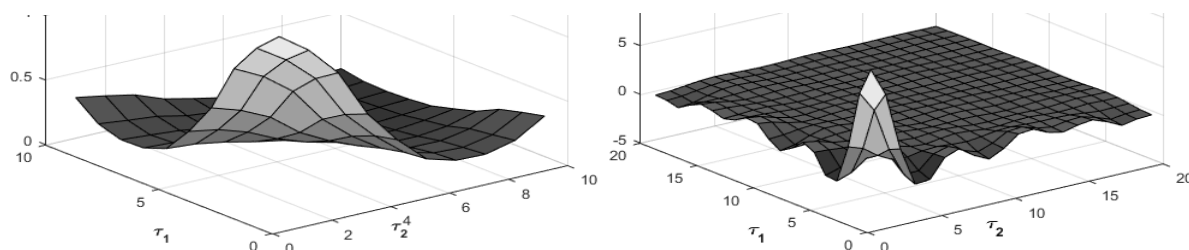


Рис. 3. Результаты идентификации ядер второго порядка

Для получения полного горизонта прогнозирования системы второго порядка применена нелинейная оптимизация.

Пример результата прогнозирования распределенных технологических показателей процессов обогащения представлены на рис. 4.

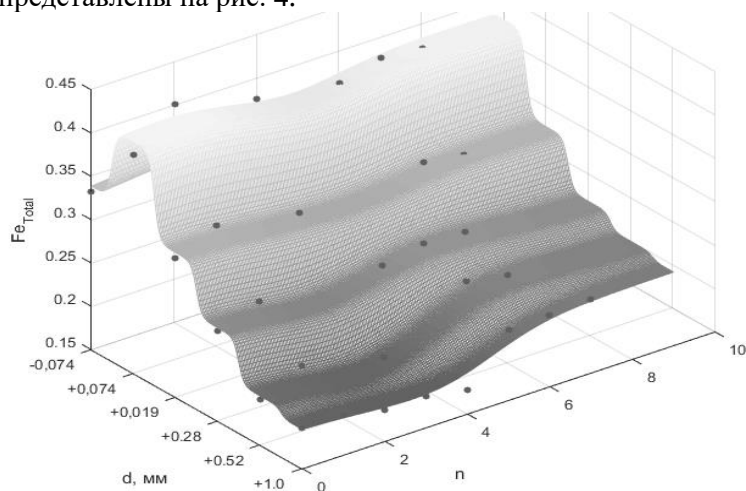


Рис. 4. Прогнозирование распределенного показателя содержания железа в классах крупности

Для поиска решения задачи нелинейной оптимизации были исследованы методы [17] нелинейной оптимизации с ограничениями: внутренней точки, итерационного квадратичного программирования, активных множеств.

В результате проведенного анализа был выбран метод активных множеств.

В частности, указанный метод показал лучшие результаты поиска оптимального решения при различных начальных условиях, в то время как другие исследуемые методы требовали дополнительных расчетов для определения начальных условий.

**Выводы и направления дальнейших исследований.** Анализ результатов исследования методов идентификации систем управления технологическими агрегатами обогатительного производства на основе непараметрических ядерных оценок показал целесообразность идентификации нелинейных объектов управления в условиях обогатительного производства на основе ядерного преобразования Вольтерра-Лагерра.

Дальнейшие исследования целесообразно проводить в области повышения точности и скорости сходимости рассмотренных методов идентификации.

#### Список литературы

1. Morkun V., Morkun N. and Tron V. (2015), "Formalization and frequency analysis of robust control of ore beneficiation technological processes under parametric uncertainty", Metallurgical and Mining Industry, Vol. 5, pp. 7-11.



2. **Morkun V., Morkun N. and Tron V.** (2015), "Distributed closed-loop control formation for technological line of iron ore raw materials beneficiation", *Metallurgical and Mining Industry*, Vol. 7, pp. 16-19.
3. **Поркун О.В.** Керування нелінійними динамічними об'єктами збагачувальних виробництв на основі гібридних моделей Гамерштейна: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец 05.13.07. – КТУ, Кривий Ріг, 2009. – 36 с.
4. **Купін А. І.** Узгоджене інтелектуальне керування стадіями технологічного процесу збагачення магнетитових кварцитів в умовах невизначеності: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец 05.13.07. – КТУ, Кривий Ріг, 2009. – 36 с.
5. **Моркун В. С.** Ультразвуковой контроль характеристик измельченных материалов в АСУ ТП обогащительного производства / В. С. Моркун, В. Н. Потапов, Н. В. Моркун, Н. С. Подгородецкий. – Кривой Рог: Изд. центр КТУ, 2007. – 283 с.
6. **Тронь В. В.** Энергоэффективное автоматизованное керування процесом збагачення руди з термографічним розпізнаванням її технологічних різновидів : дис. ... кандидата техн. наук : 05.13.07 / Тронь Віталій Валерійович. – Кривий Ріг, 2013. – 226 с.
7. **Han-Xiong Li, Chenkun Qi.** (2010), Modeling of distributed parameter systems for applications – A synthesized review from time-space separation, *Journal of Process Control*, No20, p.p. 891-901.
8. **P. Sooraksa, G. Chen,** (1998), Mathematical modeling and fuzzy control of a flexiblelink robot arm, *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 27 (6), pp. 73–93.
9. **M.A. Demetriou, F. Fahroo** (2006), Model reference adaptive control of structurally perturbed second-order distributed parameter systems, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, Vol. 16, pp. 773-799.
10. **S.O.R. Moheimani, H.R. Pota, I.R. Petersen** (1999), Spatial balanced model reduction for flexible structures, *Automatica*, 35 269–277.
11. **D.G. Zill, M.R. Cullen** (2001), *Differential Equations with Boundary-Value Problems*, 5th ed., Brooks/Cole Thomson Learning, Pacific Grove, CA; Australia.
12. **C.A.J. Fletcher** (1984), *Computational Galerkin Methods*, 1st ed., Springer, New York.
13. **Dale A. Smith.** Identification of nonlinear control models using Volterra-Laguerre series (2010), PhD dissertation, Department of Chemical Engineering, The University of Utah, USA.
14. **Dumont, G. A. and Ye Fu** (1993) Non-linear adaptive control via Laguerre expansion of Volterra kernels. *Int. J. of Adaptive Control and Signal Processing*, 7, 367-382.
15. **Zheng, Q., Zafiriou, E.,** (1995) Nonlinear system identification for control using Volterra-Laguerre expansion. Presented at American Control Conference.
16. **Dumont, G. A., Ye Fu, and A.L.Elshafei,** (1991) Functions in identification and adaptive control. *IFAC Int. Symp.*, Singapore, 193-198.
17. **Трифонов А. Г.** Постановка задачи оптимизации и численные методы ее решения / А. Г. Трифонов. - [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book 2/index.php>. Рукопись поступила в редакцию 18.04.16

УДК 681.513.54:622.788

Д.О.КЛИМЕНКО, магістрент, Криворізький національний університет

## АНАЛІЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ОБКОТИШІВ НА ФАБРИЦІ ОГРУДКУВАННЯ

У статті розглянуто актуальні питання ефективності термічної обробки залізорудних обкотишів на конвеєрних випалювальних машинах. Розглянуто існуючі підходи та методи автоматичного керування процесом термічної обробки обкотишів, на основі розглянутої інформації виділено основні переваги та недоліки представлених систем автоматичного керування. Виявлено, що способи та методи керування процесом термічної обробки обкотишів вивчені не повною мірою та знаходяться на стадії дослідження. На основі аналізу існуючих робіт, а також перспективних методів керування інерційними процесами, що характеризуються нестаціонарністю параметрів в часі, визначено напрямки подальших досліджень – розвиток методів адаптивного прогнозного керування процесом термічної обробки обкотишів в умовах коливань гранулометричного складу та порозності шару, зміни параметрів технологічного устаткування. Запропоновано варіант структури системи керування температурним режимом випалювання обкотишів для окремої газоповітряної камери конвеєрної випалювальної машини, де пропонується здійснювати оперативне оцінювання параметрів моделі процесу для подальшої адаптації параметрів прогнозного регулятора.

**Ключові слова:** огрудкування, конвеєрна випалювальна машина, термічна обробка обкотишів, адаптивне прогнозує керування, оперативне оцінювання параметрів

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** На фоні підвищення цін на енергоресурси гірничопромисловий комплекс України зіткнувся з проблемою високої у порівнянні з конкурентами собівартості продукції. Застаріле обладнання та низький рівень впровадження провідних енергоефективних рішень робить вітчизняний гірничопромисловий комплекс дуже вразливим до дії зовнішніх факторів, таких як коливання вартості енергоносіїв, попиту і цін на металургійну продукцію. Так, відомо, що найбільші гірничо-збагачувальні комбінати України, що входять до групи «МЕТІНВЕСТ», закінчили 2015 рік зі збитками [1]. У цих умовах особливо гостро постає завдання впровадження енергозберігаючих технологій. За даними [2], Україна має одні з найкращих можливостей зменшення питомих енерговитрат у гірничо-металургійному виробництві. Якщо розглядати процес огрудкування металургійної сировини на конвеєрних випалювальних машинах, в результаті якого отримуються залізородні обкотиші, то можливі шляхи зниження енерговитрат полягають у тому числі в удосконаленні методів та способів керування термічної обробкою обкотишів. Але, незважаючи на значну кількість досліджень та розробок, наявні системи автоматичного керування процесом не завжди дозволяють вирішувати завдання зниження енерговитрат, збільшення продуктивності фабрик огрудкування, підвищення якості готової продукції у зв'язку з дією ряду чинників, які вносять небажані збурення в процес. Тому дослідження, спрямовані на вирішення завдання оптимального керування процесом термічної обробки обкотишів є актуальними.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Для збільшення продуктивності, отримання високих показників якості обкотишів, зменшення питомої витрати енергоносіїв необхідно забезпечити бажаний розподіл температур уздовж випалювальної машини шляхом стабілізації температури в кожній газоповітряній камері [2, 5, 6, 11].

Функції забезпечення бажаного розподілу температур на існуючих випалювальних машинах найчастіше виконуються наступними локальними системами автоматичного керування (САК): САК температурою в зонах сушіння 1, 2; САК температурою в газоповітряних камерах зон підігріву та випалювання; САК температурним та газоповітряним режимом у зонах охолодження 1, 2; система автоматичної стабілізації тиску повітря горіння.

Крім того, на деяких випалювальних машинах реалізовано функції забезпечення відповідності між тепловим навантаженням та поточною продуктивністю випалювальної машини шляхом регулювання швидкості фільтрації теплоносія в зонах підігріву та випалювання (САК тепловим навантаженням у зоні випалювання).

Зокрема, у роботі [2] описано типову систему регулювання температури та розрідження в зоні сушіння 1, згідно з якою вимірювання температури у вакуум-камерах зони здійснюється термопарами, усереднене значення їх показів порівнюється із заданим, і розраховане відхилення надходить на регулятор, який керує витратою повітря-розріджувача.

Регулятор за допомогою виконавчого механізму керує дроселем таким чином, щоб, змінюючи кількість холодного повітря, яке використовується для розбавлення підігрітого газу із зон випалювання та рекуперації, підтримувати задану температуру теплоносія на вході в шар обкотишів.

Розрідження над шаром, виміряне датчиком тиску, встановленим у ковпаку зони, порівнюється з заданим і підтримується сталим за допомогою регулятора, який через виконавчий механізм керує положенням напрямного апарата [2].

Відомою є система автоматичного керування температурним режимом у зоні випалювання [2], яка підтримує задане значення температури в горні шляхом зміни витрати газу на пальники обох сторін за результатами вимірювання температури за допомогою двох термопар, встановлених у стінках горну з обох боків (рис. 1).

Одночасно здійснюється регулювання співвідношення «газ-повітря» для пальників обох сторін з метою найбільш ефективного спалювання палива [2, 5].

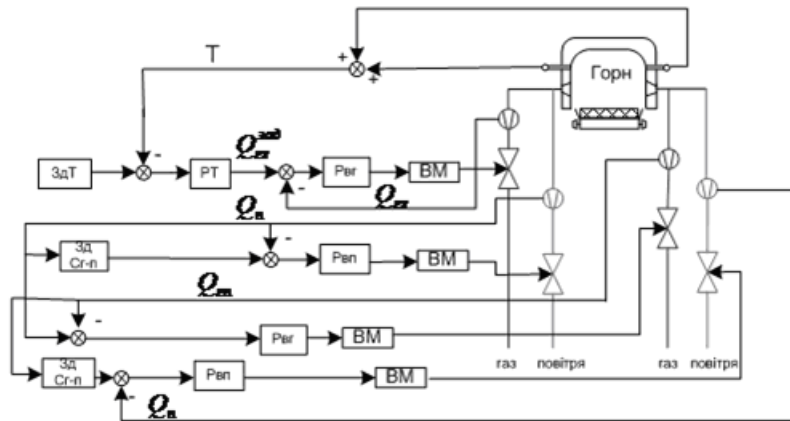


Рис. 1. Система регулювання температурою горна

Істотним недоліком описаних замкнутих систем стабілізації режимних параметрів процесу випалювання є їх значна інерційність, пов'язана з інерційністю об'єкта та існуванням запізнень у каналах керування та контролю. Крім того, під впливом зовнішніх збурень (коливання продуктивності за живленням, якісних характеристик сирих обкотишів, порозності шару) змінюються і внутрішні параметри об'єкта, що не дозволяє досягти високої точності підтримання параметрів температурного та газоповітряного режимів роботи випалювальної машини і, як наслідок, через порушення стабільності процесу призводить до зниження міцності обпалених обкотишів, скорочення терміну служби вогнетривкої футерівки та збільшення питомої витрати енергосиїв [2].

Хоча існує значна кількість робіт, присвячених питанням розробки систем автоматичного керування процесами термічної обробки обкотишів, фактично відсутні рішення, направлені на автоматичну оптимізацію процесу. Аналіз літературних джерел та обстеження деяких фабрик згрудкування Кривбасу показує, що при суттєвих змінах вхідних параметрів процесу налаштування на оптимальний за певним критерієм режим роботи випалювальної машини (максимізація продуктивності, мінімізація витрати палива) здійснюється, в основному, в ручному режимі на основі досвіду та інтуїції технологічного персоналу фабрики згрудкування.

У роботі [7] авторами запропоновано алгоритм мінімізації питомої витрати палива на основі моделі у вигляді системи диференціальних рівнянь тепло- й масообміну. Але, як зазначають самі автори, рішення такої системи доводиться виконувати ітераційними методами рішення рівнянь математичної фізики, що потребує великого обсягу обчислень, і час пошуку оптимальних значень керуючих дій може виявитися надто тривалим для застосування в режимі реального часу.

Автори роботи [7] також звертають увагу на перспективність використання для реалізації раціональних режимів термічної обробки обкотишів способу керування за допомогою таблиць рішень, складених на основі накопиченого й узагальненого досвіду ручного керування випалювальною машиною. У роботах [7,8] наведено таблицю рішень для максимізації продуктивності, що включає ситуації, які виникають у процесі керування статичним режимом роботи машини. Ситуація визначається тим, які з певних технологічних параметрів вийшли за границі допустимих меж і над якою вакуум-камерою знаходиться максимум температури на границі «шар – постіль». Кожній ситуації в таблиці відповідає рішення щодо зміни керуючих впливів. Досвід використання запропонованого способу керування свідчить, що для досягнення оптимального режиму роботи випалювальної машини достатньо 2-3 ітерацій [7]. Після реалізації оптимального режиму завдання керування процесом зводиться до стабілізації профілю температур у шарі при зовнішніх збуреннях. Недоліком розглянутого в [7] підходу є необхідність формалізації експертних знань, які в загальному випадку можуть бути суперечливими. Крім того, завдання складання таблиці рішень необхідно вирішувати для кожної конкретної машини окремо.

У роботах [9-11] запропоновано вдосконалити описану в [7] схему оптимізації процесу випалювання за рахунок використання нечітких регуляторів, що реалізують алгоритм нечіткого

логічного висновку та використовують набір правил продукції на основі таблиці рішень, складеної для досягнення певної мети керування (максимізація продуктивності, мінімізація витрати палива). Практичне використання запропонованого в роботах [9-11] підходу на базі методів нечіткого керування обмежується складністю налаштування параметрів функцій приналежності та правил нечіткого регулятора в процесі роботи системи на основі даних про стан об'єкта керування [12].

На основі проведеного аналізу літературних джерел та особливостей технологічного процесу з точки зору завдань автоматизації можна зробити висновок, що множина можливих стаціонарних режимів роботи випалювальної машини може бути подана у вигляді таких технологічних і економічних вимог керування [3]

$$Q = Q_{зад} = const, \quad \bar{\varphi}_{min} \leq \bar{\varphi} \leq \bar{\varphi}_{max}, \quad G_n = \min; \quad (1)$$

$$Q = \max, \quad \bar{\varphi}_{min} \leq \bar{\varphi} \leq \bar{\varphi}_{max}; \quad (2)$$

$$Q = \text{var}, \quad \bar{\varphi}_{min} \leq \bar{\varphi} \leq \bar{\varphi}_{max}, \quad (3)$$

де  $Q$  - продуктивність випалювальної машини;  $\bar{\varphi}$ ,  $\bar{\varphi}_{min}$ ,  $\bar{\varphi}_{max}$  - поточні та гранично-допустимі значення показників якості готових обкотишів;  $G_n$  - витрата енергоносіїв [3].

У нестаціонарних режимах основною технологічною вимогою можна вважати відсутність коливань у перехідних процесах (особливо параметрів газоповітряного режиму процесу випалювання), оскільки виникнення таких коливань призводить до тривалих порушень режиму роботи всієї машини [2, 11]. Для усунення можливих порушень необхідно здійснювати ефективну компенсацію діючих на процес збурень.

В умовах дії неконтрольованих збурень, під впливом яких змінюються параметри об'єкта, для досягнення екстремальних значень критеріїв якості функціонування випалювальних машин доцільно використовувати автоматизовані системи, в яких здійснюється адаптація моделі та алгоритму керування до змін параметрів об'єкта та зовнішніх впливів. В останні роки для вирішення подібних завдань широко застосовуються сучасні методи теорії автоматичного керування, зокрема інтелектуальні методи та технології (штучні нейронні мережі, нечітка логіка, генетичні алгоритми), методи синергетичного та робастного керування, керування з використанням прогнозуючих моделей (Model Predictive Control, MPC). Враховуючи особливості процесу термічної обробки залізрудних обкотишів (інерційність, нелінійність, нестаціонарність параметрів) та наявний позитивний досвід застосування методів MPC для керування схожими об'єктами, можна розглядати їх як альтернативу використанню класичних параметричних ПІ- та ПІД-регуляторів для стабілізації параметрів температурного режиму випалювання обкотишів. Так, у роботах [13] підтверджена ефективність застосування методів теорії керування на основі прогнозуючих моделей для вдосконалення систем автоматичного керування процесом термічної обробки обкотишів. У схемі нелінійного MPC-керування автор пропонує застосовувати модель процесу на базі системи ANFIS, що дозволяє періодично здійснювати адаптацію параметрів моделі в умовах дії на об'єкт параметричних та координатних збурень. Але такий підхід має і певні недоліки, пов'язані з необхідністю вирішення завдання нелінійного програмування, що призводить до суттєвого зростання обчислювального навантаження на засоби керування і потенційно може призводити до неприпустимого збільшення періоду дискретизації при формуванні сигналів керування об'єктом. Аналіз досвіду застосування методів керування з прогнозуючими моделями для автоматизації процесів керування інерційними об'єктами, що функціонують в умовах дії координатних та параметричних збурень [13] показує, що можливим рішенням при керуванні процесами термічної обробки обкотишів може бути застосування в схемі MPC спрощеної лінеаризованої моделі об'єкта з постійним оновленням коефіцієнтів моделі за рахунок використання процедур оперативного оцінювання параметрів. Один з можливих варіантів структури системи керування температурним режимом випалювання обкотишів для окремої газоповітряної камери конвеєрної випалювальної машини при використанні описаного підходу зображено на рис. 2.

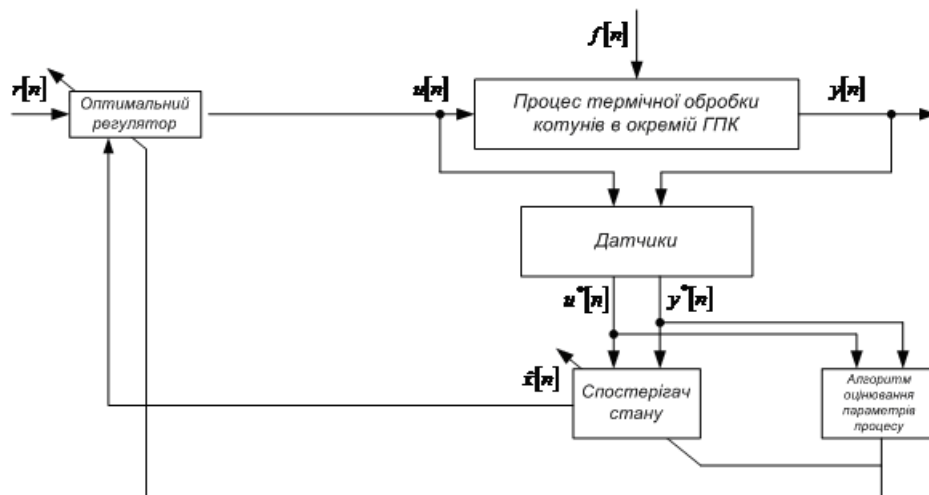


Рис. 2. Структурна схема системи адаптивного прогнозного керування процесом термічної обробки обкотишів з оперативним оцінюванням параметрів процесу

На основі вимірних значень керуючих дій (витрат газу та повітря з обох сторін машини) та вихідної величини (температури у газоповітряній камері) алгоритм оцінювання визначає точні значення параметрів моделі процесу. Це забезпечує адаптацію параметрів спостерігача стану, що використовується для відновлення неконтрольованих змінних стану системи. У відповідності з принципами МРС-керування, оптимальний регулятор розраховує програму змінення керуючої дії, що мінімізує обраний функціонал якості керування на інтервалі прогнозування. Розраховане програмне керування видається у якості сигналу завдання контурам регулювання витрати газу та повітря на інтервал керування (зазвичай менший, ніж інтервал прогнозування), після чого відповідні дії повторюються спочатку.

**Висновки на напрямки подальших досліджень.** Численні дослідження, спрямовані на розробку способів та методів керування процесом термічної обробки залізничних обкотишів на конвеєрній випалювальній машині, спрямованих на інтенсифікацію процесу (збільшення продуктивності, зниження питомих енерговитрат) без зниження якості кінцевої продукції, не призвели до створення ефективних систем автоматичного керування. Причини полягають у характерних особливостях процесу, що ускладнюють формалізацію завдань оптимізації процесу за різними критеріями та в умовах зміни параметрів технологічного устаткування, викликаних коливаннями гранулометричного складу та порозності шару на візках випалювальної машини. Виконаний аналіз літературних джерел показав, що можливим шляхом подолання зазначених недоліків може бути застосування сучасних методів адаптивного прогнозного керування. Показано, що Методологія вдосконалення систем керування процесом термічної обробки обкотишів на КВМ повинна ґрунтуватися на поєднанні алгоритмів керування з прогнозуючими моделями та алгоритмів оперативного оцінювання параметрів для адаптації параметрів моделі процесу та параметрів прогнозного регулятора. Запропоновано варіант структури системи керування температурним режимом випалювання обкотишів для окремої газоповітряної камери конвеєрної випалювальної машини, що реалізує описаний підхід. Напрямами подальших досліджень є порівняння ефективності різних методів оперативного оцінювання параметрів об'єкту для умов процесу термічної обробки обкотишів для моделей різних класів.

#### Список літератури

1. **Carvalho A.** Challenges & opportunities for the steel industry in moving towards green growth //OECD Green Growth Workshop, Seoul, 4 March 2010, 16 p.
2. **Гончаров Ю.Г.** Автоматизация процессов окискования железных руд / **Ю.Г. Гончаров, А.В. Дримбо, А.Д. Ищенко.** – М. : Металлургия, 1983. – 190 с.
3. **Юсфин Ю.С.** Обжиг железорудных окатышей / **Ю.С. Юсфин, Т.Н. Базилевич.** – М. : Металлургия, 1973. – 272 с.
4. **Полищук А. П.** Исследование и разработка систем автоматического контроля и регулирования процесса обжига железорудных окатышей на конвейерной машине : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07 / **Александр Павлович Полищук.** – Днепропетровск, 1970. – 124 с.

5. Ксендзовский В.Р. Автоматизация процесса производства окатышей / В.Р. Ксендзовский. – М. : Металлургия, 1971. – 216 с.
6. Автоматизация фабрик окускования железных руд и концентратов / Н.В. Федоровский, В.В. Даньшин, В.И. Губанов, Р.И. Сигуа. – М. : Металлургия, 1986. – 200 с.
7. Математическое обеспечение АСУ ТП производства железорудных окатышей на конвейерных машинах / А.П. Буткарев, Г.М. Майзель, Е.В. Некрасова [и др.] // Сталь. – 1995. – № 4. – С. 67–75.
8. Глишков Г.М. АСУ ТП в черной металлургии : учебник для вузов / Г.М. Глишков, В.А. Маковский. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1999. – 310 с.
9. Повышение эффективности АСУ горно-металлургического производства на основе интеллектуализации управления : монография / Ю.И. Еременко, Л.М. Боева, Л.А. Кузнецов, В.Б. Крахт. – Старый Оскол : ООО «ТНТ», 2005. – 408 с.
10. Еременко Ю.И. О применении нечеткого логического контроллера в управлении процессом обжига окисленных окатышей / Ю.И. Еременко // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2003. – № 9. – С. 39–43.
11. Рубан С.А. Использование нечетких регуляторов для автоматизации технологического процесса обжига на конвейерных обжигочных машинах / С.А. Рубан, В.И. Лобов // Разработка рудных месторождений. – 2007. – № 91. – С. 188–193.
12. Поркуян О.В. Керування нелінійними динамічними об'єктами збагачувальних виробництв на основі гібридних моделей Гамерштейна : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.07 / Ольга Вікторівна Поркуян. – Кривий Ріг, 2009. – 379 с.
13. Рубан С.А. Автоматизація процесу керування термічною обробкою залізорудних обкотишів з використанням прогнозуючих ANFIS-моделей: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07 / С. А. Рубан ; Криворізьк. техн. ун-т. - Кривий Ріг, 2011. — 20 с.

Рукопис подано до редакції 04.04.16

УДК 681.513.6:621.69

К.А. ОХОТА, магістрант, Криворізький національний університет

## АДАПТИВНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОДУКТИВНІСТЮ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ ПОДАЧІ ВОДИ НА ЗБАГАЧУВАЛЬНУ ФАБРИКУ

У статті розглянуто актуальні питання ефективності процесу подачі води на збагачувальну фабрику. Коротко описаний технологічний процес подачі води в трубопровід. Обґрунтовано питання продуктивності адаптивної системи керування насосною станцією подачі води, та вимоги до неї, проведена аналогія між існуючими системами. Розглянуто приклади САР насосних станцій, визначено їх переваги та недоліки, проаналізовано якість та продуктивність автоматизованих систем насосних станцій. Розроблено та проаналізовано систему керування насосною станцією на базі нечіткої логіки, приведено її переваги та недоліки. Описано спосіб керування, виведені формули адаптації.

Таким чином, вказано напрямок подальших досліджень – розвиток автоматичних систем керування продуктивністю насосної станції, вирахувавши об'єм води необхідний кожній секції.

**Ключові слова:** адаптивний, система керування, продуктивність, надійність, стабілізація

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Для ліквідації скидання стічних вод у водойми, а також з метою економії флотаційних реагентів для всіх підприємств проєктуються замкнуті системи водопостачання. Пульпа (хвости збагачувальних фабрик, або промислові стічні води) за допомогою насосів по трубопроводах перекачується в хвостосховища, де вся суспензія осідає. Освітлена в ставках-відстійниках вода надходить в насосні станції оборотної води, звідки її подають на збагачувальні фабрики для повторного використання [2].

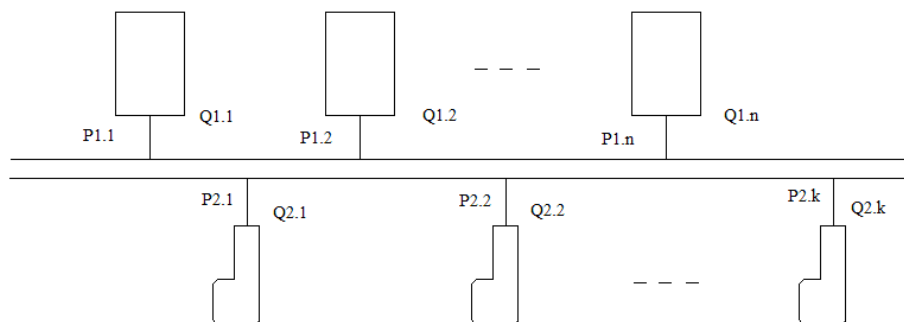


Рис. 1. Схема насосної станції на збагачувальній станції

де  $Q$  - витрати води,  $P$  - тиск,  $n$  - станції,  $k$  - насоси.

Автоматизація виробничих установок дозволяє більш швидко і точно відтворювати технологічний процес. При повній автоматизації процесу не потрібно постійної участі людини, йому залишається роль спостерігача і корегувальника. На даний момент доцільно автоматизувати виробничі установки за допомогою мікропроцесорних систем (програмованих контролерів), які дозволяють замінити жорстку логіку на програмне управління, підвищити надійність і гнучкість системи управління.

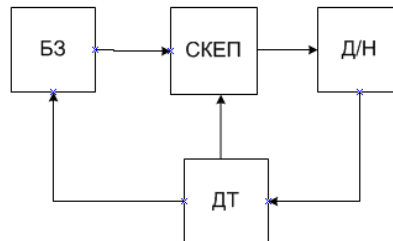


Рис.2. Спрощена автоматизована система керування насосом

де БЗ - блок завдання, СКЕП - система керування електроприводом, Д/Н - двигун та відцентровий насос, ДТ - датчик тиску.

Одним із способів підвищення ефективності роботи насосної станції, що в подальшому вплине на завантаженість секцій на збагачувальній фабриці, є автоматизація насосних станцій.

На насосних станціях автоматизуються: пуск і зупинка насосних агрегатів і допоміжних насосних установок; контроль і підтримка заданих параметрів (наприклад, рівня води, подачі, напору і т.ін.); прийом імпульсів параметрів і передача сигналів на диспетчерський пункт.

Вимоги до системи автоматизації насосні установки

Визначимо вимоги до автоматизованої системи управління:

плавний пуск насосного агрегату і розгін до заданої швидкості;

визначення необхідного напору в залежності від поточної витрати;

стабілізація необхідного напору рідини в системі за рахунок регулювання швидкості обертання електродвигуна;

включення і відключення резервного насоса в залежності від необхідної витрати;

введення в дію резервного насоса в разі аварії робочого;

автоматичний розгін насосного агрегату після зникнення напруги живлення (автоматичне повторне включення);

захист від теплових перевантажень приводних двигунів насосних агрегатів;

періодична зміна основного насосного агрегату, стабілізуючого подачу рідини в систему.

система управління повинна забезпечувати контроль мінімального, максимального і аварійного витрати.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Розглянемо приклади автоматизації насосних установок. На рис. 3а показано схему автоматизації найпростішої насосної установки - дренажного насоса 1а на рис. 3б наведено електричну схему цієї установки. Автоматизація насосної установки здійснюється за допомогою поплавкового реле рівня. Ключ управління КУ має два положення: для ручного та автоматичного керування.

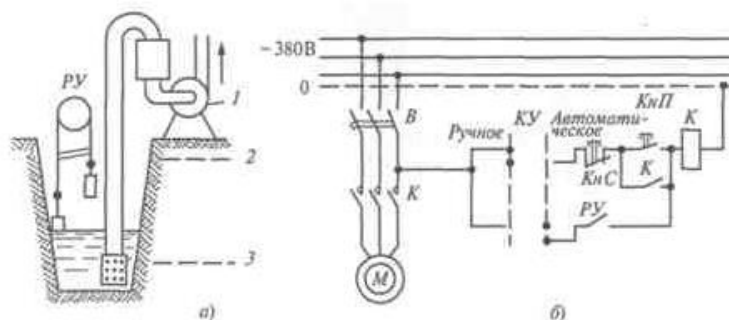


Рис.3. Конструкція дренажної насосної установки а і її електрична схема автоматизації б [6]

На рис. 4 наведена схема автоматизації насосної установки, яка містить електронасосний агрегат 7 вантажного типу, розміщений в свердловині 6. У напірному трубопроводі встановлено зворотний клапан 5 і витратомір 4.

Насосна установка має напірний бак 1 (водонапірна вежа) і датчики тиску (або рівня) 2, 3, причому датчик 2 реагує на верхній тиск (рівень) в баку, а датчик 3 - на нижній тиск (рівень) в баку. Управління насосною станцією забезпечує блок управління 8.

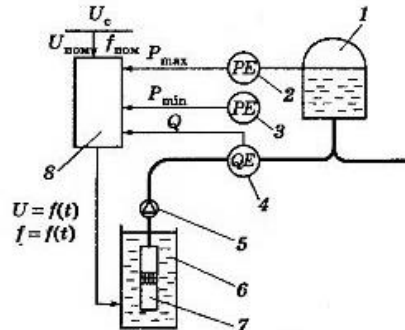


Рис. 4. Схема автоматизації насосної установки

Режим роботи насоса і перетворювач частоти забезпечують виконання таких функцій:  
 плавний пуск і зупинка насоса;  
 автоматичне керування за рівнем або тиску;  
 захист від «сухого ходу»;  
 автоматичне відключення електронасоса при неповнофазному режимі, неприпустимому зниженні напруги, при аварії у водопровідній мережі;  
 захист від перенапруг на вході перетворювача частоти А1;  
 сигналізацію про включення і вимкнення насоса, а також про аварійних режимах;  
 обігрів шафи управління при негативних температурах в приміщенні насосної.  
 Плавний пуск і плавне гальмування насоса здійснюють за допомогою перетворювача частоти А1 типу FR-E-5,5к-540ЕС[6].

Недоліками цих насосних установок є те, що в жодній із них не враховуються витрати використаної рідини, врахувавши цей параметр, можна істотно зменшити витрати електроенергії та тиск на водопровідні труби. Питання про те, як обробляти нечіткості, переплітається з питанням про те, яким чином ввести в науку і техніку суб'єктивізм людини. І тут не обійтися без нечітких множин. Це математичний метод, створений для того, щоб представляти смислові нечіткості слів людини, його унікальний метод з точки зору надання можливостей математично обробляти суб'єктивні дані. Нечітке адаптивне управління-це метод управління, який дозволяє пристосуватися до змін параметрів обладнання шляхом зміни алгоритму управління. Значний ефект можна отримати в тому випадку, коли характеристики устаткування, наприклад коефіцієнт підсилення процесу і час простою, змінюються в залежності від робочого стану або коли необхідно узгодити в залежності від ситуації кілька цілей управління [7].

**Постановка завдання.** Метою роботи є обґрунтування доцільності використання системи автоматичного керування насосною станцією та розробка системи на базі нечіткої логіки. Кількість води в секціях впливає на якість збагачення, так як впливає та технологічний процес. Експлуатація системи автоматичного регулювання подачі води на станцію збагачувальної фабрики суттєво впливає на економію виробництва[10].

**Викладення матеріалу та результати.** На секціях збагачувальної фабрики можна поставити датчики витрат і таким чином, знаючи кількість витрат керувати подачею води на трубопровід, але для насосних станцій збагачувальних фабрик це незручно та не економічно, тому ми будемо подавати воду, підсумовуючи витрати води секцій та враховуючи технологічну карту кожної секції, таким чином, можна описати правила нечіткого регулятора.

$e'' < e_1 < e'$  збільшення на 5В

$e''_1 < e_1 < e'$  збільшення на 7В

$e'' < e_1 < e'$  зменшення на 5В



$$e''_1 < e_1 < e' \quad \text{зменшення на } 7B$$

де  $e''$  - різниця попереднього вимірювання;  $e'$  - різниця дійсна,  $e_1$  - різниця між попередньою та дійсною.

У блоці нечіткої системи три входи та один вихід, на входи подають різницю витрат у трубопроводі, значення подачі води у трубопроводі та суму різниць дійсних витрат на секціях і значення завдання. Блок нечіткої логіки відповідно вносить корективи в регуляторі, а саме міняється коефіцієнт пропорційності. Регулятор в свою чергу регулює напругу на частотному перетворювачі.

Розробимо структурну схему САК НС

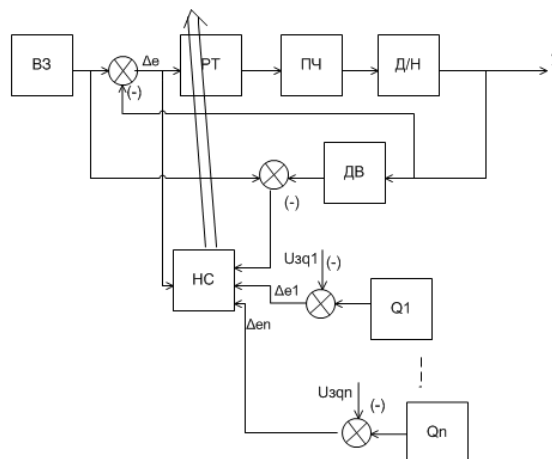


Рис. 5. Структурна схема САК НС на базі нечіткої логіки

ВЗ - вузол завдання, РТ - регулятор тиску, ПЧ - перетворювач частоти, Н - насос, ДВ - датчик витрат, НС - система нечіткої логіки, Q - витрати води, n - станції, Δe - сигнал різниці між заданим і дійсним значенням витрат води у трубопроводі. На виході у підсумовуються усі Q (рис.1)  $\sum Q$ , де

$$\begin{cases} Q_1 = Q'_1 \pm q_1 f(P_{c1}) \\ Q_2 = Q'_2 \pm q_2 f(P_{c2}) \\ Q_n = Q'_n \pm q_n f(P_{cn}) \end{cases} \quad (1)$$

де  $P_c$  - параметри секції, що визначаються технологічною картою, Q - попередні значення витрати води в трубопроводі, q - різниця між попереднім та текучим значенням витрат.

Отже, регулювання продуктивністю насосної станції відбувається завдяки корегуванню витрат води на кожній із секцій, залежно від її параметрів.

**Висновки на напрямки подальших досліджень.** Автоматизована система керування насосною станцією на базі нечіткої логіки підвищує продуктивність за рахунок того, що враховуються витрати води на кожній із секцій, на підставі цього подається конкретна кількість води в трубопровід, отже можна сказати, що трубопровід буде менш завантажений, так як води в ньому рівно скільки потрібно секціям. Також, робота насосів споживає значну кількість електроенергії, що підвищує грошові витрати підприємства. Кількість води на секції впливає на якість збагачення руди, адже це прямий вплив на технологічний процес.

#### Список літератури

1. **Богданов О.С.** Справочник по обогащению руд. Обогащительные фабрики. [Текст] / редкол. О.С. Богданов, Ю.Ф. Ненарокомов. — 2-ое изд. — М.: Недра, 1984. — 360 с.
2. **Богданов О.С.** Справочник по обогащению руд. Специальные и вспомогательные процессы, испытания обогащаемости, контроль и автоматика. [Текст] / редкол. О.С. Богданов, В.И. Ревнивцев. — 2-ое изд. — М.: Недра, 1986. — 376 с.
3. Республиканская программа "Энергосбережение". — Мн.: Полымя, 1995.
4. **Карасев Б.И.** Насосные и воздухоудные станции. / Б.И. Карасев. — Мн.: ВШ, 1990. — 326 с.
5. Автоматизация тепловых пунктов: Справочное пособие. / Витальев В.П., Фаликов В.С. — М.: Энергоатомиздат, 1989.

6. Электрооборудование сельскохозяйственных предприятий: учеб. пособие /В.А Дайнеко, А.И.Ковалинский. — Минск: Новое знание, 2008. — 320с.:ил. — (Техническое образование).
7. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB fuzzyTECH. — СПб.:БХВ-Петербург, 2005ю – 736 с.
8. Тэрано Т., Прикладные нечеткие системы: пер. с япон./ К.Асаи, Д. Ватада, С. Иваи и др.; под редакцией Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугено. — М.: Мир, 1993. — 368 с.
9. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. — К.: «Радиаматор», 2008. 972с.
10. Абрамов А.А., Леонов С.Б. Обогащение руд цветных металлов Учеб. для вузов. - М: Недра, 1991. - 407 с

Рукопис подано до редакції 18.04.16

УДК 681.51: 622.788

В.Й. ЛОБОВ, канд. техн. наук, доц., М.В. НЕСКОРОМНА, магістрант,  
Криворізький національний університет

## СИНТЕЗ МОДАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ПРОЦЕСУ ВИПАЛУ ОБКОТИШІВ У КОНВЕЄРНІЙ ПЕЧІ ФАБРИКИ ОГРУДКУВАННЯ

Обґрунтовано наукову та практичну задачу використання багатомірної системи керування технологічним процесом випалу обкотишів у конвеєрній печі. Багатомірна математична модель враховує: висоту шару обкотишів, стабілізацію тиску газу, витрат газу в зоні сушки, регулювання температури та тиску в горні зони підігріву, стабілізацію витрат повітря в зоні охолодження, регулювання температури повітря та інші технологічні параметри. Для забезпечення оптимального режиму випалу обкотишів запропоновано використати систему автоматичного керування на основі модального регулятора. Проведено моделювання процесу випалу обкотишів у конвеєрній печі фабрики огрудкування за допомогою SIMULINK програмного пакету MATLAB. Виконано синтез модального регулятора для цієї моделі. В результаті моделювання багатомірної системи автоматичного керування при використанні модального регулятора встановлено, що максимальна тривалість перехідного процесу складає 120 с витрат повітря в зоні сушки 1а мінімальна – секунду, при регулюванні висоти шару обкотишів.

**Ключові слова:** конвеєрна піч, випал обкотишів, багатомірна модель об'єкту, матриця, моделювання, перехідний процес

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Для випалу окатишів використовують випалювальні машини декількох типів, що розрізняються видом використовуваного палива, розташуванням пальників, способами спалювання палива і рекуперації тепла, тощо. Температурний режим випалу на стрічці легко регулюється кількістю газу в зонах сушіння і підігріву, зміною температури в зоні випалу, а також підвищенням тиску повітря в зоні охолодження. Як і для більшості технологічних процесів гірничо-збагачувальних комбінатів, так і для процесу температурної обробки обкотишів в конвеєрній випалювальній машині, достатньо складно отримати адекватну математичну модель. Зважаючи на нестационарність об'єкта системи з типовими ПД-регуляторами з постійними коефіцієнтами в цілому не задовольняють вимоги до точності та швидкодії керування температурним режимом. Це пов'язано з багатомірністю та стохастичними властивостями об'єктів керування, не стаціонарністю, наявністю великих часових запізень, неможливістю безперервного контролю окремих технологічних показників [1,2]. Тому для вирішення цієї проблеми є актуальним використання багатомірної математичної моделі з модальним регулятором.

**Аналіз досліджень і публікацій.** На сьогоднішній день активно проводяться дослідження в області створення ефективних методів та засобів, що дозволять вирішити дану проблему. Так в роботі [3] досліджується інверсні моделі нейроконтролера для системи інверсного управління технологічним процесом, а в іншій [4] - використовується нечіткі регулятори для керування технологічним процесом випалу обкотишів. Для моделювання розподілу температур у шарі обкотишів використано числові методи та метод кінцевих елементів, відповідно до якого виконано декомпозицію, тобто розбиття досліджуваної ділянки шару обкотишів на елементарні мінімальні блоки кубічної форми, що надає можливість змодельовати процеси теплообміну всередині шару обкотишів[5-7]. Розроблені принципи керування температурним режимом процесу випалювання обкотишів з використанням прогнозуючих ANFIS-моделей надані в літературі [8-13].

У статті [11] обговорюється методика синтезу регуляторів для багатовимірних оборотних лінійних динамічних об'єктів. В основі застосовуваного підходу до вирішення завдання синтезу лежить навмисне формування різномісних процесів в замкнутій системі, де стійкість швидких процесів забезпечується вибором параметрів регулятора, а формуються повільні процеси відповідають заданим еталонному рівнянню. У відомих публікаціях не розглядаються питання пов'язані з використанням впливу температурних режимів сусідніх камер, не визначаються об'єми стислого повітря та в моделях не враховуються інші параметри, які впливають на продуктивність машини та якість обкотишів.

**Постановка завдання.** Метою роботи є обґрунтування використання багатомірної системи керування технологічним процесом та розробка модального регулятора для забезпечення оптимального режиму випалу обкотишів у конвеєрній машині, що дозволить підвищити продуктивність машини, скоротити витрати енергоносіїв на виробництво та покращити якість кінцевого продукту.

**Викладення матеріалу та результати.** Відповідно до технологічного процесу, що наданий в [1] та використовуючи алгоритм наданий в літературі [12], динамічні характеристики випалювальної машини можна представити типовою передавальною функцією (1) з коефіцієнтами, представленими в табл. 1.

$$W(p) = \frac{K \cdot e^{-t}}{Tp + 1}. \quad (1)$$

Таблиця 1

Динамічні характеристики випалювальної машини

| Позначення | Номер вакуум- камери | Назва                            | $\tau$ | T   | K     |
|------------|----------------------|----------------------------------|--------|-----|-------|
| W3p        | 7                    | Витрати газу в зоні підігріву    | 50     | 340 | 0,15  |
| W4p        | 9-10                 | Витрати газу в зоні випалу       | 50     | 340 | 0,4   |
| W1v        | 5                    | Витрати повітря в зоні сушки 1   | 40     | 340 | 0,003 |
| W2v        | 7                    | Витрати повітря в зоні підігріву | 50     | 350 | 0,15  |
| W4v        | 9-10                 | Витрати повітря в зоні випалу 1  | 50     | 330 | 0,25  |
| W5v        | 18                   | Витрати повітря в зоні випалу 2  | 150    | 250 | 1250  |
| Wv         | -                    | Висота шару                      | 90     | 120 | 12    |
| Ws         | -                    | Швидкість машини                 | 180    | 420 | 0,5   |
| W1t        | 3                    | Температура в зоні сушки 1       | 50     | 300 | 0,6   |
| W2t        | 5                    | Температура в зоні сушки 2       | 50     | 300 | 0,4   |
| W3t        | 7                    | Температура в зоні підігріву     | 50     | 340 | 0,25  |
| W5t        | 12-13                | Температура в зоні випалу 2      | 50     | 300 | 0,15  |

Загальна передавальна функція об'єкта (2) складається з окремих передавальних функцій по кожному з параметрів і відповідно має вигляд діагональної матриці, завдяки цьому багатовимірну систему можна представити як ту, що складається з 12 одновимірних підсистем.

Передавальну функцію об'єкта приведемо до вигляду (3).

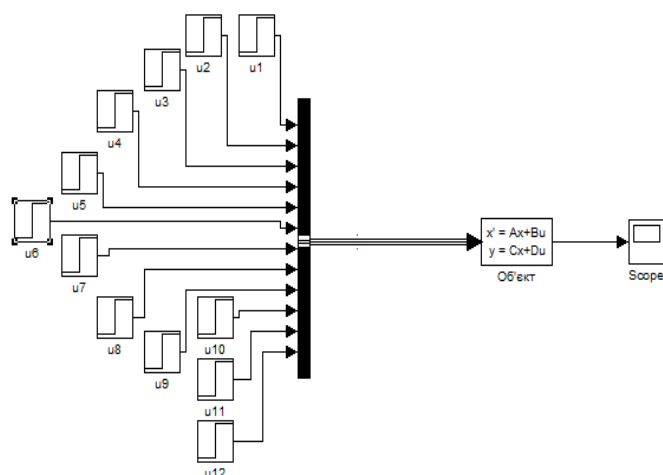
$$W_o = \begin{bmatrix} W_{3p} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_{4p} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & W_{1v} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & W_{2v} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & W_{4v} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W_{5v} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W_v & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W_{1t} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W_{2t} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W_{3t} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W_{5t} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (3)$$

де матриці  $A, B, C$  і  $D$  мають вигляд:

[illegible]

Передавальну функцію об'єкта дослідимо за допомогою SIMULINK програмного пакету MATLAB, модель якої представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Модель системы в MATLAB

Як показують результати моделювання процеси в системі керуються з сталою помилкою, тому необхідно розробити такий регулятор, щоб показники якості системи були оптимальними. Для цього досліджуємо керованість системи:

```
>>P=ctrb(A,B)
```

$$>> n = \text{rank}(P)$$

$n=12$ - ранг матриці керованості, що дорівнює порядку об'єкта, отже, система повністю керована.

Знаючи нормоване значення часу для системи і заданий час перехідного процесу, значення  $\omega_0=20$ .

Тоді матриці  $K$  і  $K'$  мають такі кінцеві значення:

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $K=$ | $\begin{bmatrix} 1.2794 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 639.905 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5.1196 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.2794 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 639.903 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9.9980 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 79.9667 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 639.923 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 319.946 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 639.893 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 639.905 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 639.893 \end{bmatrix}$ | $K'=$ $\begin{bmatrix} 6.3980 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3200 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.5602 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6.3980 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3200 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 50 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 400 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3200 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1600 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3200 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3200 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3200 \end{bmatrix}$ |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Матриці, що описують роботу регулятора мають вигляд

$$A_p = \begin{bmatrix} A & \dots & B \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}; B_p = \begin{bmatrix} 0 & \dots & -K \cdot B \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K & \dots & -K \end{bmatrix}; \quad C_p = [0: E]; D_p = [0: -K]$$

Отже, модель синтезованої системи матиме вигляд наданий на рис. 2.

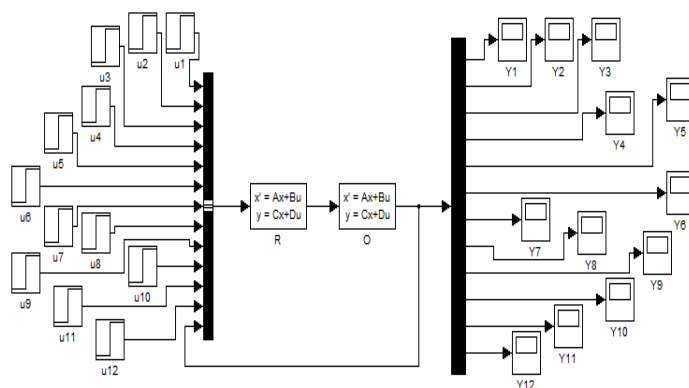


Рис. 2. Модель системи управління в MATLAB

На виході системи спостерігаємо покращення перехідних характеристик, графіки яких для кожного параметру представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Результати перехідних процесів синтезованої системи

| Назва параметру                  | Тривалість перехідного процесу, t c | Графік перехідного процесу | Назва параметру                 | Тривалість перехідного процесу, t c | Графік перехідного процесу |
|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| Витрати газу в зоні підігріву    | 25                                  |                            | Витрати повітря в зоні випалу 2 | 1                                   |                            |
| Витрати газу в зоні випалу       | 20                                  |                            | Висота шару                     | 1                                   |                            |
| Витрати повітря в зоні сушки 1   | 120                                 |                            | Швидкість машини                | 20                                  |                            |
| Витрати повітря в зоні підігріву | 23                                  |                            | Температура в зоні сушки 1      | 20                                  |                            |
| Витрати повітря в зоні випалу 1  | 25                                  |                            | Температура в зоні сушки 2      | 21                                  |                            |

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Запропонований підхід до побудови багатомірної системи керування процесом випалу обкотишів у конвеєрній печі. Це дозволило значно покращити протікання перехідного процесу, максимальна тривалість якого не перевершує 120 с витрати повітря в зоні сушки 1, а мінімальна – секунду, при регулюванні висоти шару обкотишів. Для автоматизованої системи автоматичного керування синтезовано модальний регулятор, що дозволило забезпечити вказану тривалість перехідного процесу.

У подальших дослідженнях доцільно буде продовжити вивчати модальне регулювання процесу з уточненням передавальних функцій параметрів процесу випалу обкотишів та перевірки точності коефіцієнтів, що використовуються.

#### Список літератури

1. Ксензовский В.Р. Автоматизация процессов производства окатышей. // Изд-во "Металлургия", 1971.
2. Боковиков Б.А. Математическое моделирование динамики процесса обжига окатышей на конвейерной машине / Б.А. Боковиков, В.М. Малкин, М.И. Найдич // Металлургическая теплотехника. – 2002. - № 8. – С. 25-31
3. Купин А.И., Рубан С.А. Исследование инверсных моделей нейроконтроллера для систем интеллектуального управления ТП горнорудных предприятий // Вісник Криворізького технічного університету. - Вип.18 - Кривий Ріг: КТУ, 2007. - С. 157-161.
4. Рубан С.А., Лобов В.И. Использование нечетких регуляторов для автоматизации технологического процесса обжига окатышей на конвейерных обжиговых машинах // Разраб. рудн. месторожд. - Вып. 91. - Кривой Рог: КТУ, 2007. - С. 188-193.
5. Лобов В.И. Моделирование розподілу температур у шарі залізорудних обкотишів газоповітряної камери в конвеєрних печах фабрики огрудкування / В. И. Лобов, М. О. Котляр // Науковий вісник Національного гірничого університету. - 2015. - № 2. - С. 109-117.
6. Лобов В.И. Дослідження термічної обробки шару обкотишів у газоповітряній камері обпалювальної машини конвеєрного типу / В. И. Лобов, М. О. Котляр // Науковий вісник Національного гірничого університету. - 2015. - № 3. - С. 131-136
7. Лобов В.И. Автоматизовані системи керування процесами термічної обробки обкотишів на конвеєрній випалювальній машині: В.И. Лобов, Л.І. Єфіменко, М.П. Тиханський, С.А. Рубан. – Кривий Ріг: Видавничий центр ДВНЗ «КНУ», 2015. – 236 с.
8. Рубан С.А., Лобов В.И. Розробка принципів керування температурним режимом процесу випалювання котунів з використанням прогнозуючих ANFIS-моделей [Текст] // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2008. – С. 69-74.
9. Рубан С. А. Автоматизация процесу керування термічною обробкою залізорудних обкотишів з використанням прогнозуючих ANFIS-моделей: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07 / С. А. Рубан ; Криворіз. техн. ун-т. — Кривий Ріг, 2011.
10. Рубан С.А. Комп'ютерне моделювання алгоритму оптимального керування температурним режимом випалювання котунів з використанням прогнозуючих ANFIS-моделей / С.А. Рубан, В.И. Лобов // Вісник КТУ: зб. наук. праць. –Кривий Ріг: КТУ, 2008. – Вип. 21. – С. 150
11. Юркевич В.Д. Синтез регуляторов для многомерных систем на основе метода разделения движений // Труды X Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO '15 Москва 26-29 января 2015 г.
12. Репнікова Н.Б., Писаренко А.В., Замуренко К.В., Зімарев Ф.С. Алгоритм синтезу модального регулятора багатовимірної системи управління // Науково-теоретичний журнал "Штучний інтелект". - No2'2009 - Донецьк. Дон-НТУ. - С. 69-75.
13. Vyacheslav Lobov, Karina Lobova, Mykhailo Koltiar. Investigation of temperature distribution along the height of the layer of pellets on conveyor roasting machine. Metallurgical and Mining Industry, No. 4, p.p. 34-38, 2015.

Рукопис подано до редакції 18.04.16

УДК 622.733-52

А.А. ЖОСАН, канд. техн. наук, доц., Криворожский национальный университет

#### НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ РЕГУЛЯТОР НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Значительная часть современных методов синтеза систем управления технологическими процессами базируется на линейных представлениях об объекте управления. Главной особенностью линейных процессов является допущение справедливости принципа суперпозиции. Однако, большинство существующих процессов линейными можно назвать лишь условно. Поэтому попытка получить глобальную модель нелинейного объекта практически обречена. В настоящее время целым рядом математических и физических школ развивается подход, основанный на неравновесной динамике, позволяющей все шире ставить вопрос об объекте управления как о "черном ящике". В представленной работе развивается именно такой подход. Приведенные результаты дают основания считать такой подход более рациональным, чем линейный.

**Ключевые слова:** мобильная модель, локальная модель, глобальная модель, расширенная матрица, аттрактор, бифуркация, бассейны, репеллеры, принцип суперпозиции, "черный ящик"

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** История построения моделей динамических систем большей частью основана на линейной концепции, согласно которой принцип суперпозиции является главным. Отсюда и математический аппарат таких моде-

лей: линейные дифференциальные и разностные уравнения с постоянными коэффициентами, частотные методы, передаточные функции, корреляционные модели. Такие допущения создают иллюзию, что по немногим данным траекторных измерений в расширенном пространстве состояний, включающем как выходные так и управляющие переменные, можно получить глобальную модель.

Построение глобальных моделей объекта управления не всегда оправдано. Эта задача сама по себе тривиальна, если речь идет о линейных системах с постоянными параметрами. Однако большинство систем нелинейны. Для облегчения (но не достижения адекватности) как правило, производят линеаризацию модели и далее производят подмену объекта его линейной идеализацией. Однако при этом теряется информация об аттракторе, бифуркациях и других свойствах реального нелинейного объекта. Приходится "аппроксимировать" этот объект моделями линейных дифференциальных уравнений на отдельных областях состояний (TS-модели). При этом задача скорее усложняется, так как необходимо определить хотя бы условно (размыто) границы этих областей.

Авторам, знакомым с реальными нелинейными объектами и процессами, хорошо известно, что так называемые нелинейные характеристики объектов получить с достоверностью практически очень сложно, а иногда просто невозможно. Происходит это по следующим причинам. Для получения нелинейных характеристик технологических процессов необходимо остановить нормальный процесс эксплуатации объекта, что не всегда допустимо. Особенно это касается объектов, встроенных в технологические цепочки и обратные технологические связи. Например, доменный процесс дробления или измельчения и много других. Даже, если это допустимо, эти характеристики могут эволюционировать даже в процессе измерений. Например, в процессе измерения характеристик дробления состав руды изменился.

Методы получения моделей, основанные на подаче стандартных воздействий, интегралов типа Дюамеля, вообще к нелинейным нестационарным системам неприменимы.

Методы, основанные на корреляционных функциях (уравнение Винера) также применимы только к линейным стационарным объектам. Варианты моделей Винера-Гаммерштейна, основанные на точном знании и стационарности нелинейных характеристик, требуют строгого обоснования. Кроме того, для получения корреляционных функций необходимо использование большого числа данных с объекта управления. Однако, в этом случае надо считаться с известным эффектом "устаревания данных". Этот эффект, возможно, несущественен, когда речь идет о линейных стационарных системах.

Использование частотных методов также неприменимо к нелинейным и, тем более нестационарным объектам, так как для них не справедлив принцип суперпозиции.

При попытке получить модель нелинейной системы в виде нелинейных дифференциальных уравнений возникает проблема выбора класса функций, аппроксимирующих вектор-функцию правых частей уравнений (скоростей фазовых траекторий). При этом часто выбирают функции из класса полиномов или тригонометрических функций. Этот математический аппарат удобен тем, что допускает аналитическое дифференцирование, интегрирование, а также все основные арифметические операции (в случае деления приближенно). Кроме того, работы Верштрасса, Чебышева, Фурье и других ученых дают указания по оценке результатов применения этих функций. Однако, построить глобальную модель нелинейного нестационарного динамического объекта с помощью этого аппарата невозможно. Ведь параметры правых частей уравнений можно получить только в той области состояний объекта и в то время, когда они определены.

В то же время при реализации управления объектами важно знать самые последние характеристики и причем на небольшом, предыдущем текущему управлению, отрезке времени. Знание модели в отдаленном прошлом и отдаленном будущем может представлять лишь исторический интерес. Очевидно, популярная (до сих пор серьезно не реализованная) идея дуального управления Фельдбаума А.А. в данном контексте является наиболее обоснованной. Что приводит к мысли о преимуществах локальных моделей, которые сменяются вдоль траектории движения объекта. Такие модели автором данной работы предлагается называть мобильными моделями.

**Анализ исследования и публикаций.** При дальнейшей разработке методики получения математических моделей (идущей, по-видимому, из идей сплайн-интерполяции) в качестве ис-

ходного материала стали применять на отдельных областях состояний объекта линейные дифференциальные уравнения. На основе работ [1-2] производится сращивание линейных дифференциальных моделей на отдельных областях пространства состояний (так называемые TS-модели). Относительно универсальных аппроксиматоров типа нейросетей можно сказать: "В общем случае результат зависит от очень многих параметров, начиная с входных и выходных данных, способа их нормирования, количества скрытых слоев и количества нейронов в этих слоях, уровня обучения, количества эпох обучения и многих, многих других" [3].

Кроме того, возникают проблемы определения границ применимости той или иной дифференциальной модели. Более того, нелинейные процессы-оригиналы, а не их модели, могут иметь аттракторы, которые определить с помощью кусочно-линейных моделей невозможно. Это касается также возможных точек бифуркации, а также катастроф (хотя бы в виде быстрых фазовых переходов). Все это связано также с чувствительностью, которая может быть существенной и объясняться непредвиденными изменениями объемов областей начальных условий вдоль траектории движения. Возможно наличие бассейнов и репеллеров, на границах которых возможны специфические явления (например, в точках максимума производительности мельницы уравнения модели в приращениях содержат точку бифуркации).

В нелинейных системах могут возникать внутренние детерминированные хаотические процессы, что в линейных моделях просто невозможно.

Можно было бы далее анализировать указанные проблемы. Достаточно лишь заметить, что в настоящее время уже прочно входит в сознание многих исследователей физических, технологических, общественных, биологических и других явлений "нелинейное мышление".

Что касается процессов дезинтеграции горных пород, следует особо отметить работы [4-5], в которых, с точки зрения автора настоящей статьи, впервые для анализа процессов дезинтеграции используются современные методы нелинейной динамики.

Для утилитарных локальных задач управления (а их большинство) не имеют значение глобальные свойства объекта за пределами локальной области движения (управления).

Глобальная модель имеет смысл, если она пригодна (в случае необходимости) на больших горизонтах прогноза. В линейных стационарных случаях это возможно. Однако, пока мы строим глобальную модель нелинейного нестационарного объекта, он изменяется и не соответствует модели.

Часто при решении задач конструирования регуляторов необходимо реализовать траектории движения в ограниченном объеме ("трубке") фазового пространства. Поэтому усилия по созданию глобальной модели (даже адекватной, но, разумеется, сложной) часто совершенно неоправданны.

Из законов кибернетики следует, что разнообразие регулятора должно быть не менее разнообразия объекта. На этом основании регулятор нелинейных процессов должен быть нелинейным.

Нахождение параметров модели в классическом смысле в виде чисел (чем заполнены все работы до настоящего времени) не является целью при решении задачи управления. Ведь задача управления как раз формулируется как задача определения собственно управляющего воздействия, а параметры регулятора в виде конкретных чисел это промежуточный этап. Кроме того, традиционный классический подход определения параметров регуляторов и связывание их с физическими параметрами объекта управления требует осмысления. Ведь параметры реального объекта (например, постоянные времени электромеханического оборудования на прокатном стане) – это физические параметры физического объекта, а параметры регулятора, даже численно равные параметрам объекта, это всего лишь числа в памяти управляющего устройства. Параметры объекта изменяются независимо от чисел в ячейках памяти. Отсюда возникает, строго говоря, неправомерность сокращения полюсов и нулей передаточных функций.

В последние годы развивается методика создания дуальных непараметрических моделей объектов управления. Например, в работе [6] дан анализ такого подхода. Однако во всех работах такого направления сохраняется тенденция поставить в качестве первоочередной задачи определение параметров модели объекта, несмотря на указание в заголовках статей о синтезе "непараметрических" моделей.

**Постановка задачи.** Продемонстрировать на численных примерах возможность синтеза регулятора нестационарного нелинейного объекта управления как в устойчивом так и неустой-



чивом состоянии без необходимости измерения параметров, определения точной структуры, настройки регулятора на основе локальной модели и показать преимущества такого подхода.

В работах [7-9] приведена методика синтеза регулятора на основе матричной локальной модели, в основу которой положен известный дуальный подход, предложенный А.А. Фельдбаумом. В данной работе показан еще один прием синтеза такого регулятора. Этот прием проще использованного ранее. Что особенно важно, он позволяет автоматизировать получение основных результатов с помощью современных символьных процессоров, встроенных в различные приложения. В данном случае был использован символьный процессор приложения MATHCAD. Необходимо подчеркнуть, что из-за ограниченного объема статьи доказательство метода отложено до дальнейших публикаций автора.

Суть метода в следующем. На вход объекта управления подаются управляющие воздействия в ходе нормальной его эксплуатации. В результате заполняется расширенная матрица вида

$$M = \begin{pmatrix} x_{n+1}^3 & x_n & u_n \\ x_n & x_{n-1} & u_{n-1} \\ x_{n-1} & x_{n-2} & u_{n-2} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $x_{n+1}^3$  - значение выходной величины на  $(n+1)$  "будущем" заданном интервале дискретности, это может быть заданное желаемое значение;  $x_k$  - значения выходной величины на  $k$ -м интервале ( $k \neq n+1$ ), которые были ранее реализованы, измерены;  $u_{n-1}, u_{n-2}$  - значения управления на соответствующих прошедших интервалах, измерены и значит известны;  $u_n$  - значение управления на  $n$ -м интервале (на котором осуществляется новое, рассчитанное) управление, обеспечивающее на следующем интервале заданное  $x_{n+1}^3$  значение выхода.

Таким образом, задача регулятора состоит по заданному значению  $x_{n+1}^3$  определить соответствующее управление  $u_n$ . Для решения этой задачи предлагается найти неизвестное управление, алгоритм определения которого предложено в виде выражения

$$\det(M)=0. \quad (2)$$

Откуда

$$u_n = \frac{(x_{n+1}^3 \cdot x_{n-2} - x_{n-1} \cdot x_n)u_{n-1} + (x_n \cdot x_n - x_{n+1}^3 \cdot x_{n-1})u_{n-2}}{x_{n-2} \cdot x_n - x_{n-1} \cdot x_{n-1}}. \quad (3)$$

Очевидной особенностью такого регулятора является отсутствие коэффициентов, которые надо определять, а затем оптимизировать. Кроме того, пока речь не шла об уравнении модели управляемого объекта, как это до сих пор принято во всех публикациях. Однако очевидно, что матрица (1) и соответствующее уравнение регулятора содержат полную первичную (самую достоверную) информацию об объекте. Предложено называть, по аналогии с объектным программированием, моделью объекта управления матрицу (1) и алгоритм обработки этой матрицы (2). Результатом является управление (3).

Такая модель, очевидно, изменяется вдоль траектории движения объекта и потому может называться мобильной. Для начала работы достаточно подать три обучающих допустимых управляющих воздействия, затем после определения первого рабочего управления  $u_n$  и далее матрица пополняется "свежими" данными и позволяет при заданном выходе  $x_{n+1}^3$  определять очередное рабочее управляющее воздействие.

Очевидно, что если не измеряемые непосредственно параметры объекта будут изменяться, то это неизбежно скажется на содержимом матрицы (1) и будет получено соответствующее управление (3). Технологические механизмы дезинтеграции твердых материалов являются нелинейными.

Поэтому для управления ими необходимо использовать нелинейные регуляторы в соответствии с упомянутыми законами кибернетики. Их нелинейные характеристики можно измерять, но только в статических режимах.

Такая информация иногда создает иллюзию точности модели так как даже во время эксперимента характеристики могут изменяться. Поэтому надо стремиться создавать регуляторы, способные управлять объектами типа "черного ящика".

Очевидно, что для регулятора (3) объект представляет собой "черный ящик", о котором известны лишь входные и выходные данные.

Поэтому для такого регулятора в некотором смысле не имеет значение структура и параметры "черного ящика".

Правда, что касается структуры, характерных режимов работы объекта, а также сигнатуры его ляпуновских показателей, более детальный ответ на этот вопрос, ввиду ограниченного объема данной работы, автор планирует привести в последующих публикациях.

Признаком высокого качества работы регулятора является его способность сохранять работоспособность при входе объекта в состояние неустойчивости.

Ниже будет приведен пример численного испытания нелинейного объекта управления в дискретном пространстве.

При этом корень его характеристического полинома превышает единицу (объект неустойчив). Задание изменяется по достаточно сложному закону.

Как известно, при изменении параметров и вида задания ПИД-регулятор требует пересчета коэффициентов или настройки иногда по достаточно сложным алгоритмам, а в ряде работ с привлечением нейротехнологий.

Нейротехнологии - это безусловно шаг в сторону нелинейного мышления и позволяет решать целый ряд задач.

Однако, применение этих технологий для настройки двух-трех коэффициентов ПИД-регулятора представляется нерациональным.

В качестве объекта управления было взято неизвестное регулятору уравнение

$$x_{n+1} = x_n + (a(n) \cdot x_n + u_n) \cdot dt, \quad (4)$$

где  $a(n)=800 \cdot \sin(3 \cdot n \cdot dt)$ ;  $dt=0.0005$  – интервал дискретности;  $n$  – номер интервала дискретности.

Очевидно, корень уравнения (4) равен  $rut(n)=1+a(n) \cdot dt$ .

Далее на рис. 1 приведены графики изменения задания  $x^3_{n+1}$  ( $x$  task), выхода  $x_n$  ( $x$  real) и корня  $rut(n)$ .

При рассмотрении графиков необходимо учесть особенности дискретных систем.

Известно, что результат управления должен отставать от задания минимум на один интервал.

Это соответствует условиям физической реализуемости.

Поэтому необходимо сравнивать заданное значение на  $n$ -м интервале с его реализацией на следующем  $(n+1)$ -м интервале.

Если графики соответственно сдвинуть, то они практически совпадут.

Средняя ошибка регулирования за один интервалы вычислялась путем сравнения заданного значения выхода и его реализации на следующем интервале, т.е., с учетом условия физической реализуемости.

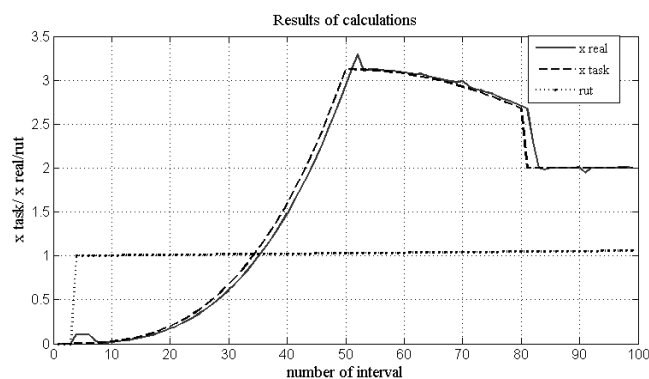


Рис. 1. Результаты вычислений

Эта средняя на один интервал ошибка составила всего 1,29%. Начиная примерно с интервала номер 40, корень становится больше единицы.

Объект становится неустойчивым. Среднее значение корня на 50 последующих интервалах составляет примерно 1.05, что соответствует темпу роста выхода объекта в автономном (без управления) режиме  $1,05^{50}=11,4674$ . Однако, регулятор успешно справляется с задачей.

Более детальные исследования показали, что даже при значении корня до 1,15, что соответствует темпу роста в автономном режиме  $1,15^{50}=1,0837e+03$ , работа регулятора успешна.

**Выводы.** Приведенный в работе метод синтеза регулятора отличается полным отсутствием необходимости вычисления коэффициентов в соответствии с параметрами объекта управления и дальнейшей настройкой.

Регулятор достаточно хорошо справляется с управлением неустойчивым объектом.

Дальнейшая работа будет направлена на более глубокое обоснование применения рассмотренного класса регуляторов для регулирования многосвязных систем.

#### Список литературы

1. Tanaka K., Sugeno M. Stability analysis and design of fuzzy control systems // IEEE Trans. Fuzzy Syst. – 1992. – V. 45. – № 2. – P. 135–156.
2. Tanaka K., Wang H.O. Fuzzy control systems design and analysis: a linear matrix inequality approach. – N.Y.: Wiley, 2001.
3. Metatrader 5 — индикаторы. Третье поколение нейросетей: "глубокие нейросети" 27 ноября 2014, 10:37 2014, 10:3. Интернет-ресурс: <https://www.mql5.com/ru/articles/1103>
4. Герасина А.В. Структурно-параметрическая идентификация процессов дробления и измельчения руд: монография / А.В. Герасина, В.И. Корниенко. – Д.: Национальный горный университет, 2013. – 101 с.
5. Корнієнко В.І. Автоматизація оптимального керування процесами дроблення і здрібнювання руд: монографія / В.І. Корнієнко. – Д.: Національний гірничий університет, 2013. – 193 с.
6. Медведев А.В. О теории непараметрических систем управления. Вестник Томского Государственного университета. Управление, Вычислительная Техника И Информатика, Выпуск № 1 (22) / 2013. С. 6-19. Научная библиотека КиберЛенинка. Интернет-ресурс: <http://cyberleninka.ru/article/n/o-teorii-neparametricheskih-sistem-upravleniya>.
7. Жосан А.А. Розробка алгоритмів дуального управління відцентровим дезінтегратором руд. Автореф. дис. на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, КТУ, 1998 р. – 17 с. Спеціальність 05.13.07 - Автоматизація технологічних процесів.
8. Жосан А.А. Концепція моделі динамічного об'єкта керування як потоку вхідних і вихідних даних. Вісник Криворізького технічного університету. випуск 22, Кривий Ріг, 2008 (жовтень), С. 154-157.
9. Anatoliy Zhosan, Sergey Lipanchikov. Numerical modeling of disintegration process dual control. Metallurgical and Mining Industry, 2015, No. 3, p.p 74-77.

Рукопись поступила в редакцию 23.04.16

УДК 622.73:622.023

А.А. АЗАРЯН, д-р техн. наук, проф., Ю.Е. ЦЫБУЛЕВСКИЙ, канд. техн. наук, доц.,  
В.Г. КУЧЕР, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, Д.В. ШВЕЦ, аспирант  
Криворожский национальный университет

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ ГОКА АРСЕЛОР МИТТАЛ НА ИХ ПРОЧНОСТЬ

В статье рассмотрена взаимосвязь содержания магнетита в железистых кварцитах ГОКа АрселорМиттал Кривой Рог и их прочности. Объектом исследования является процесс дробления магнетитовой руды.

Предметом исследования является определение методов обнаружения влияния вещественного состава железистых кварцитов на их прочность. Целью исследования является получение аналитической зависимости между содержанием магнетита в железистых кварцитах ГОКа АрселорМиттал Кривой Рог и их прочности.

Основной научный результат заключается в получении зависимости между содержанием полезного компонента и крепостью железистых кварцитов.

Также предлагается усовершенствовать устройство магнитного каротажа карьерных взрывных скважин, добавив в него блок вычисления крепости руды вокруг скважины с целью расчета закладываемого количества взрывчатого вещества, необходимого для эффективного проведения взрывных работ.

**Ключевые слова:** железистые кварциты, прочность, содержание магнетита, каротаж

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Одними из наиболее актуальных направлений деятельности ОАО «Рудпромгеофизика» являются исследования физико-механических свойств горных пород и руд, связанных с совершенствованием технологии добычи полезных ископаемых [1-6].

Идея связи вещественного состава и структурно-текстурных особенностей пород с их физическими свойствами была выдвинута в начале XX века учеными Протодяконовым М.М., Тедером Р.И., Домаревым Д.С. и другими.

Установление взаимосвязи между содержанием магнетита в руде Валявкинского месторождения и ее прочностными характеристиками позволит эффективно корректировать количество взрывчатого вещества, закладываемого в скважины при проведении взрывных работ в зависимости от результатов магнитного каротажа. Таким образом будет достигнута экономия взрывчатого вещества при эффективном проведении взрывных работ.

**Анализ исследований и публикаций.** В работах [7,8] показано, что для некоторых месторождений установлены общие закономерности влияния вещественного состава и строения пород на их физико-механические свойства, а также выявлены связи между отдельными параметрами физико-механических характеристик. Также отмечено, что по установленным корреляционным зависимостям для некоторых руд и пород с достаточной точностью по агрегатной твердости можно определить прочностные свойства. Кроме того, в [7] указано, что агрегатная твердость хорошо коррелирует с прочностью при растяжении и сжатии, с твердостью по Шору и другими параметрами физико-механических свойств.

**Постановка задачи.** Основной задачей работы является получение зависимости между содержанием магнетита в железистых кварцитах ГОКа АрселорМиттал Кривой Рог и их физико-механическими свойствами. При установлении зависимости между содержанием магнетита и прочностью железистых кварцитов предлагается усовершенствовать устройство для магнитного каротажа карьерных взрывных скважин, дополнив его блоком вычисления крепости пород, что позволит более точно рассчитывать необходимое количество взрывчатки при проведении взрывных работ.

**Изложение материалов и результаты.** Исследования проводились по методике Ю.Л. Шатайлова ("Уралмеханобр"), эта методика позволяет оценить показатели дробимости руд по разрушению в дробилках проб массой не больше 10 кг.

Для исследований было отобрано три пробы на третьем карьере ГОКа, крупностью 100-150 мм:

|                                               |            |
|-----------------------------------------------|------------|
| горизонт-135, силикатные кварциты             | - 17,3 кг; |
| горизонт-60, силикатно-гематитовые кварциты   | - 15,9 кг; |
| горизонт-150, силикатно-магнетитовые кварциты | - 20,1 кг. |

Для проведения исследований было использовано следующее оборудование: лабораторная щековая дробилка ЛШД - 50×100, счетчик активной энергии типа САЗУ-И-670 набор сит (1-15) мм, направляющий лоток и секундомер.

Последовательность проведения экспериментов и расчета показателей дробимости следующая:

исследуемую руду исходной крупностью 0-150 мм дробят в щековой дробилке, подвергают грохочению и доводят до крупности 0-20 мм. Из дробленной руды отсеивают класс - 3 мм.

перед проведением опыта измеряют продолжительность  $t(c)$  трех оборотов счетчика САЗУ-И-670 и рассчитывают мощность  $N_x$  (кВт) дробилки ЛШД - 50×100 в режиме холостого хода по формуле (1).

$$N_x = 3600 n_c / (a_c t) \quad (1)$$

где  $n_c$  - число оборотов диска счетчика ( $n=3$ );  $a_c$  - постоянная счетчика.

Измерения повторяют трижды и за истинное принимают среднеарифметическое значение  $N$ . В случае использования ваттметра мощность дробилки в режиме холостого хода определяют перед проведением опыта по записанной ваттграмме  $N_{x1}$ .

отобранную пробу руды дробят в дробилке ЛШД-50×100 в условиях заполненного дробящего пространства при ширине выходной щели, равной 3 мм. Для определения мощности дробилки в рабочем режиме определяют число оборотов диска счетчика САЗУ-И-670 за фиксированное время дробления. Мощность рассчитывают по формуле (1).

после проведения опыта определяют мощность дробилки ЛШД-50×100 в режиме холостого хода  $N_{x2}$ , а затем гранулометрический состав дробленной руды.

рассчитывают производительность (т/ч) дробилки на исследуемой руде  $Q=3,6(P/t)$ , где  $P$  - масса навески, кг;  $t$  - продолжительность дробления, с.

рассчитывают удельный расход электроэнергии (кВт·ч/т) [9]

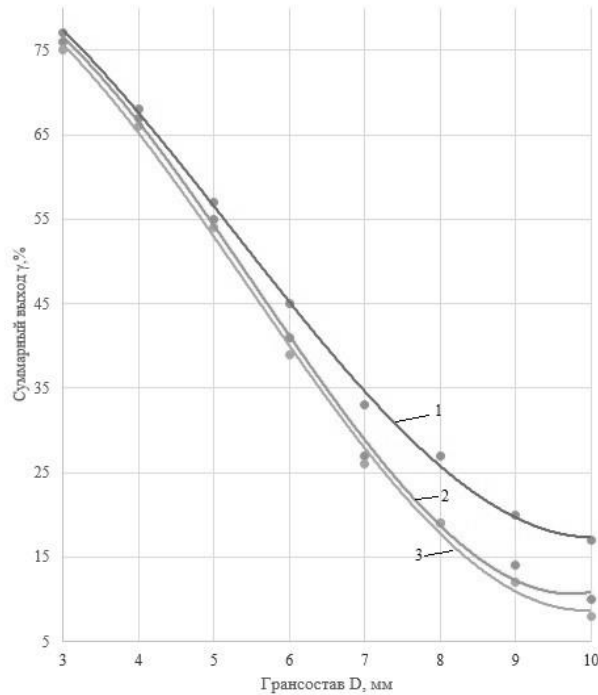
$$\mathcal{E} = (N_p - N_x)/2 \quad (2)$$

где  $N_x$  - мощность дробилки в режиме холостого хода, кВт

$$N_x = (N_{x1} + N_{x2})/2. \quad (3)$$

Содержание магнетита в пробах определялось с помощью устройства ДЖМ-4, состоящего из индуктивного датчика, цифрового датчика массы пробы и КПК. Устройство ДЖМ-4 было предварительно откалибровано на пробах данного месторождения.

Результаты ситового анализа материала проб приведены на рис. 1.



**Рис. 1.** Взаимосвязь суммарного выхода и грансостава: 1 - содержание  $Fe_{\text{магн}}$  в пробе - 19,54%; 2 - содержание  $Fe_{\text{магн}}$  в пробе - 25,75%; 3 - содержание  $Fe_{\text{магн}}$  в пробе - 31,02%

Были получены аппроксимирующие зависимости:

содержимое  $Fe_{\text{магн}}$  в пробе - 19,54%

$$y = 0,167x^3 - 2,63x^2 + 2,464x + 89,12 \quad (4)$$

$$R^2 = 0,99 \quad (5)$$

содержимое  $Fe_{\text{магн}}$  в пробе - 25,75%

$$y = 0,245x^3 - 4,056x^2 + 9,311x + 78,43 \quad (6)$$

$$R^2 = 0,99 \quad (7)$$

содержимое  $Fe_{\text{магн}}$  в пробе - 31,02%

$$y = 0,215x^3 - 3,5x^2 + 6,12x + 82,98 \quad (8)$$

$$R^2 = 0,99 \quad (9)$$

На основании полученных кривых можно сделать выводы о том, что чем меньше содержание магнетита и больше содержание кварца, тем больше выход крупного класса в продуктах дробления.

Зависимость предельной прочности на сжатие от массовой доли магнетита показана на рис. 2.

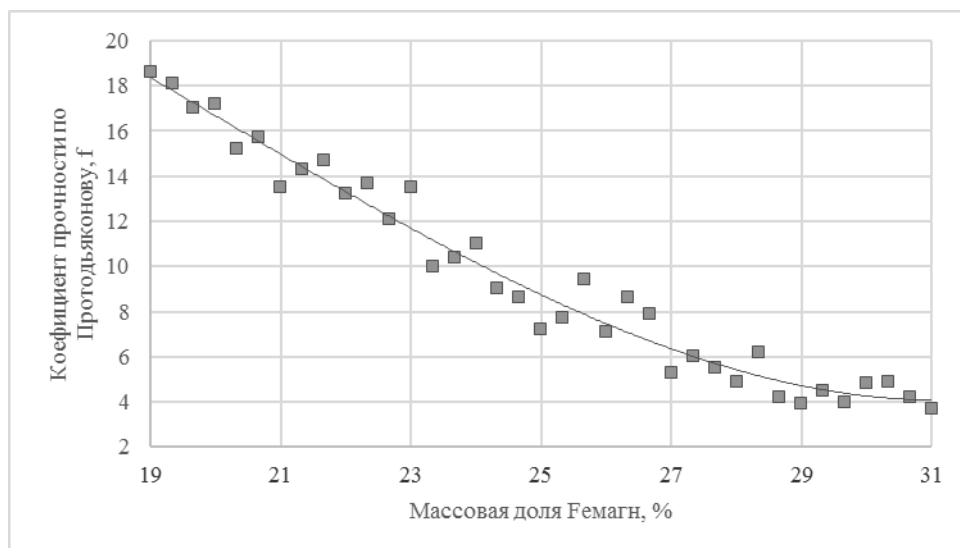


Рис.2. Зависимость коэффициента прочности по Протодяконову от массовой доли магнетита

В результате аппроксимации был получен полином третьей степени

$$y = 0,0045x^3 - 0,2711x^2 + 3,6989x + 14,854 \quad (10)$$

$$R^2 = 0,9678 \quad (11)$$

**Выводы и направление дальнейших исследований.** В результате исследований можно сделать вывод, что прочность железистых кварцитов обратно пропорциональна содержанию магнетита для Валявкинского месторождения с достаточной степенью точности.

В связи с этим имеет смысл обратить внимание на установление зависимости между содержанием железа в руде в скважине и количеством закладываемой взрывчатки в скважину при проведении взрывных работ: для повышения эффективности взрыва и снижения расхода взрывчатки предварительно по каждой из скважин определяется крепость взрывающей породы и по полученной зависимости корректируется количество закладываемой взрывчатки, - с уменьшением прочности пород количество взрывчатки уменьшают, а с увеличением - увеличивают в прямой пропорции от прочности взрывающих пород.

С учетом наличия установленной связи между прочностью железистых кварцитов и содержанием в них магнитного железа предлагается усовершенствовать устройство для магнитного каротажа карьерных взрывных скважин [10], дополнив его блоком вычисления крепости пород. Полученный прибор позволит получать информацию о прочности массива пород вокруг опробуемых скважин, что даст возможность рассчитывать необходимое количество взрывчатки для эффективного проведения взрывных работ.

Предлагаемая полезная модель иллюстрируется функциональной схемой устройства для магнитного каротажа карьерных взрывных скважин (рис. 3).

Устройство состоит из пульта 1 и геофизического зонда 2, которые связаны между собой каротажным кабелем. Блок питания 3 получает напряжение от сети переменного тока или от батарей аккумуляторов. Преобразователь напряжения 4 соединен с блоком питания 3 через каротажный кабель и смонтирован в геофизическом зонде 2. Также в геофизическом зонде 2 находятся последовательно соединенные блок управления генератором 5, усилитель мощности 6, генератор 7, генераторная катушка 8, а также последовательно соединенные приемная катушка 9, измерительный усилитель 10, амплитудный детектор 11, аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) 12, интерфейс 13. Переключатель режима интерфейса 14, блок вычисления прочности 15 и измерительный прибор 16 расположены в пульте 1.

Устройство работает следующим образом. После подачи питания на выходе блока управления генератором 5 возникают пульсирующие импульсы, которые усиливаются усилителем мощности 6, формируются генератором 7 и подаются на генераторную катушку 8. Зонд 2 располагается горизонтально на высоте (1,0 - 1,2) м от земли. Фиксируется сигнал приемной катушкой 9, который зависит от взаимной индукции между катушками 8 и 9. Этот сигнал усиливается измерительным усилителем 10, превращается из аналогового в цифровой с помощью амплитудного детектора 11 и блока АЦП 12, и затем через интерфейс 13 передается на переключатель

тель режима интерфейса 14, блок вычисления прочности 15 и измерительный прибор 16, которые расположены в пульте управления 1.

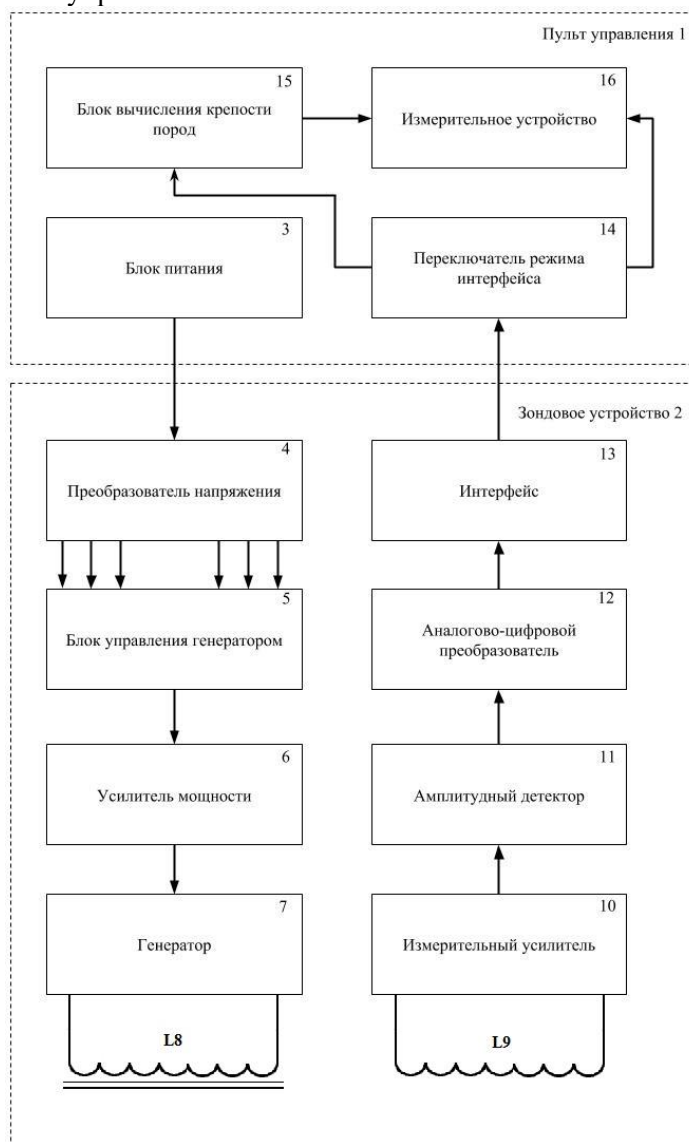


Рис.3. Устройство для магнитного каротажа карьерных взрывных скважин

Когда зонд 2 находится в скважине, магнетит действует как экран, уменьшая взаимодействие между генераторной 8 и приемной 9 катушками зонда 2. Степень уменьшения взаимодействия прямо пропорциональна количеству магнетита вокруг скважины, что используют для калибровки измерительного прибора 16, который подключен к интерфейсу 13 через переключатель 14. В свою очередь, сигнал содержания магнетита в породе с помощью переключателя интерфейса 14 передается в блок вычисления прочности пород 15, выход которого соединен с измерительным прибором 16. До проведения опробования скважин в память блока 16 вводятся данные по зависимости между содержанием магнетита в породе и ее прочностью.

Использование предлагаемого устройства для магнитного каротажа карьерных взрывных скважин дает возможность одновременно определять содержание магнетита в опробуемых породах и их прочность.

#### Список литературы

1. Азарян А.А., Дрига В.В. Математическая модель устройства контроля массовой доли магнитного железа в рудах//Вестник Криворожского технического университета. 2005, Выпуск 6. - С. 57-61.
2. Азарян А.А., Дрига В.В., Цыбулевский Ю.Е. Датчик железа магнитного//Металлургия и горнорудная промышленность. 2004. №6. - С. 69 - 71.
3. Азарян А.А., Дрига В.В., Цыбулевский Ю.Е. Исследование автогенераторного метода контроля содержа-

ния железа магнитного в продуктах обогащения//Сборник трудов. «Качество 2005». - С. 117 - 123.

4. Дрига В.В., Цыбулевский Ю.Е., Фашевский Д.П. Исследование и разработка устройства оперативного контроля содержания магнитного железа в горной массе//Сборник трудов КТУ, Кривой Рог 2002. - С. 74-80.

5. Патент №60612А. Україна МКИ G01N27/72 Пристрій оперативного контролю масової частини магнітного заліза у гірській масі. Азарян А.А., Дрига В.В., Демченко О.М., Цибилевський Ю.Є. Заявл. 14.01.2003. Опубл. 15.10.2003. Бюл.№10.

6. Патент №6225 Україна МКИ G01N27/72. Пристрій оперативного контролю масової частини заліза магнітного у гірській масі. Азарян А.А., Дрига В.В., Цибилевський Ю.Є., Кривенко А.Ю. Заявл. 13.12.2004. Опубл. 15.04.2005. Бюл.№4.

7. Домарев Д.С. Исследование влияния вещественного состава и структурно-текстурных особенностей магнетитовых роговиков Скелетатского месторождения на их физико-механические свойства: дис. ... канд. техн. наук / Домарев Д. С. – Кривой Рог, 1969 – 221 с.

8. Влияние вещественного состава и вторичных процессов на физико-механические свойства железистых пород Криворожского бассейна [Текст] / Р. И. Тедер, Д. С. Домарев. – М. : [б. и.], 1970. – 35 с.

9. Обогащаемость железных руд / [Богданова И. П., Нестерова Н. А., Федорченко Н. А., Грицай Ю. Л.]. - М.:Недра, 1989. - 158 с.

10. Патент №80707 Україна МПК G01V 3/18. Пристрій для магнітного каротажу геофізичних свердловин. Азарян А.А., Цибилевський Ю.Є., Шаров В.В., Юрко О.В., Лисовой В.Н. Заявл. 06.12.2004. Опубл. 25.10.2007, бюл. № 17

Рукопись поступила в редакцию 24.04.16

УДК 621.311.086.5: 621.3.001

В.А. КОЛЬСУН, канд. техн. наук, доц., А.А. ИВАШКО, И.А. ИУТИН, магистранты  
Криворожский национальный университет

## СОЗДАНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ В КУРС ИЗУЧЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ МОДУЛЯ «АВТОНОМНЫЙ ИНВЕРТОР НАПРЯЖЕНИЯ»

В статье приведены практические результаты по построению модуля «Автономный инвертор напряжения», для проведения лабораторных и исследовательских работ в условиях лаборатории. Вопросу улучшения качества знаний студентов с преобразовательной техники - уделяется все больше внимания. Качество знаний с преобразовательной техники определяет уровень квалификации будущих специалистов электротехнического направления, но возможности, которые предоставляются на данный момент ограничены в связи с моральным износом лабораторного оборудования. Таким образом, была поставлена задача, разработать модуль автономного инвертора напряжения, как одного из основных видов преобразователя. Исходя из последнего, задача, которая была поставлена, является актуальным и эффективным средством повышения качества знаний студентов в сфере преобразовательной техники.

**Ключевые слова:** преобразовательная техника, лабораторный стенд, инвертор напряжения, преобразователь частоты, ШИМ

**Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями.** Вопросу улучшения качества знаний студентов с преобразовательной техники - уделяется все больше внимания. Качество знаний с преобразовательной техники определяет уровень квалификации будущих специалистов электротехнического направления, но возможности, которые предоставляются на данный момент ограничены в связи с моральным износом лабораторного оборудования. Таким образом, была поставлена задача, разработать модуль автономного инвертора напряжения, как одного из основных видов преобразователя. Особенность которого, заключается в возможности исследования переходных процессов в каждом звене преобразователя, что позволит значительно улучшить процесс закрепления теоретических знаний эмпирическим методом.

**Анализ исследований и публикаций.** Рациональность создания модуля автономного инвертора напряжения для лабораторного комплекса по изучению преобразовательной техники можно обосновать только обзором уже существующих стендов и технических решений. Одним из таких решений по изучению преобразователей, является лабораторный стенд „Базис”. Данный стенд позволят проводить физическое моделирование большинства типовых схем преобразователей. Не смотря на рациональность применения данного решения в учебном процессе, он имеет и недостатки, одним из которых является его стоимость [9]. Исходя из последнего, задача, которая была поставлена, является актуальным и эффективным средством повышения качества знаний студентов в сфере преобразовательной техники.



**Изложение материала и результаты.** Проанализировав выше перечисленные проблемы обучения студентов, был изготовлен опытный образец стенда, в котором реализовано питание, измерения и внешняя система мониторинга и управления.

Но для проведения лабораторных работ требуется собрать силовую схему и управление, при этом был создан модуль преобразователя с базовым набором элементов и возможностью переконфигурации силовой части под потребности лабораторной работы.

Так были созданы два модуля: трехфазный выпрямитель и тиристорный регулятор напряжения.

На которых успешно был проведен ряд исследований, с целью определения недостатков модульного подхода к созданию преобразователей. Следующим этапом развития, было создание модуля преобразователя частоты.

Проанализировав существующие схемы преобразователей, было принято решение остановиться на схеме автономного инвертора напряжения (рис. 1) с использованием полностью управляемых ключей.

Аргументация данного выбора заключается в том, что эта топология часто используется и развивается в большинстве готовых промышленных образцах.

Для определения параметров силовых элементов инвертора, были сделаны некоторые допущения: максимальный амплитудный ток в силовых элементах не должен превышать 5А, напряжение в звене постоянного тока не должно превышать 200В.

Также, для лучшего восприятия силовой схемы студентами, все элементы выполнены в дискретном виде и расположены на плате в соответствии со схематической топологией.

В качестве силового ключа был использован полевой транзистор IRF840, обратный диод FR607, трехфазный драйвер силовых ключей IR2233S.

Также было принято решение, что LC-фильтр, должен быть расположен на плате, что позволит использовать силовую часть как активный выпрямитель, без переделки схемы.

В качестве сердечника индуктивности был взят феррит тороидальной формы на базе сердечника из распыленного железа, которые больше подходят для силовых цепей переменного тока.

Для управления изначально был выбран контроллер AtMega32, но по мере развития идеи и добавления новых запросов контроллер был изменен на STM32F103C8T6.

Замена контроллера позволила повысить сложность алгоритмов управления силовыми ключами, добавить обратные связи по току и напряжению.

С целью удешевления схемы не была сделана развязка земель управления и силовой части, что позволило упростить схему измерения напряжения, используя резистивный делитель и операционный усилитель по повторяющей схеме, с целью устранения помех, создаваемые процессами протекающими при преобразовании в АЦП микроконтроллера.

Измерения тока выполнены на микросхеме ACS712 с дальнейшим усилением и приведением к 3,3В.

Использование этой микросхемы дает свободу выбора для установки ее в схеме, так как она является изолированной и на модуле занимает совсем немного места.

На плате реализовано два импульсных преобразователя, один повышающий с 5В до 15В для питания драйвера силовых ключей и операционных усилителей, другой инвертирующий с 5В до -12В для питания операционных усилителей.

Для питания преобразователей было выбрано напряжение в 5В, с целью возможности подачи питания через USB-разъем.

При наладке платы возникла проблема: при подаче питания на плату потребляемый ток преобразователями был выше расчетного для микросхем MC34063, поэтому пришлось переделать преобразователь для реализации схемы с внешним транзистором, что позволило разгрузить микросхему и выйти на штатные параметры работы платы.

Но все равно при запуске платы требуется ток порядка 2А, дальше при работе ток потребляется в пределах 0,8А и этот нюанс необходимо учитывать при выборе источника питания модуля.

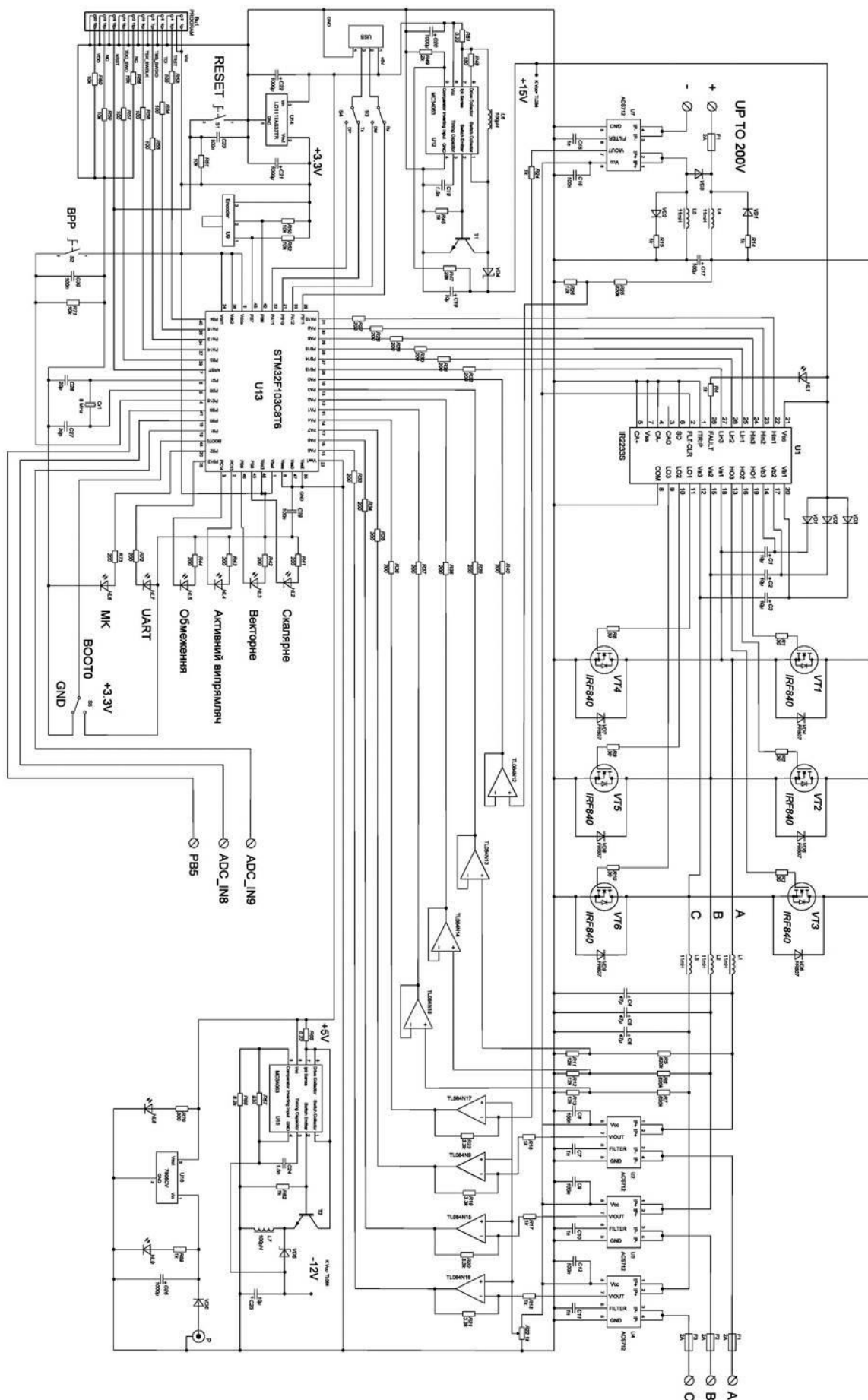


Рис. 1. Принципиальная схема модуля «Автономный инвертор напряжения»

За первоначальной задумкой, данный модуль, должен просто преобразовывать постоянное напряжение в переменное, по средством ШИМ модуляции, с возможностью изменения выходной частоты и напряжения по каналу связи UART. Но с заменой контроллера и продумыванием схемы, добавлялись разнообразные возможности которые позволяют реализовать управление двигателем от простого скалярного до наиболее сложного векторного без датчика скорости.

Также, для придания большей автономности модуля (рис. 2,3), были добавлены светодиодные индикаторы и пара кнопок.

Позволяющие непосредственно на модуле выбрать режим работы и отобразить какой из них сейчас активен: включить активный выпрямитель с регулированием выходного напряжения в заданных пределах, включить скалярный или же векторный алгоритм работы инвертора, а так же отобразить факт включения ограничения по току.

Еще одной из идей автономности модуля и расширения возможностей, является использование USB, что позволит непосредственно связать модуль с компьютером и задействовав специализированную программу, можно как выводить измеренные величины с контроллера, так и задавать параметры системы непосредственно на ходу.

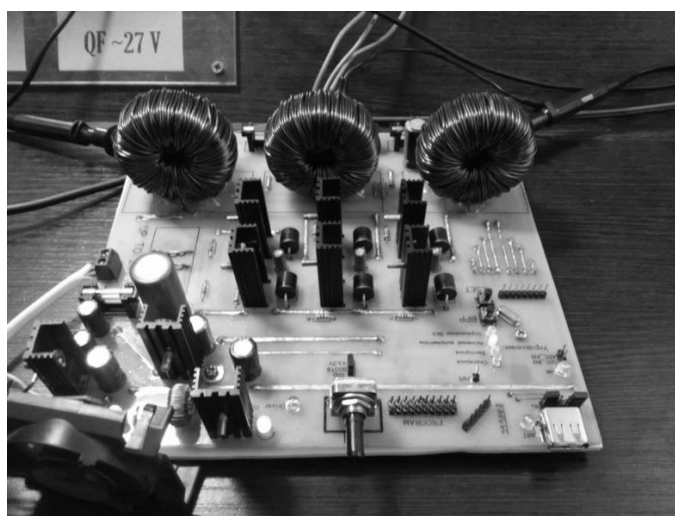


Рис. 2. Внешний вид модуля «Автономный инвертор напряжения» в работе

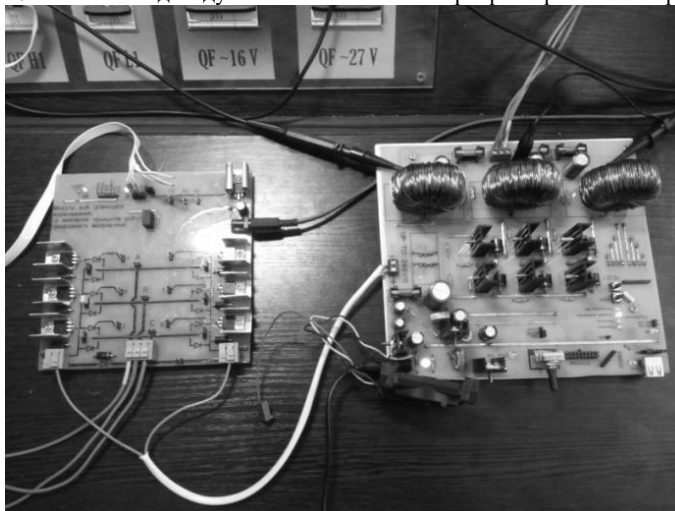


Рис. 3. Совместная работа модулей «Автономный инвертор напряжения» и «Выпрямитель»

Таким образом данный модуль позволяет покрыть потребности в изучении автономных инверторов в полной мере. Студент сможет пронаблюдать за работой инвертора со скалярным и векторным управлением. На базе этих наблюдений, он может сделать вывод о том, какой из типов управлений лучше будет подходить в разных ситуациях. Так же, может познакомиться с активным выпрямителем. Данный модуль, будет незаменимым для научных исследований в работах аспирантов и магистрантов.

**Выводы и направления дальнейших исследований.** На данный момент проходят испытания возможностей модуля и выявление недостатков, если таковые имеют место быть. В дальнейшем будет проходить расширение возможностей управления, путем добавления новых алгоритмов и доведения существующих с последующим увеличением быстродействия системы в целом.

#### Список литературы

1. **Виноградов А.С.** Математические основы векторного управления электроприводами переменного тока: метод. указания для самостоятельной работы студентов по курсу «Векторное управление электроприводами переменного тока» / А.Б. Виноградов, В.Л.Чистосердов; ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И.Ленина». – Иваново, 2004, – 40с.
2. **Архангельский Н.Л.** Формирование алгоритмов управления в частотно-управляемом электроприводе / Н.Л.Архангельский, В.Л.Чистосердов // -М. Электротехника. – 1994. –№3. –С. 48–52.
3. **Чехет Э.М.** Непосредственные преобразователи частоты для электропривода / Э.М.Чехет, В.П.Мордач, В.Н.Соболев. –Киев: Наук.думка,1988. – 224 с.
4. **Солонина А.И.** Основы цифровой обработки сигналов: Курс лекций Изд. 2-е испр. и перераб. / **Солонина А.И., Улахович Д.А., Арбузов С.М., Соловьева Е.Б.** –СПб.: БХВ-Петербург, -2005 - 768 с.
5. STM. Datasheet на контроллер STM32F103C8T6 [Электронный ресурс] / STM // ST. – 2015. – Режим доступа до ресурсу: <http://www2.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/33/d4/6f/1d/df/0b/4c/6d/CD00161566.pdf/files/CD00161566.pdf/jcr:content/translations/en.CD00161566.pdf>
6. Datasheet на микросхему IR2233S [Электронный ресурс] // IRF. – 201. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/ir2133.pdf>.
7. Datasheet на полевой транзистор IRF840 [Электронный ресурс] // FAIRCHILD. – 2014. – Режим доступа до ресурсу: <http://intranet.ctism.ufsm.br/gsec/Datasheets/IRF840.pdf>.
8. **Усольцев, А. А.** Частотное управление асинхронными двигателями: -учебное пособие / А.А. Усольцев. -СПб. : СПбГУ ИТМО, 2006. - 94с.
9. **Зіманков Р.В.** / Стенд фізичного моделювання перетворювачів / **Є.С. Біднов, Р.В. Зіманков** // Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт з галузі „Електротехніка та електромеханіка”. Збірник тез доповідей. / Дніпродзержинськ: ДДТУ. - 2015. – с. 82

Рукопись поступила в редакцию 12.04.16

УДК: 62 – 83: 629.423.1

О.Н. СИНЧУК, д-р. техн. наук, проф., И.В. КАСАТКИНА, канд. техн. наук, доц.,  
Криворожский национальный университет

Л.В. СМЕНОВА, соискатель,

Украинская государственная академия железнодорожного транспорта

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДВООСНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

Рассмотрены результаты моделирования переходных процессов в асинхронных двигателях тяговых двоосных электровазозов на математической модели по мгновенным и средним значениям, описываемых рекуррентными соотношениями, которые позволяют рассчитать мгновенные и средние значения координат соответствующие координатам измеренным датчиками.. Применение модели предлагаемой структуры и создание системы по средним значениям текущих электротехнических параметров тяговых асинхронных двигателей позволит избавиться от помех, влияющих на точность работы системы, и повысить ее надежность в целом.

**Ключевые слова:** тяговый привод, электровазоз, переходные процессы

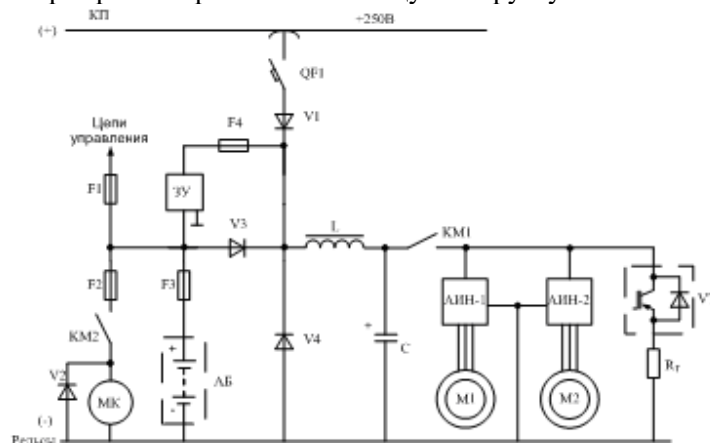
**Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями.** В рудниках и шахтах Украины функционируют более 3-х тысяч 20-ти типов и видов двоосных электровазозов, специально предназначенных для работы в подземных условиях и классифицируемых как рудничные [1].

К сожалению, все без исключения вышеотмеченные электровазозы устарели морально и физически [2]. Но все же главным «устаревшим» элементом в них является электромеханическая часть - тяговый электромеханический комплекс (ТЭМК), а точнее тяговый электропривод (ТЭП), который является энергонезэффективным, ненадежным и не технологичным [3-8].

**Анализ исследований и публикаций.** В последние годы возобновились работы по созданию безопасного в эксплуатации контактно-аккумуляторного типа электровозов с энергоэффективным тяговым электроприводом: IGBT- преобразователи (автономные инверторы напряжения (АИН)) - тяговые асинхронные электрические двигатели (ТАД) [9-13]. Как правило, платформой для этих новых типов являются базы 10-ти и 14 тонных машин.

Проведенные предварительные испытания экспериментального образца такого электровоза в шахте Родина ПАО «Криворожжелезрудком» подтвердили эффективность работы этого варианта двоосного рудничного электровоза в условиях железорудных шахт [10]. Вместе с тем, было установлено и рекомендовано службами эксплуатации этих предприятий для дальнейшей доработки их конструкции в направлении совершенствования эффективной работы наличие подсистемы (системы) мониторинга состояния электрических параметров слагаемых ТЭП [14].

**Постановка задачи.** Тяговый электропривод двоосных электровозов (рис. 1) представляет собой двухмодульный комплекс: источник питания - АИН-ТАД - колесная пара. Оба эти модуля «связаны» между собой через рельс и работают на общую нагрузку.



**Рис. 1.** Упрощенная электрическая схема двухосного рудничного контактно-аккумуляторного электровоза с тяговым асинхронным двигателем где: QF1 – вводной автоматический выключатель; V1 – заградительный диод; ЗУ – зарядное устройство; АБ – аккумуляторная батарея; КМ1, КМ2 – линейные контакторы; L, C – соответственно дроссель и конденсатор фильтра; АИН1, АИН2 – автономные инверторы; V3 – шунтирующий диод; V4 – запирающий диод; VT, Rт – соответственно тормозной «чоппер» и тормозной резистор; M1, M2 – тяговые асинхронные двигатели; МК – электрический двигатель компрессора; V2 – шунтирующий диод электрического двигателя компрессора; F1, F2, F3, F4 – предохранители

В силу изложенного, естественно, что эффективность функционирования тягового комплекса в целом будет определяться синхронностью работы каждого из двух его слагаемых модулей, в т.ч. близостью или идентичностью его электрических параметров и, прежде всего, тяговых электрических двигателей. Разница электрических параметров тяговых модулей электровоза может быть также следствием буксования или юза одной из двух колесных пар. К сожалению, рекомендуемая разница до 2% разброса этих показателей ТЭД на практике является редким исключением. Как показали исследования [10], на практике разница электрических параметров ТЭД рудничных электровозов лежит в пределах 7 – 18%. Безусловно, такой «разброс» приводит к разности частот вращения ТЭД с вытекающими отсюда последствиями перегрузки одного и недогрузки другого двигателя по току, т.е., очевидно, что для требуемого уровня функционирования тягового комплекса двоосного электровоза, необходим постоянный мониторинг состояния текущих электрических параметров тяговых двигателей и адекватная реакция со стороны СУ ТЭП по минимизации образовавшейся разницы.

Реальным вариантом решения этой проблемы будет создание и реализация СУ соответствующего алгоритма управления. Последний, в свою очередь, не может быть реализован без предварительных исследований реальных режимов поведения тягового комплекса, т.е. моделирования этого процесса. Прежде всего, это относится к моделированию процессов в ТАД.

**Изложение материала и результаты.** В течение цикла технологического функционирования в подземных выработках железорудных шахт электровоз превращается в чрезвычайно сложный динамический объект, который с большим трудом поддается математическому описанию, то есть математическому моделированию. Меж тем, задание авторов - это получение

для исследований модель, которая позволит проверить изменения процессов в ТАД с минимально возможными погрешностями.

Точность определения параметров ТАД в настоящее время достигается, как правило, применением известных методов оптимизации: множителей Лагранжа, вариационного исчисления, динамического программирования, принципа максимума, линейного программирования, симплексного метода, нелинейного программирования, геометрического программирования, метода наименьших квадратов, оптимальных наблюдателей [12]. Недостатком перечисленных методов является необходимость применения функциональных зависимостей, которые должны быть заранее известны. Выполнение большого числа математических действий при реализации перечисленных ранее методов - решении системы линейных или дифференциальных уравнений высокого порядка повышает требования к функциональным возможностям микропроцессорной вычислительной системы и усложнению программного обеспечения.

Для практической реализации системы идентификации и диагностики электрических параметров ТАД в реальном времени - слагаемых двухмодульных тяговых электрохимических систем рудничных электровозов целесообразна разработка методов с использованием нахождения минимального числа параметров по измеренным данным и оптимизацией их значений легко алгоритмически реализуемыми простыми способами, например, методом дихотомии.

С этой целью авторами разработан метод, который заключается в сравнении переходных процессов, полученных по измеренным координатам и рассчитанных на достаточно простой математической модели для условий рабочих режимов работы тягового электропривода электровоза [12].

Непрерывная математическая модель ТАД представляет собой многосвязную систему, которая содержит внутренние нелинейные обратные связи. Поэтому при синтезе с целью упрощения непрерывной системы используется математическая модель ТАД во вращающейся системе координат.

Для синтеза автоматических регуляторов и анализа динамических режимов замкнутых ТЭМК с асинхронными двигателями, синтезированными для векторного управления, используются двухфазные математические модели, которые адекватно отображают процессы, которые протекают в реальной машине. Наиболее общей формой математического описания двухфазных моделей есть система дифференциальных уравнений и уравнений связи, которые оперируют с токами и напряжениями в координатах  $\alpha - \beta$ , легко получаемыми из фазных координат [12]

$$\begin{aligned} U_{\alpha S} &= \frac{d\psi_{\alpha S}}{dt} + R_S I_{\alpha S} + \psi_{\beta R} \omega_K \\ U_{\beta S} &= \frac{d\psi_{\beta S}}{dt} + R_S I_{\beta S} + \psi_{\alpha R} \omega_K \\ 0 &= \frac{d\psi_{\alpha R}}{dt} + R_R I_{\alpha R} + \psi_{\beta R} (\omega_K - \omega) \\ 0 &= \frac{d\psi_{\beta R}}{dt} + R_R I_{\beta R} - \psi_{\alpha R} (\omega_K - \omega) \\ M &= \frac{3}{2} L_m A (\psi_{\alpha S} \psi_{\beta R} - \psi_{\beta S} \psi_{\alpha R}) \\ M \pm M_C &= J \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

где  $R_S$ ,  $R_R$  - активные, приведенные к статору сопротивления статора и ротора;  $L_S$ ,  $L_R$  - активные, приведенные к статору сопротивления статора и ротора;  $L_m$  - главная магнитная взаимная индуктивность статора и ротора;

$$A = \frac{1}{L_S L_R - L_m^2}, \quad (2)$$

где  $A$  - коэффициент асинхронного двигателя;  $J$  - момент инерции механизма.

В недвижной системе координат скорость обращения координатной системы  $\omega_K = 0$ , а выражение для напряжений примет вид

$$\begin{aligned} U_{\alpha S} &= U_m \cos \omega_S t = \sqrt{2} U_H \cos \omega_S t \\ U_{\beta S} &= -U_m \sin \omega_S t = -\sqrt{2} U_H \sin \omega_S t \end{aligned} \quad (3)$$

Токи статора  $I_{\alpha\beta S}$  и ротора  $I_{\alpha\beta R}$  с потокоцеплениями статора  $\psi_{\alpha\beta S}$  и ротора  $\psi_{\alpha\beta R}$  связаны соотношениями

$$\begin{aligned} I_{\alpha S} &= A(\psi_{\alpha S} L'_R - \psi_{\alpha R} L_m) \\ I_{\beta S} &= A(\psi_{\beta S} L'_S - \psi_{\beta R} L_m) \\ I_{\alpha R} &= A(\psi_{\alpha R} L_{SR} - \psi_{\alpha S} L_m) \\ I_{\beta R} &= A(\psi_{\beta R} L_{SR} - \psi_{\beta S} L_m) \end{aligned} \quad (4)$$

Дифференциальным уравнениям и уравнениям связей соответствует структурная схема ТЭМК в координатах  $\alpha\beta$  с ориентацией по току и потокоцеплению статора приведенная на рис. 2. Структура представляет собой нелинейную многосвязанную систему.

Для исследования замкнутых САР с приводами на базе ТАД с автономным инвертором напряжения целесообразно перейти к трем фазным значениям напряжений и токов, которые можно непосредственно измерить. Система дифференциальных уравнений примет вид

$$\begin{cases} U_a = \frac{d\psi_a}{dt} + R_S I_a \\ U_b = \frac{d\psi_b}{dt} + R_S I_b \\ U_c = \frac{d\psi_c}{dt} + R_S I_c \\ 0 = \frac{d\psi_{\alpha R}}{dt} + R_R I_{\alpha R} + \psi_{\beta R} \omega \\ 0 = \frac{d\psi_{\beta R}}{dt} + R_R I_{\beta R} - \psi_{\alpha R} \omega \\ \frac{3}{2} L_m A(\psi_{\alpha S} \psi_{\beta R} - \psi_{\beta S} \psi_{\alpha R}) \pm M_C = J \frac{d\omega}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

Уравнение связи фазных переменных с координатами  $\alpha, \beta$  и  $\omega_K = 0$  имеют вид

$$\begin{aligned} \psi_{\alpha S} &= \psi_a - 0.5(\psi_b + \psi_c) \\ \psi_{\beta S} &= \frac{\sqrt{3}}{2}(\psi_b - \psi_c) \\ \psi_S &= \sqrt{\psi_{\alpha S}^2 + \psi_{\beta S}^2} \end{aligned} \quad (6)$$

Фазные токи по математической модели ТАД в координатах АВС определяются [3] следующими соотношениями

$$\begin{aligned} I_a &= \frac{3}{2} I_{\alpha S} \\ I_b &= \frac{1}{\sqrt{3}} I_{\beta S} - \frac{1}{3} I_{\alpha S} \\ I_c &= -\frac{1}{\sqrt{3}} I_{\beta S} - \frac{1}{3} I_{\alpha S} \end{aligned} \quad (7)$$

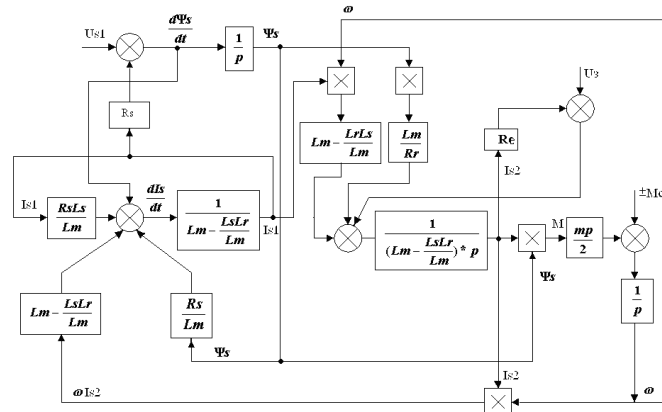


Рис. 2. Структурная схема тягового асинхронного двигателя в осях  $\alpha$ - $\beta$  с ориентацией по току статора

Переходные процессы по измеряемым координатам ТАД представлены на рис. 3-5.

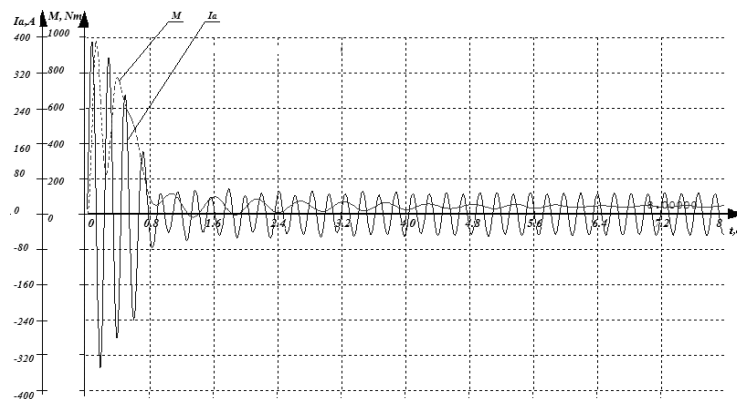


Рис. 3. Графики изменения во времени момента и тока статора тягового асинхронного двигателя при пуске

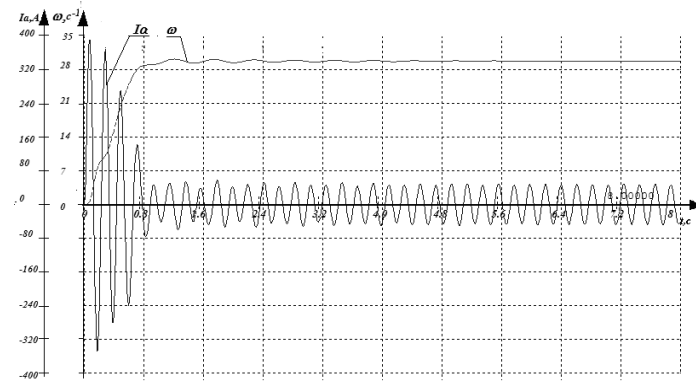


Рис. 4. Графики изменения во времени тока статора и скорости вращения тягового асинхронного двигателя при пуске

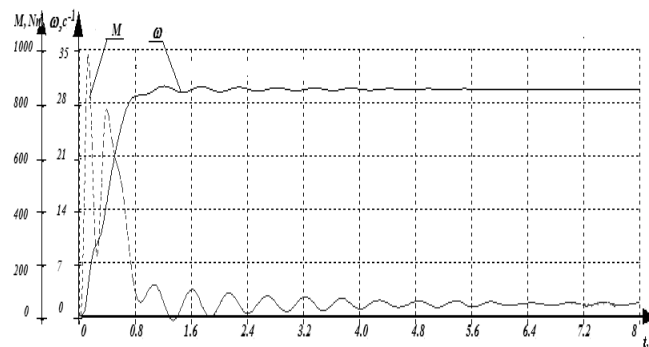


Рис. 5. Графики изменения во времени момента и тока статора тягового асинхронного двигателя при пуске

Уравнения возбуждения статора постоянным напряжением  $U_n$



$$\begin{aligned}\frac{dI_a}{dt} &= AL_r U_{II} - I_a AL_r (R_s + R_r \frac{L_m^2}{L_r^2}) + \psi_a AL_r \frac{R_r}{L_r} \\ \frac{d\psi_a}{dt} &= 1,5 R_r \frac{L_m}{L_r} I_a - \frac{R_r}{L_r} \psi_a \\ \frac{d\psi_\beta}{dt} &= -0,886 I_a R_r \frac{L_m}{L_r} - \frac{R_r}{L_r} \psi_\beta, \\ I_b &= -I_a\end{aligned}\quad (8)$$

Решение системы дифференциальных уравнений (8) позволяет получить информацию о токе и потокоцеплении статора в переходном процессе при двухфазном возбуждении постоянным током ТАД представлен на (рис. 6).

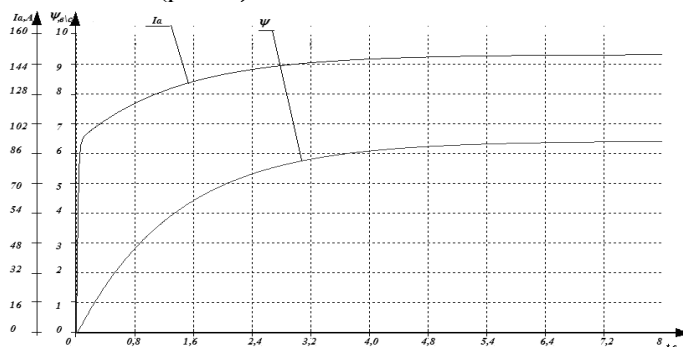


Рис. 6. Графики переходных процессов по току статора и потокоцеплению тягового асинхронного двигателя

**Выводы и направление дальнейших исследований.** По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

Разработанная математическая модель тягового асинхронного двигателя в комплексе тягового электромеханического комплекса - тягового электропривода по мгновенным и средним значениям, описываемая рекуррентными соотношениями позволяет рассчитать мгновенные и средние значения координат, соответствующие координатам, измеренным датчиками СУ ТАП.

Применение математической модели предлагаемой структуры и создание системы по средним значениям текущих электротехнических параметров тяговых асинхронных двигателей позволит избавиться от помех, влияющих на точность исследований, и повысить адекватность результата вычислений, а значит построить адекватный алгоритм работы СУ ТЭМК.

#### Список литературы

1. Дебелый В.Л. Основные направления развития шахтного локомотивного транспорта / В.Л. Дебелый, Л.Л. Дебелый, С.А Мельников // Уголь Украины. – 2006. – №6. – С.30-31.
2. Синчук О.Н. Перспективы развития шахтных (рудничных) электровозов с энергосберегающими видами тяговых электроприводов / О.Н. Синчук, С.В. Лебедин, И.О. Синчук, О.О. Удовенко, О.В. Пасько // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ: ЧНУ ім. В. Даля. – 2006. – № 8 (102). – С. 83-92.
3. Синчук О.Н., Устенко А.В., Сменова Л.В. Тяговый электромеханический комплекс шахтного двусосного электровоза с микропроцессорной системой диагностирования. Международный информационный научно-технический журнал «Локомотив-информ» - № 07 (85), 2013.
4. Кордаков В.Н., Анискин Б.Г., Лакота О.Б., Коржев А.А. Электровозный транспорт на горных предприятиях: Проблемы и их решения, Горные машины и автоматика, вып. 5, М.:Издательство «Новые технологии», 2003, с.13-15.
5. Пасько О.В. Комбинаторика схем тягового электропривода переменного тока. //Вестник национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Серия «Электротехника, электроника и электропривод». Выпуск 43.-Харьков.НТУ «ХПИ».-2004.с.121-125.
6. Bertil Oderg. Computer-controlled ore transportation at the LKAB mine inRurina-Sweden Information of ASEA.1997/-212p.
7. Lane Whale. New haulage level at Kurina, Sweden, has massive capacity. – Mining Journal, Jule, 1985.- vol.№6-122p.
8. Жабоев М.Н., Озеров М.И., Косинцев В.А., Чумак В.В. / Возможности совершенствования тягового привода контактных рудничных электровозов.//Электротехника.-1993.№5.
9. Степаненко В.П., Ванцлафф В., Дайнека Р. Разработка и испытание шахтных контактно-аккумуляторных электровозов // Уголь. – 1986. – №12. – С. 32-33.

10. **Сінчук О.М.** Випробування асинхронного тягового електромеханічного комплексу рудникового контактної-аккумуляторного електровоза / Сінчук І.О., Шокарев Д.А., Скапа Є.І.// Вісник Вінницького політехнічного університету, 2011. – Вип. №6. – С. 49 – 52. ISSN 1997-9266.

11. **Синчук О.Н.** Синергетическая система асинхронного электропривода контактно-аккумуляторного двухосного электровоза [Текст] /О.Н.Синчук, Д.А.Шокарев, И.О.Синчук//Научно-технический сборник «Електромеханічні і енергозберігаючі системи». -Кременчук:КрНУ,2011.-Випуск 2/2011(14).-31-34. ISSN 2072-2052.

12. **Черная В.О.** Моделирование возможностей возникновения псевдоаварийных и аварийных ситуаций в тяговых электротехнических комплексах двухосных электровозов [Текст] / В. О. Черная, Д.А.Михайличенко //Електромеханічні і енергозберігаючі системи.– 2011. – № 4(16). – С. 134–140. – ISSN 2074–9937.

13. **Шаповал В.П., Синчук И.О., Чорная В.О.** К проблеме электромагнитной совместимости тягового электропривода:IGBT-транзисторный инвертор – асинхронный двигатель.//Електромеханічні системи, методи моделювання та автоматизації. Збірник наукових праць VI Всеукраїнської науково-технічної конференції у м. Кременчук, квітень 2008р., с.61-65.

14. **Лебедин С.В., Зайцев И.Н., Пасько О.В.** Предварительные испытания опытного образца тягового электропривода переменного тока для рудничных электровозов.//Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Наукові праці КДПУ.-Кременчук:КДПУ,2005- Вип.4/2005(33) – с.111-115.

Рукопис постуила в редакцію: 16.03.16

УДК 621.316

А.О. АНТОНЕНКО, аспірант, Криворозький національний університет

## ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В статье рассматривается суть проблемы отклонения качества электрической энергии промышленных распределительных сетей от нормируемых значений. Целью работы является акцентирование внимания на вопросе недостаточной нормативной и технической баз, на основании которых крупные объекты промышленности проводят мероприятия по контролю и регулированию качества электрической энергии систем электроснабжения. Определено, что для снижения удельных энергозатрат и повышения энергоэффективности предприятия необходимо значительно повысить приоритетность энергоменеджмента в процессе планирования его работы, что в свою очередь, невозможно без эффективной и работоспособной системы контроля и регулирования основных параметров системы электроснабжения.

**Ключевые слова:** контроль качества электроэнергии, энергоэффективность, энергосбережение, показатели качества электроэнергии, мониторинг

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Качество электрической энергии (КЭ) должно соответствовать установленным нормативными документами требованиям, так как электроэнергия непосредственно используется при создании других видов продукции, оказывает существенное влияние на экономические показатели производства, качество выпускаемых изделий [1].

В последние годы в странах Европейского Союза ущерб потребителей электроэнергии и энергоснабжающих организаций от низкого качества электрической энергии (провалы напряжения, кратковременные и длительные перерывы электроснабжения, высшие гармоники, перенапряжения, фликер, короткие замыкания и проблемы электромагнитной совместимости) составил более 150 млрд евро [2].

**Анализ исследований и публикаций.** На данный момент в литературе обсуждаются различные способы организации систем мониторинга и контроля качества электрической энергии [7].

Были предложены методы измерений показателей качества электрической энергии [8]; способы и технологии увеличения показателей качества электроэнергии на предприятиях и распределительных сетях [9,10]. В данной работе рассматриваются вопросы, связанные с необходимостью контроля и регулирования качества электроэнергии систем электроснабжения; приводятся зависимости дополнительных потерь электроэнергии в питающей сети предприятия при несоответствии нормируемых показателей качества электроэнергии (ПКЭ), а также сформулированы основные положения по повышению эффективности работы систем мониторинга, контроля и регулирования ПКЭ.

**Цель исследований.** Определить основные составляющие структуры системы контроля электрической энергии промышленных распределительных сетей с целью повышения эффективности электропотребления предприятия.

**Изложение материала и результаты.** Рассматривая вопрос контроля и мониторинга основных параметров электрических распределительных сетей промышленных предприятий с точки зрения, как

нормируемых показателей качества электрической энергии, так и сопутствующих характеристик, уместно будет рассмотреть основные причины этих отклонений, а именно:

- неравномерность распределения нагрузки по отдельным фазам сети;
- короткие замыкания в распределительной сети;
- аварии в электрической сети;
- срабатывание средств защиты и автоматики;

переходные процессы, связанные с включением, отключением и работой мощных потребителей электроэнергии и др.

Показатели качества электрической энергии должны соответствовать требованиям ГОСТ 54149[3].

Основные показатели качества электроэнергии – частота и напряжение – находятся в прямой зависимости от баланса активных и реактивных мощностей в энергосистеме. Между изменениями частоты, напряжения и активных и реактивных мощностей в энергосистеме существует сложная взаимосвязь. В то же время изменения активной и реактивной мощностей по-разному сказываются на изменении частоты и напряжения. На изменение частоты основное влияние оказывает изменение баланса активных мощностей. Для поддержания стандартных значений частоты в энергосистеме в первую очередь необходимо обеспечить соответствующий этой частоте баланс активных мощностей; при росте активных нагрузок должна соответственно увеличиваться активная мощность генераторов. При этом не имеет значения, на какой электростанции будет увеличена генерация активной мощности, т.к. частота изменяется во всей энергосистеме одинаково [5].

В связи с этим существует необходимость оперативного контроля и регулирования ПКЭ питающей электрической сети. Пример функциональной схемы такой системы приведен ниже (рис. 1). Подобные системы имеют значительный диапазон функциональности. Так, требующие меньших капиталовложений, способны контролировать лишь некоторые основные параметры сети, а более дорогостоящие охватывают весь диапазон нормируемых ПКЭ, и при наличии соответствующего оборудования – компенсировать основные показатели параметров электрической энергии.

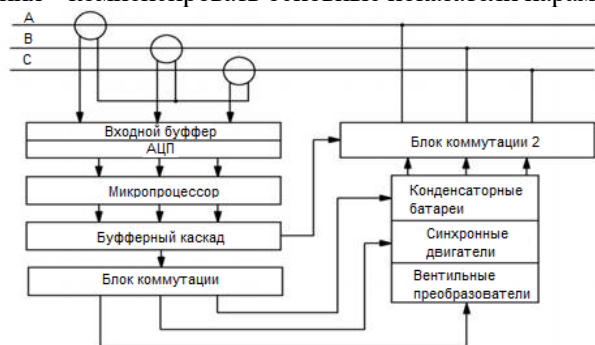


Рис. 1. Система контроля и управления параметрами электрической сети

Отклонение ПКЭ от нормируемых значений как локального, так и общесистемного характера ведет к неравномерности процессов электропотребления (ПЭ). Это усложняет процесс прогнозирования ПЭ, а следовательно снижает эффективность работы системы энергоменеджмента. Результатом такой тенденции является увеличение дополнительных потерь электрической энергии промышленным предприятием.

Ниже (рис. 2) приведены значения фактического и планового удельного расхода электроэнергии по подразделениям, и горнорудному предприятию в целом. По некоторым подразделениям наблюдаются значительные различия этих значений, что также объясняется неравномерностью ПЭ, связанными с отклонением ПКЭ.

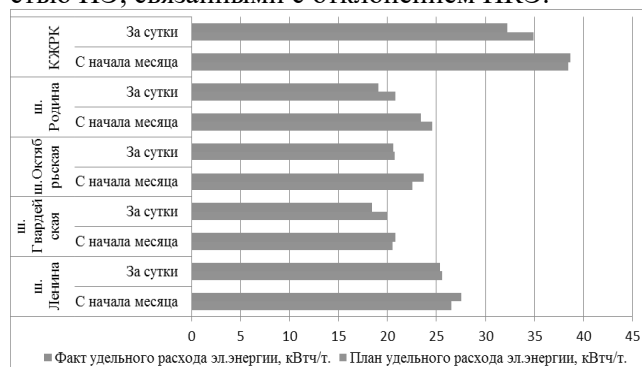


Рис. 2. Фактические и плановые значения удельного расхода электрической энергии по Криворожскому железорудному комбинату

Следовательно, можно выделить ряд мероприятий, связанных с вопросами контроля качества электроэнергии и энергоэффективности [4]:

измерение параметров электрических сетей для оценки эффективности их функционирования и разработки мероприятий по оптимизации режимов их работы;

применение автоматизированной системы контроля электроэнергии с учетом ее качества для анализа особенностей функционирования потребителей электроэнергии или электрических сетей;

анализ показателей качества электрической энергии в электрических сетях и разработка мероприятий по обеспечению их соответствия нормативным требованиям (внедрение фильтро-симметрирующих устройств, автоматических регуляторов напряжения, активных фильтров и т.д.);

расчет и анализ основных и дополнительных потерь в электрооборудовании и электрических сетях, обусловленных качеством электрической энергии, а также разработка рекомендаций по их снижению и повышению эффективности функционирования исследуемых объектов;

выполнение оценки влияния качества электроэнергии на работоспособность и ресурс работы электрооборудования;

выявление причин ухудшения качества электрической энергии и определение виновников ее ухудшения, а также и оценка величины причиненного ущерба как по отдельным показателям качества электрической энергии, так и по всему их спектру;

осуществление расчета экономического ущерба от снижения качества электрической энергии у поставщиков и потребителей;

разработка энергосберегающих мероприятия для отдельных потребителей электроэнергии и электрических сетей.

Технически создание системы мониторинга КЭ требуют больших инвестиций. При установке в сетевых компаниях приборов учета электроэнергии отсутствуют критерии не только оптимального выбора мест и количества установки средств измерений, но и принципы единства — часть приборов позволяет измерять ПКЭ, а часть нет, хотя подстанции, на которых они устанавливаются идентичны. В основном существуют возможности измерения только лишь количества проходящей электроэнергии, значений токов в присоединениях, где установлены приборы, напряжения в узлах и частоту в сети.

Ниже приведены технические задачи создания системы мониторинга КЭ [5]:

Прежде всего необходимо выбрать места установки средств измерения (СИ) с тем, чтобы по их результатам можно было оценить КЭ во всех узлах сети, которые можно рассматривать как точки общего присоединения. При этом необходимо использовать критерий выбора мест установки СИ.

Применение систем мониторинга КЭ ставит вопрос об объеме сохраняемой информации, что влияет как на размеры измерительного оборудования, так и на его стоимость. Например, средство измерения ПКЭ ЭРИС КЭ позволяет сохранять измеренную информацию и проведенные расчеты в энергонезависимой памяти прибора до двух лет, в зависимости от степени детализации измеряемых параметров.

Исключение хранения информации в самом приборе, либо передача информации для освобождения места. Наиболее надежный способ передачи измеренных значений на ЭВМ - это выделенный канал связи (Интернет) или канал единой сети связи электроэнергетики. В качестве резервных каналов связи можно использовать С8М-сеть, например, если С8М-модем встроен в прибор, либо используя внешнее подключение. Передачу измеренных данных можно осуществлять также по спутниковым каналам связи. Выбор между упомянутыми способами должен быть проведен на основании минимизации затрат.

Требование соответствующего регламента в части хранения всей информации, связанной с коммерческим учетом на рынке электроэнергии в течение 3,5 лет, что больше максимально возможного срока хранения информации в большинстве приборов, предопределяет использование телекоммуникационных средств для передачи и хранения информации вне прибора. Выбор между различными способами передачи информации должен быть проведен на основании минимизации затрат.

Хранение информации требует обеспечения защиты оборудования, программного обеспечения и данных от несанкционированного доступа на физическом и программном уровне. Например, участник оптового рынка должен предоставить контрольный доступ к результатам измерений, данным о состоянии объектов и средств измерений по запросу контролирующей организации (разграничение доступа к базам данных для разных групп

пользователей и фиксация в отдельном электронном файле всех действий пользователей с базами данных).

Проведение непрерывных измерений в сетях, содержащих резкопеременную и нелинейную нагрузку, при использовании отечественных приборов измерения ПКЭ, в соответствии с требованиями ГОСТ 54149, проблематично. Это связано с тем, что в программном обеспечении таких приборов применяются алгоритмы усреднения результатов расчетов. В результате пользователю будет доступна информация только о целочисленных гармониках. Внеся соответствующие изменения в программное обеспечение средств измерений, эта проблема будет снята.

Обеспечение защиты СИ от несанкционированного доступа к аппаратной части (разъемы, функциональные модули и т.д.).

Обеспечение возможности подключения резервного источника питания и автоматического переключения на источник резервного питания при исчезновении основного питания.

Резервирование каналов связи.

Внедрение подобных систем требует ежегодных затрат на их обслуживание. Автоматизированная измерительная система контроля качества электроэнергии является многоуровневой информационно-вычислительной системой с централизованным управлением и распределенной функцией выполнения измерений, количество уровней и архитектура построения которой определяются на стадии разработки технического задания и зависят от сложности и количества энергообъектов.

**Выводы и направления дальнейших исследований.** Появление приборной базы и внедрение в эксплуатационную практику нормативных документов по контролю и анализу качества электроэнергии создает предпосылки для организации системы контроля и анализа качества электроэнергии у поставщиков и потребителей электроэнергии и создания систем управления ПКЭ.

Для успешного решения задачи обеспечения КЭ необходимо:

разработать и закрепить единую политику применения систем и средств контроля КЭ, предусмотрев поэтапное оснащение электрических сетей промышленных предприятий необходимым парком стационарных и переносных устройств измерения КЭ;

разрабатывать более совершенные методики аттестации измерительных устройств КЭ;

регламентировать общие требования к средствам измерений КЭ в соответствующих нормативных документах;

обеспечить приемлемые цены на средства измерений.

Кроме указанного, необходимо повысить приоритетность энергоменеджмента в процессе планирования работы промышленного предприятия.

#### *Список литературы*

1. Управление качеством электроэнергии/ **Карташев И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г.** и др.; под ред. Шарова Ю.В. - М.: Издательский дом МЭИ, 2006.
2. CIRED, Vienna 21-24 May 2007, 19<sup>th</sup> International Conference on Electricity Distribution. Paper 0263. Roman Targosz (European Copper Institute - Poland), Jonathan Manson (JEL Consulting - United Kingdom).
3. ГОСТ 54149-2010 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
4. **Карташев И.И., Тульский В.Н., Подольский Д.С.** Современные задачи управления качеством электроэнергии. Энергоаудит №3, 2007 год.
5. **Судинова В.В., Пригода В.П., Хакимов Р.Р.** Принципы построения АИИС мониторинга ПКЭ и управления качеством электроэнергии. Промышленная энергетика, 2007, № 3.
6. Управление качеством электроэнергии / **Карташев И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г.** и др.; под ред. Шарова Ю.В. М.: Издательский дом МЭИ, 2006.
7. ГОСТ Р МЭК 61850-7-2-2009. Сети и системы связи на подстанциях. Часть 7. Базовая структура связи для подстанций и линейного оборудования. Раздел 2.
8. Методы измерений показателей качества электрической энергии. Научно испытательный центр «САМТЕС» 2009 г.
9. **Магомедов А. М., Герейханов Р. К.** Способ увеличения показателей качества электроэнергии на предприятиях и распределительных сетях.
10. Технологии повышения качества электроэнергии при ее передаче и распределении. Жак КУРО. 2005г.

Рукопись поступила в редакцию 26.04.16

## АНОТАЦІЇ

УДК 621.311.086.5:621.3.001

**Синчук О.Н., Гузов Э.С., Пархоменко Р.А., Харитонов А.А.** Оценка процессов потребления электрической энергии электроприемниками шахтных сетей в условиях неполноты информации

В статье приведены результаты исследований по оценке состояний процесса электропотребления в условиях неопределенности и неполноты информации с применением методов «сжатия» информации. Описанные процедуры дают возможность в условиях неопределенности и слабой информативности наблюдаемых признаков, обуславливающих процесс электропотребления, наиболее полно использовать исходную статистическую информацию для оценок, адекватно описывающих состояния режимов электропотребления. Предложено описание режимов электрических нагрузок для электроприемников с неоднородным характером работы в виде многоуровневой аддитивной модели.

**Сінчук О.М., Гузов Е.С., Пархоменко Р.О., Харитонов О.О.** Оцінка процесів споживання електричної енергії електроприймачів шахтних мереж в умовах неповноти інформації

У статті наведено результати досліджень з оцінки станів процесу електроспоживання в умовах невизначеності і неповноти інформації із застосуванням методів «стиснення» інформації. Описані процедури дають можливість в умовах невизначеності і слабкої інформативності спостережуваних ознак, що обумовлюють процес електроспоживання, найбільш повно використовувати вихідну статистичну інформацію для оцінок, що адекватно описують стани режимів електроспоживання. Запропоновано опис режимів електричних навантажень для електроприймачів з неоднорідним характером роботи у вигляді багаторівневої адитивної моделі.

**Sinchuk O., Guзов E., Parkhomenko R., Kharitonov O.** Assessment processes of electric energy consumption electroreceivers mine networks in conditions of incomplete information

The article presents the results of studies to assess the status of power consumption in the face of uncertainty and incomplete information using the methods of "compression" of information. Describes how to enable under uncertainty and weak informative observable characteristics that determine power consumption process, the fullest use of statistical information for the initial assessments that adequately describes the mode power consumption. A description of the electrical load conditions for power consumers with inhomogeneous nature of the work in the form of additive model.

УДК 622:621.31

**Фащиленко В.Н., Решетняк С.Н.** Обоснование исследования электромеханических резонансных процессов в разрушении горного массива

В работе представлено обоснование исследований электромеханических резонансных процессов протекающих при процессе разрушения горного массива на примере проходческого кобайна. До недавнего времени все резонансные явления в электромеханических системах горных машин являлись крайне вредными, и разрабатывалось достаточно большое количество способов по их гашению. Идея работы заключается в использовании энергии резонансных явления на разрушение горного массива. Эта проблема актуальна как для открытых, так и для подземных горных работ. Использование резонансных явлений в электромеханической системе исполнительного органа горного оборудования позволит разработать оборудование и значительно увеличить скорость разрушения горного массива, тем самым повысить энергоэффективность оборудования, что значительно скажется на себестоимости производимой продукции.

Однако при работе горного оборудования в режиме контролируемого резонанса, необходимо достаточно жестко контролировать эти режимы ввиду того что, бесконтрольный резонансный режим приводит к разрушению электромеханической системы горного оборудования, ремонт которого является достаточно затратным.

Решение представленной задачи позволит снизить себестоимость производства продукции, за счет снижения затрат на потребление электрической энергии, и повышения срока службы отдельных элементов конструкции проходческого комбайна.

**Фащиленко В.Н., Решетняк С.Н.** Обґрунтування дослідження електромеханічних резонансних процесів у руйнуванні гірського масиву

У роботі представлено обґрунтування досліджень електромеханічних резонансних процесів, які протікають при процесі руйнування гірського масиву на прикладі прохідницького кобайна. До недавнього часу всі резонансні явища в електромеханічних системах гірничих машин були надто шкідливими, і розроблялося досить велика кількість способів по їх гашенню. Ідея роботи полягає у використанні енергії резонансних явищ на руйнування гірського масиву. Ця проблема актуальна як для відкритих, так і для підземних гірничих робіт. Використання резонансних явищ в електромеханічній системі виконавчого органу гірничого обладнання дозволить розробити обладнання і значно збільшити швидкість руйнування гірського масиву, тим самим підвищити енергоефективність обладнання, що значно позначиться на собівартості виробленої продукції.

Однак при роботі гірничого обладнання в режимі контрольованого резонансу, необхідно достатньо жорстко контролювати ці режими огляду на те що, безконтрольний резонансний режим призводить до руйнування електромеханічної системи гірничого обладнання, ремонт якого є досить витратним.

Рішення представлені задачі дозволить знизити собівартість виробництва продукції, за рахунок зниження витрат на споживання електричної енергії, і підвищення терміну служби окремих елементів конструкції прохідницького комбайна.

**Fashilenko V., Reshetnyak S.** Rationale of the study the electromechanical resonance processes in the destruction of the mountain massif

Abstract: the paper presents the justification for the research based Electromechanical resonant processes occurring during the process of destruction of rock mass on the example of tunneling Cobain. Until recently, all the resonance phenomena in Electro-mechanical systems of mining machines was extremely harmful, and developed quite a number of ways according to

their cancellation. The idea is to use the energy of the resonance phenomena on the destruction of the mountain massif. This problem is relevant for both open and underground mining. The use of resonance phenomena in the Electromechanical system of the Executive body of the mining equipment will develop equipment and significantly increase the speed of failure of rock mass, thereby to increase the efficiency of equipment that would significantly affect the production costs.

However, if you run mining equipment in the controlled resonance to tightly control these modes due to the fact that uncontrolled resonant mode leads to the destruction of Electromechanical systems of mining equipment, the repair of which is quite costly.

The presented solution allows to reduce the cost of production, due to the cost reduction on the electrical consumption and increase the lifetime of individual structural components road headers.

УДК 621.311.086.5

**Степаненко В.П.** Повышение энергоэффективности и ресурсосбережения рудничного электровозного транспорта  
Рассмотрены способы повышения энергоэффективности и ресурсосбережения рудничного электровозного транспорта с использованием накопителей энергии. Определены энергоемкость, мощность и места размещения суперконденсаторных и гибридных накопителей на рудничном электровозном транспорте. Гибридные накопители рекомендуется устанавливать на электровозах при пиковых нагрузках в 4-7 раз превышающих среднее значение. Установлено, что применение накопителей энергии позволит уменьшить расход энергии на 15-20% и снизить капитальные затраты. Большая часть, примерно 10-12%, снижения расхода энергии будет получена в системе тягового электроснабжения. Снижение капитальных затрат будет достигнуто за счет уменьшения длины контактных сетей, количества подстанций и электровозов. Потери энергии на буксование за счет увеличения жесткости характеристик рудничных электровозов можно снизить на 3-5%.

**Степаненко В.П.** Підвищення енергоефективності та ресурсозбереження рудникового електровазного транспорту  
Розглянуто способи підвищення енергоефективності та ресурсозбереження рудникового електровазного транспорту з використанням накопичувачів енергії. Визначено енергоємність, потужність і місця розміщення суперконденсаторних і гібридних накопичувачів на рудниковому електровазному транспорті. Гібридні накопичувачі рекомендується встановлювати на електровазах при пікових навантаженнях в 4-7 разів перевищують середнє значення. Встановлено, що застосування накопичувачів енергії дозволить зменшити витрату енергії на 15-20% і знизити капітальні витрати. Велика частина, приблизно 10-12%, зниження витрати енергії буде отримана в системі тягового електропостачання. Зниження капітальних витрат буде досягнуто за рахунок зменшення довжини контактних мереж, кількості підстанцій і електровазів. Втрати енергії на буксування за рахунок збільшення жорсткості характеристик рудничних електровазів можна знизити на 3-5%.

**Stepanenko V. P.** Improvement of energy efficiency and resource saving mine electric locomotive transport  
Methods for increasing energy efficiency and resource saving mine electric locomotive transport using energy storage. Defined energy, power and placement supercondensators and hybrid drives for mine electric locomotive transport. Hybrid drives are recommended to be installed on the locomotives at peak loads in 4-7 times greater than the average value. It is established that the application of energy storage will reduce power consumption by 15-20% and reduce capital expenditures. The best part, approximately 10-12%, reducing power consumption is obtained in the traction electric supply system. Reduction of capital costs will be achieved by reducing the length of contact networks, number of substations and electric locomotives. Energy losses due to slipping due to the increase of stiffness characteristics of the mine electric locomotives can be reduced by 3-5%.

УДК 621.316.925:622.82

**Пирожено А.В., Пирожено Т.В., Петриченко А.А.** Експериментальне обґрунтування основних вимог до засобів захисного вимикання контактних мереж електровазної відкатки залізрудних шахт від пожежонебезпечних дугових замикань

Аналіз причин пожеж в наслідок дугових замикань в шахтних електричних мережах та електроустаткування показує, що біля половини з них припадає на контактну електровазну відкатку. Основною причиною критичного стану пожежної безпеки залізрудних шахт під час експлуатації електровазної відкатки слід вважати відсутність обґрунтованих вимог до засобів захисного вимикання контактних мереж від пожежонебезпечних дугових замикань що, в свою чергу, гальмує їх розробку. Відомі дослідження пожежобезпеки контактних мереж були виконані для умов вугільних шахт і не можуть бути поширені на залізрудні шахти, де, на відміну від вугільних, контактною відкаткою транспортується велика кількість вибухових речовин і існує реальна небезпека їх займання під час аварійних ситуацій в контактній мережі. Крім того, сучасні керовані напівпровідникові тягові перетворювачі мають значно більш жорсткішу вольт-амперну характеристику, внаслідок чого збільшилось значення постійної і знизилось значення змінної складових випрямленої напруги, що призводить до зниження величини мінімального струму, здатного підтримувати горіння дуги.

Для можливості проведення досліджень був розроблений спеціальний стенд, який дозволяє здійснити натурне моделювання дугових замикань. Визначені вольт-амперні характеристики електричної дуги при різних її довжинах. Встановлено, що мінімальний струм, при якому спостерігається стійке горіння дуги, складає 2-3 А при довжині дуги 5-10 мм.

Досліджувались найбільш легкозаймисті матеріали, що знаходяться у відкритих виробках: промаслена бумага бронеованого кабелю, дрібні дерев'яні тріски та найбільш небезпечні з точки зору займання - вибухові речовини. Отримані граничні струмочасові характеристики займання матеріалів, що випробувались. Визначена пожежобезпечна струмочасова характеристика, сформульовані основні вимоги до засобів захисного вимикання шахтних контактних мереж від пожежонебезпечних дугових замикань.

**Пироженко А.В., Пироженко Т.В., Петриченко А.А.** Экспериментальное обоснование основных требований к средствам защитного отключения контактных сетей электровозной откатки железорудных шахт от пожароопасных дуговых замыканий

Анализ причин пожаров в следствие дуговых замыканий в шахтных электрических сетях и электрооборудовании показывает, что около половины из них приходится на контактную электровозную откатку. Основной причиной критического состояния пожарной безопасности железорудных шахт во время эксплуатации электровозной откатки следует считать отсутствие обоснованных требований к средствам защитного отключения контактных сетей от пожароопасных дуговых замыканий что, в свою очередь, тормозит их разработку. Известные исследования пожаробезопасности контактных сетей были выполнены для условий угольных шахт и не могут быть распространены на железорудные шахты, где, в отличие от угольных, контактной откаткой транспортируется большое количество взрывчатых веществ и существует реальная опасность их возгорания во время аварийных ситуаций в контактной сети. Кроме того, современные управляемые полупроводниковые тяговые преобразователи имеют значительно более жесткую вольт-амперную характеристику, вследствие чего увеличилось значение постоянной и снизилось значение переменной составляющих выпрямленного напряжения, что приводит к снижению величины минимального тока, способного поддерживать горение дуги.

Для возможности проведения исследований был разработан специальный стенд, который позволяет осуществить натурное моделирование дуговых замыканий. Определены вольт-амперные характеристики электрической дуги при различных ее длинах. Установлено, что минимальный ток, при котором наблюдается устойчивое горение дуги, составляет 2-3 А при длине дуги 5-10 мм.

Исследовались наиболее легковоспламеняющиеся материалы, находящиеся в откаточных выработках: промасленная бумага бронированного кабеля, мелкие деревянные щепки и наиболее опасные с точки зрения возгорания – взрывчатые вещества. Полученные предельные токовременные характеристики воспламенения испытуемых материалов. Определена пожаробезопасная токовременная характеристика, сформулированы основные требования к средствам защитного отключения шахтных контактных сетей от пожароопасных дуговых замыканий.

**Pirozhenko A., Pirozhenko T., Petrichenko A.** Experimental substantiation of the basic requirements to means of protective disconnecting of contact networks of electric haulage of iron ore mines from arc circuit hazardous in respect of fire. Analysis of the causes of fires in the result of arc circuits in mining electrical networks and electrical equipment shows that about half of them are contact electric haulage. The main reason for the critical condition of fire safety iron ore mines during the operation of electric haulage should be considered a lack of justification of requirements to the means of protective disconnecting of the contact networks fire hazard from arcing faults, which, in turn, hinders their development. Well-known researches of fire-dangerous of contact networks were executed for the terms of coal mines and can not be widespread on iron-ore mines, where, unlike coal, a contact haulage is transport plenty of explosives and exists the real their ignition hazard during emergency situations in a contact network. In addition, the modern controllable semiconductor hauling traction converters have more hard current-voltage characteristics considerably, as a result the value of permanent increased and went down a value over of the variable component straightened tension, that brought to the decline of sizes of minimum current able to support burning of arc.

For research was developed by a special stand, which allowed the modeling of natural arc fault. Defined current-voltage characteristics of electric arc in various lengths. It is established that the minimum current at which there is a persistent arcing is 2-3 A when the arc length of 5-10 mm.

Was studied the most flammable materials that are in mine haulage: oiled paper armored cable, small wood chips and the most dangerous from the point of view of fire – explosives substances. We obtain limit time-current characteristics of the ignition of materials that were tested. Determined fireproof time-current characteristic, sets out the basic requirements for means of protective switching-off mine contact networks from flammable arcing circuit.

УДК 621.316.728

**Евтушенко Л.Г., Бялобржеський О.В.** Комбінована система керування асинхронним генератором з компенсацією реактивної потужності у вузлі електричної мережі

В роботі на підставі аналізу теоретичних підходів і технічних рішень, викладених у відомих публікаціях, поставлена задача розробки схеми управління асинхронним генератором. Генератор входить до складу комплексу з автономним інверторним перетворювачем, що забезпечує підтримку реактивного струму генератора (збудження), конденсаторним накопичувачем, інвертором веденим мережею для управління віддачею активної потужності. Обґрунтовано використання мережевого перетворювача (інвертора веденого мережею) комплексу генерації енергії для управління потоком активної і неактивної складових потужності, що призводить до зниження рівня неактивної потужності у вузлі мережі. Відзначено, що отримана структура системи має певну симетрію щодо конденсаторного накопичувача, як з графічної позиції, так і з позиції напрямки перетворення енергії реактивного характеру.

**Евтушенко Л. Г., Бялобржеский А.В.** Комбинированная система управления асинхронным генератором с компенсацией реактивной мощности в узле электрической сети

В работе на основании анализа теоретических подходов и технических решений, изложенных в известных публикациях, поставлена задача разработки схемы управления асинхронным генератором. Генератор входит в состав комплекса с автономным инверторным преобразователем, обеспечивающим поддержание реактивного тока генератора (возбуждения), конденсаторным накопителем, инвертором ведомым сетью для управления отдачей активной мощности. Обосновано использование сетевого преобразователя (инвертора ведомого сетью) комплекса генерации энергии для управления потоком активной и неактивной составляющих мощности, что приводит к снижению уровня неактивной мощности в узле сети. Отмечено, что полученная структура системы имеет определенную симметрию относительно конденсаторного накопителя, как с графической позиции, так и с позиции направления преобразования энергии реактивного характера.



**Evtushenko L., Bialobrzeski O.** Combined management system with asynchronous generator reactive power compensation in electrical network node

The paper based on the analysis of theoretical approaches and technical solutions contained in certain publications, tasked with developing asynchronous generator control circuit. The generator is part of a complex with an autonomous inverter-converter, providing maintenance of generator reactive power (excitation), capacitor bank, an inverter driven network to control active power efficiency. Justified using a network inverter (inverter slave network) complex power generation to control the flow of active and inactive components of the power, which leads to a reduction in the power level of inactive network node. It is noted that the resulting structure of the system has a certain symmetry about the condenser drive as a graphic position and from the position of the direction of energy conversion reactive nature.

УДК 311.1

**Берідзе Т.М.** Формування принципів і функцій стратегічного моніторингу в системі стратегічного управління підприємством

В статті наведені основні засади формування принципів і функцій стратегічного моніторингу в системі стратегічного управління підприємством. Зазначені функції та принципи, яким повинен відповідати стратегічний моніторинг, дозволяють окреслити основні завдання щодо формування стратегічного моніторингу в системі стратегічного управління підприємством.

**Беридзе Т.М.** Формирование принципов и функций стратегического мониторинга в системе стратегического управления предприятием

В статье приведены основные принципы формирования принципов и функций стратегического мониторинга в системе стратегического управления предприятием. Рассмотрены подходы к определению признаков классификации принципов системы мониторинга. Определено, что стратегический мониторинг экономического состояния предприятия нацелен на широкий класс принятия решений управленческого характера. Указанные функции и принципы, которым должен соответствовать стратегический мониторинг, позволяют определить основные задачи по формированию стратегического мониторинга в системе стратегического управления предприятием.

**Beridze T.** Formation principles and functions of strategic monitoring in strategic management now

In the article the basic principles of formation principles and strategic monitoring functions in the system of strategic management. Approaches to classification principles signs monitoring system. Determined that strategic monitoring economic performance is aimed at a broad class of managerial decisions and principles. These functions must meet strategic monitoring, can outline basic task of forming strategic monitoring system of strategic management.

УДК 621.314

**Жуйков В.Я., Осипенко К.С.** Особливості відбору енергії від вітрогенератора в перехідному режимі орієнтації на вектор вітрового потоку

В статті розглянуто забезпечення ефективної роботи Micro Grid за рахунок реалізації відбору максимальної енергії від вітрогенератора. Наведено еквівалентну схему системи електроживлення. Показано, що в процесі повороту лопатей і гондולי вітрогенератора необхідно узгоджувати еквівалентний внутрішній опір вітрогенератора, який складається з опору втрат вітрового потоку та внутрішнього опору електричного генератора, з опором навантаження. Для уточнення рівня енергії, яка може бути відібрана від вітрогенератора в процесі повороту лопатей та гондולי, запропонована еквівалентна схема джерела, в якій напруга еквівалентного джерела представляється лінійною функцією, а реакція ланки внутрішній опір-навантаження є функцією Гауса. При цьому величина еквівалентної напруги визначається з рівності потужності, яка може бути відібрана від вітрового потоку, та потужності джерела за умови роботи в режимі відбору максимальної енергії. Показано, що врахування лінійної зміни рівня енергії вітрового потоку і, відповідно, напруги еквівалентного джерела вітрогенератора в процесі повороту лопатей та гондולי дозволяє підвищити рівень енергії, що може бути відібрана від вітрогенератора.

**Жуйков В.Я., Осипенко К.С.** Особенности отбора энергии от ветрогенератора в переходном режиме ориентации на вектор ветрового потока

В статье рассмотрены обеспечения эффективной работы Micro Grid за счет реализации отбора максимальной энергии от ветрогенератора. Приведены эквивалентную схему системы электропитания. Показано, что в процессе поворота лопастей и гондолы ветрогенератора необходимо согласовывать эквивалентный внутреннее сопротивление ветрогенератора, который состоит из сопротивления потерь ветрового потока и внутреннего сопротивления электрического генератора, с сопротивлением нагрузки. Для уточнения уровня энергии, которая может быть отобрана от ветрогенератора в процессе поворота лопастей и гондолы, предложена новая эквивалентная схема источника, в которой напряжение эквивалентного источника представляется линейной функцией, а реакция звена внутреннее сопротивление-нагрузки является функцией Гаусса. При этом величина эквивалентной напряжения определяется из равенства мощности, которая может быть отобрана от ветрового потока, и мощности источника при работе в режиме отбора максимальной энергии. Показано, что учет линейной изменения уровня энергии ветрового потока и, соответственно, напряжения эквивалентного источника ветрогенератора в процессе поворота лопастей и гондолы позволяет повысить уровень энергии, который может быть отобрана от ветрогенератора.

**Zhuikov V., Osypenko K.** The features of wind generator maximum power selection in transient process of orientation on wind flow vector

In the article, the efficient operation of Micro Grid by implementing the wind generator maximum power selection is considered. An equivalent circuit of the power supply system is given. It is shown that in the process of wind generator blades and gondola rotation it is necessary to coordinate the wind generator equivalent internal resistance, which consists of wind flow loss resistance and electric generator internal resistance, with load resistance. To precise the level of power that can be selected from wind generator during the blades and gondola rotation, the source equivalent circuit is offered in which voltage is represented as a linear function, and response of "internal resistance - load resistance" circuit is the Gaussian function.

With this, the value of the equivalent voltage is determined from the equality of power, which can be selected from the wind flow, and source power, provided the operation in mode maximum power selection mode. It is shown that taking into account the linear variation of the wind flow power and, accordingly, the wind generators equivalent source voltage, in process of blades and gondola rotation allows to increase the level of power that can be selected from the wind generator.

УДК 621.311.086.5:621.3.001

**Синчук І.О., Гузов Э.С., Винник М.А.** О перспективах повышения эффективности функционирования комплекса: «электроснабжение – электропотребление» подземных железорудных предприятий

В статье приведены результаты исследований по анализу графиков электрических нагрузок приемников горнорудных предприятий с подземными способами добычи железорудного сырья. Показано различие и причины порождающие разницу форм графиков для тех или иных конкретных предприятий анализируемой отрасли промышленности. Определены приемники-регуляторы потребляемой электрической энергии в функции электроэнергобаланса того или иного предприятия. Предложены конкретные направления и ожидаемые уровни эффективности от их реализации в практику работы анализируемых видов железорудных предприятий.

**Синчук І. О., Гузов Е. С., Вінник М. А.** Щодо перспективи підвищення ефективності функціонування комплексу: «електропостачання - електроспоживання» підземних залізрудних підприємств

У статті наведено результати досліджень щодо аналізу графіків електричних навантажень приймачів гірничорудних підприємств з підземними способами видобутку залізрудної сировини. Показано відмінність і причини, що породжують різницю форм графіків для тих чи інших конкретних підприємств аналізованої галузі промисловості. Визначено приймачі-регулятори споживаної електричної енергії у функції електроенергобалансу того чи іншого підприємства. Запропоновані конкретні напрямки та очікувані рівні ефективності від їх реалізації в практику роботи аналізованих видів залізрудних підприємств.

**Sinchuk I.O., Guзов E. S., Vinnik M. A.** About prospects of efficiency increase the functioning of the complex: «electricity – consumption» underground iron ore mines

The article presents the results of studies on the analysis of graphs of electrical loads of the receivers of the mining enterprises with underground methods of mining iron ore. Shows the difference and the causes generating the difference of the shapes of graphs for certain specific enterprises of the analyzed industry. Identified receivers-controllers power consumption in function of electricity balance of an enterprise. Proposed specific areas and expected levels of performance from their implementation in practice of work of analyzed species of iron ore mines.

УДК 621.311:621.331

**Розен В.П., Демчик Я.М.** Порівняльний аналіз методів прогнозування споживання електроенергії виробничих систем

В даній статті досліджується використання методів експоненціального згладжування прогнозування споживання електричної енергії підприємства харчової галузі. Основною метою являється дослідження впливу експоненціального згладжувань на прогнозування електроспоживання та точність при різних показниках згладжування. Використання сучасних способів збору інформації дозволяє приймати точні рішення. В цій статті представлено різні методи прогнозування з використанням статистичних даних отриманих за допомогою пристроїв збору даних. Дане дослідження дозволить використовувати методи в простому прогнозуванні при використанні статистичних інструментів. Результати можуть використовуватися в електроенергетиці при попередньому прогнозуванні споживання електроенергії. Запропоновані методи показують як правильно використовувати моделі експоненціального згладжування та які з них являються найбільш точнішими.

**Розен В.П., Демчик Я.М.** Сравнительный анализ методов прогнозирования потребления электроэнергии производственных систем

В данной статье исследуется использование методов экспоненциального сглаживания прогнозирование потребления электрической энергии предприятиями пищевой отрасли. Основную целью является исследование воздействия экспоненциального сглаживания на прогнозирование электропотребление и точность при разных показателях сглаживания. Использование современных способов сбора информации позволяет принимать точные решения. В этой статье представлено разные методы прогнозирования с использованием статистических данных полученных с помощью приборов сбора данных. Данное исследование позволит использовать методы в простом прогнозировании при использовании статистических инструментов. Результаты могут быть использованы в электроэнергетике при предыдущем прогнозировании потребления электроэнергии. Предложенные методы показывают как правильно использовать модели экспоненциального сглаживания и которые из них являются наиболее точными.

**Rosen V., Demchik Y.** Comparative analysis of methods of forecasting of electricity consumption of production systems

This article examines the use of exponential smoothing methods for forecasting electrical energy consumption of the enterprises of the food industry. The main objective is to study the impact of exponential smoothing for forecasting of power consumption and accuracy at different rates of smoothing. The use of modern methods of gathering information to enable accurate decisions. This article presents the different forecasting methods using statistical data obtained by data capture devices. This study will allow to use simple methods in forecasting using statistical tools. The results can be used in the power industry in the preliminary forecasting of electricity consumption. The proposed methods show how to use exponential smoothing models and which ones are the most accurate.

УДК 621.337.41

**Синчук О.Н., Черная В.О., Черный В.О., Пироженов А.В.** Моделирование электрических переходных процессов в элементах защиты широтно-импульсных преобразователей напряжения тяговых электротехнических комплексов постоянного тока

В статье рассмотрены способы защиты транзисторных модулей широтно-импульсных преобразователей в структурах тяговых электротехнических комплексов. Предложена схема защиты силовых модулей от превышения тока. Приведены результаты моделирования аварийных ситуаций в тяговых полупроводниковых преобразователях и схем их защиты.

**Сінчук О.Н., Черная В.О., Черный В.О., Пирожено А.В.** Моделирование электрических переходных процессов в элементах защиты широтно-импульсных преобразователей напряжения тяговых электротехнических комплексов постоянного тока

У статті розглянуто способи захисту транзисторних модулів широтно-імпульсних перетворювачів в структурах тягових електротехнічних комплексів. Запропоновано схему захисту силових модулів від перевищення струму. Наведено результати моделювання аварійних ситуацій в тягових напівпровідникових перетворювачах і схем їх захисту.

**Sinchuk O., Chorna V., Chorny V., Pyrozhenko A.** Modeling electrical transients in the security element a pulse width voltage converter traction electrical complex direct current

The article deals with ways of protecting the transistor modules, pulse width of traction converters in the structures of electrical systems. Existing types of modern protection elements of semiconductor converters help to prevent the development of disturbances in the power of the electric traction chain, but does not provide complete protection because they do not fully adapted to the conditions and modes of operation on the electric rolling mine shafts. One of the significant drawbacks of modern methods of protection of power IGBT modules, which constrain their widespread introduction on mine locomotives are their high weight and size and cost parameters. The proposed schematic solution to protect the power module from the emergency operation allows for minimal changes in the structure of the transducer achieve maximum benefit from protection in the event of the emergence and development of the disturbance. The results of the simulation of emergencies in semiconductor converters of traction and protection schemes.

УДК 621.311.4.031

**Сінчук О.М., Бойко С.М., Юрченко М.М.** До можливостей розбудови систем електропостачання підприємств гірничо-видобувного комплексу з включенням в їх структуру вітроенергетичних комплексів

У статті розглянуто потенціал альтернативних джерел енергії підприємств гірничо-видобувного комплексу. Обґрунтовано використання електромеханічних вітроенергетичних комплексів в системах електроживлення підприємств гірничо-видобувного комплексу. Запропоновано впровадження локальних систем в комплекс структур мереж електроживлення підприємств гірничо-видобувного комплексу на базі відновлювальних джерел енергії.

**Синчук О. Н., Бойко С. Н., Юрченко Н.Н.** К возможностям развития систем электроснабжения предприятий горно-добывающего комплекса с включением в их структуру ветроэнергетических комплексов

В статье рассмотрен потенциал альтернативных источников энергии предприятий горно-добывающего комплекса. Обосновано использование электромеханических ветроэнергетических комплексов в системах электропитания предприятий горно-добывающего комплекса. Предложено внедрение локальных систем в комплекс структур сетей электропитания предприятий горно-добывающего комплекса на базе возобновляемых источников энергии.

**Sinchuk O., Boiko S., Yurcnenko N.,** The possibilities of development of power supply systems of enterprises of mining complex with the inclusion in their structure of wind power complexes

The article examines the potential of alternative energy sources mining and production complex. It justifies the use of electromechanical wind energy systems of power supply of enterprises of the mining complex. The proposed implementation of local systems into the complex structures of networks of power supply enterprises of the mining complex on the base of renewable energy sources.

УДК: 621.316.1.027

**Кутін В.М., Кутіна М.В.** Математична модель визначення роботоздатності ізоляції роз-подільних мереж постійного струму та її аналіз

Запропонована діагностична модель роботоздатності ізоляції двопровідних мереж постійного струму, які використовуються в промисловості і на транспорті. Визначені умови роботоздатності ізоляції шляхом аналізу перехідної характеристики струму через шунтувальний зв'язок, який модулює тіло людини. Шляхом аналізу запропонованої моделі визначено оптимальну функціональну характеристику для пристрою захисного вимикання. Отримано умови обмеження струму в перехідному і сталому режимі, а також опору ізоляції полюсів відносно землі при симетричному її зниженню. Показано, що ємність мережі постійного струму впливає лише на час існування перехідного процесу при дотику людини до струмоведучої частини. Струм через тіло людини має максимальну величину в перший момент дотику. Час дії електричного струму не обмежується сумарним часом спрацювання пристрою захисного вимикання та комутаційного апарата, що вимикає джерело живлення. Час протікання струму визначається ще й часом існування зворотної е.р.с. вимкнених двигунів постійного струму навантаження, а значення струму визначається законом зміни спадання е.р.с. електродвигунів постійного струму, що обертається. Функціональна характеристика пристрою захисного вимикання побудована за визначеними умовами роботоздатності ізоляції і виключає невіправдані вимикання високопродуктивних машин і механізмів.

**Кутин В.М., Кутина М.В.** Математическая модель определения работоспособности изоляции распределительных сетей постоянного тока и ее анализ

Предложенная диагностическая модель работоспособности изоляции двухпроводных сетей постоянного тока, которые используются в промышленности и на транспорте. Определены условия работоспособности изоляции путем анализа переходной характеристики тока через шунтирующую связь, модулирующую тело человека. Путем анализа предложенной модели определена оптимальная функциональная характеристика для устройства защитного отключения. Получены условия ограничения тока в переходном и установившемся режиме, а также сопротивления изоляции полюсов относительно земли при симметричном ее снижении. Показано, что емкость сети постоянного тока влияет только на время существования переходного процесса при прикосновении человека к токоведущим частям.

Ток через тело человека имеет максимальную величину в первый момент соприкосновения. Время действия электрического тока не ограничивается суммарным временем срабатывания устройства защитного отключения и коммутационного аппарата, выключающего источник питания. Время протекания тока определяется еще и существованием обратной ЭДС отключенных двигателей постоянного тока нагрузки, а значение тока определяется законом изменения падения ЭДС электродвигателей постоянного тока, вращается. Функциональная характеристика устройства защитного отключения построена по определенным условиям работоспособности изоляции и исключает неоправданные выключения высоко-производительных машин и механизмов.

**Kutyn V., Kutyna M.,** Mathematical model for determining performance isolation distribution setjan dc and its analysis

The proposed diagnostic model insulation performance two-wire DC networks, which are used in industry and transport. The conditions of the insulation performance by analyzing the transient response of the current through the shunt connection modulating the human body. By analyzing the proposed model is defined optimal performance for protective device. Obtain current limiting conditions in the transient and steady-state and insulation resistance with respect to the Earth's poles in symmetric reducing it. It is shown that the capacity of the DC network effect only for the duration of the transition process at the touch of a person to live parts. The current through the human body has a maximum value at the first point of contact. electric current time is not limited to the total operating time of protective device, and the switching device turns off the power supply. current flow time is also determined by the existence of back EMF motor dis-connected DC load current, and the current value is determined by the law of variation fall EMF DC motor rotates. Functional characterization of protective device is based on the specific conditions of isolation efficiency and eliminates unnecessary high off the machinery.

УДК 622.625.28-83

**Омельченко О.В., Удовенко О.О., Сіянюк Р.В.** До питання використання двофазних асинхронних двигунів в тягових електроприводах шахтних контактних електровозів

У статті викладені результати досліджень в напрямку пошуку і створення сучасного за структурою та енергоефективного за видом тягового електроприводу для рудникових контактних електровозів. Приведена порівняльна оцінка варіантів можливих структур тягових асинхронних приводів, відмінність яких в основному полягає в будові і характеристиках інверторів напруги електроприводу. Запропоновано перспективне схемотехнічне рішення тягового електроприводу змінного струму варіантом IGBT-інвертор – двофазний асинхронний електричний двигун. Така структура в порівнянні з трифазним варіантом має ряд переваг: менший обсяг на 35%, удвічі менші втрати електроенергії, вартість комплектуючих менше на 10%, надійність вище на 33%. Поміж тим для вирішення проблеми енергоефективності пропонується використовувати метод ШІМ для керування перетворювачем за законом трапеції, так як він володіє меншим спотворенням в порівнянні з іншими розглянутими законами управління.

**Омельченко А.В., Удовенко О.А., Сіянюк Р.В.** К вопросу использования двухфазных асинхронных двигателей в тяговых электроприводах шахтных контактных электровозов

В статье изложены результаты исследований в направлении поиска и создания современного по структуре и энергоэффективного по виду тягового электропривода для рудничных контактных электровозов. Приведена сравнительная оценка вариантов возможных структур тяговых асинхронных приводов, отличие которых в основном состоит в строении и свойствах инверторов напряжения электропривода. Предложено перспективное схемотехническое решение тягового электропривода переменного тока вариантом IGBT-инвертор - двухфазный асинхронный электрический двигатель. Такая структура по сравнению с трехфазным вариантом имеет ряд преимуществ: меньший объем на 35%, вдвое меньшие потери электроэнергии, стоимость комплектующих меньше на 10%, надежность выше на 33%. Между тем для дальнейшего улучшения проблемы энергоэффективности предлагаемого поводу рекомендуется наиболее приемлемый закон управления ШИМ инвертора - закон трапеции, так как он обладает меньшим искажением по рассмотренным другим законам управления.

**Omelchenko O., Udovenko O., Siyanko R.** On the question of the use of two-phase asynchronous motors in the traction electric drive mining electric locomotive

The article presents the results of research in the direction of the search and creation of a modern and energy-efficient structure by type of traction electric drive for mine electric contact. The comparative assessment of options of possible structures of asynchronous traction drive, which differ mainly consists in the structure and properties of the electric voltage inverters. Proposed perspective circuit solutions traction electric option AC IGBT-inverter - a two-phase asynchronous electric motor. This structure compared with a three-phase embodiment has several advantages: 35% less volume, is twice smaller power losses, component cost 10% less, higher reliability of 33%. Meanwhile, to further improve the energy efficiency of the proposed problems about the most appropriate recommended PWM inverter control law - the law of the trapezoid, as it has less distortion by considering other control laws.

УДК 621.314.632

**Кольсун В.А., Рыженков Д.В., Макодьоб В.М., Кулик О.М.** Аналіз та дослідження енергетичних характеристик перетворювача частоти стосовно мережі живлення фотоелектричної сонячної станції

У статті досліджено енергетичні показники мережі живлення за умови наявності інверторів фотоелектричних сонячних станцій. Розраховані функції струму та напруги трифазних випрямлячів з нелінійним навантаженням. Проведена порівняльна характеристика енергетичних показників мережі живлення без використання фільтро-компенсаційних пристроїв та з активними фільтрами.

**Кольсун В.А., Рыженков Д.В., Макодьоб В.Н., Кулик О.Н.** Анализ и исследования энергетических характеристик преобразователя частоты сети питания фотоэлектрической солнечной станции

В статье исследованы энергетические показатели сети питания при условии наличия инверторов фотоэлектрических солнечных станций. Рассчитаны функции тока и напряжения трехфазных выпрямителей с нелинейной нагрузкой. Проведена сравнительная характеристика энергетических показателей сети питания без использования фильтро-компенсирующих устройств и с активными фильтрами.

**Kolsun V., Ryzhenkov D., Makodzob V., Kulik O.** Analysis and study of energy characteristics of the frequency converter in relation to the power supply photovoltaic solar plant

In the article the energy performance mains subject to the availability of inverters photovoltaic solar plants. Calculated features current and voltage three-phase rectifier with a nonlinear load. Comparative characteristics of the energy performance of the power supply without the use of filter-compensating devices and active filters.

УДК 621.771:517.9

**Ляшенко В.П., Аниськов О.В.** Математична модель прокатки тонкої і надтонкої стрічки із тугоплавких і важкодеформованих металів

У роботі проведено аналіз особливостей технології виготовлення стрічки із тугоплавких і важкодеформованих металів. Запропоновано математичні моделі для визначення енергосилових параметрів процесу плющення (прокатки) тонкої і надтонкої стрічки із тугоплавких і важкодеформованих металів, які дозволяють враховувати силову дію інструмента, зокрема валків прокатного стану, та температурне поле зони підведення струму до стрічки. Розглянута узагальнена та спрощені математичні моделі. Проведені чисельні експерименти та побудовані, на основі розв'язків спрощених задач, температурні розподіли зони дії струму.

**Ляшенко В.П., Аниськов А.В.** Математическая модель прокатки тонкой и сверхтонкой ленты из тугоплавких и трудно деформируемых металлов

В работе проведен анализ особенностей технологии изготовления ленты из тугоплавких и труднодеформируемых металлов. Предложены математические модели для определения энергосиловых параметров процесса прокатки (прокатки) тонкой и сверхтонкой ленты из тугоплавких и труднодеформируемых металлов, которые позволяют учитывать силовое воздействие инструмента, в частности валков прокатного стана, и температурное поле зоны подвода тока к ленте. Рассмотрена обобщенная и упрощенные математические модели. Проведенные многочисленные эксперименты и построены на основе решений упрощенных задач, температурные распределения зоны действия тока.

**Lyashenko V., Aniskov O.** Mathematical model of fine and superfine tape rolling from heat resistant and hard-to-deform metals

The article is devoted to the analysis of manufacturing technologies characteristics of tape from heat resistant and hard-to-deform metals. Mathematical models for defining energy-power parameters of rolling fine and superfine tape from heat resistant and hard-to-deform metals are represented which allow considering the tool force action including mill roll the heat of current supply zone. Generalized and simplified mathematical models are considered. A number of experiments are held on the basis of simplified problems solutions, heat distribution of the current zone.

УДК 622.625.28-83

**Синчук И.О., Семочкин А.Б., Федотов В.А.** О принципах минимально соударяемого и максимально точного управления перемещением вагонеток рудничных электровозосоставов

При разгрузке-погрузке шахтный электропоезд передвигается рывками, при этом в сцепных устройствах возникают удары, снижающие их срок службы, а точность позиционирования оставляет желать лучшего. В работе авторами выявлены закономерности движения поезда, и выведено выражение, позволяющее с минимальными ударами в сцепках рассчитывать перемещение вагонетки в функции тахограммы скорости электровоза, а также наличия руды в вагонетках. Точность позиционирования вагонеток при перемещении на 0,6 м составляет для 1-й вагонетки не более 4%, а для восьмой вагонетки – не более 13%.

**Синчук І.О., Сьомочкін А.Б., Федотов В.А.** Про принципи мінімально соударяючихся і максимально точного управління переміщенням вагонеток рудникового електровозосоставов

При розвантаженні-вантаженні шахтний електропоїзд пересувається ривками, при цьому в зчепних пристроях виникають удари, що знижують їх термін служби, а точність позиціонування залишає бажати кращого. У роботі авторами виявлені закономірності руху поїзда, і виведено вираз, що дозволяє з мінімальними ударами в зчепленні розраховувати переміщення вагонетки в функції тахограми швидкості електровоза, а також наявності руди в вагонетках. Точність позиціонування вагонеток при переміщенні на 0,6 м становить для 1-ї вагонетки не більше 4%, а для восьмий вагонетки - не більше 13%.

**Sinchuk I., Syomochkin A., Fedotov V.** About the principles of a minimum collide and a maximum of accurately control of the movement of trolleys of mine electrical locomotives

The mining train moves jerkily during loading and unloading, that is leading to the strokes in the coupling devices reducing their service life, and the positioning accuracy is poor. The authors of this science work discovered the regularities in the movement of the mining trains. They derived the formula that allows with a minimal impacts to the hitch calculate the movement of the trolleys in dependence of the function tachograms locomotive speed, as well as the presence of ore in trolleys. Positioning accuracy when moving the trolleys by 0.6 m is for 1st trolley no more than 4%, and for the eighth trolley - not more than 13%.

УДК 622.625.28-83

**Семочкин А.Б., Федотов В.А., Сменова Л.В.** Анализ математических подходов для решения задачи точности позиционирования вагонеток рудничных электровозосоставов при погрузочно разгрузочных операциях

В статье рассмотрены вопросы уменьшения времени погрузки-разгрузки электровозосоставов в специфических условиях железорудных предприятий с подземными способами ведения горных работ. Установлено, что при погрузочно-разгрузочных операциях, на которые приходится большая часть цикла движения электровозосоставов в подземных горных выработках, электропоезд передвигается рывками, при этом зазоры в сцепных устройствах ухудшают точность позиционирования вагонеток под погрузочными люками, а, следовательно, увеличивают время выполнения этой технологической операции и, кроме того, вызывают удары, снижающие срок службы слагаемых составов. Авторами проведен сравнительный анализ различных математических подходов для решения задачи минимиза-

ции этого вида ударов путем создания соответствующего алгоритма управления тяговой электромеханической системой электровоза. В числе анализируемых методы: длинноволнового приближения цепочки связанных осцилляторов, идентификации объекта управления, теории планирования экспериментов, нечеткого и нейросетевого регулирования. Установлено, что из исследуемого перечня методов следует исключить метод нечеткого управления, а остальные подходы подлежат более глубокой проработке для достижения поставленной цели.

**Сьомочкін А.Б., Федотов В.А., Сменова Л.В.** Аналіз математичних підходів для вирішення завдання точності позиціонування вагонеток рудничних електровозосоставов при вантажно розвантажувальних операціях

У статті розглянуті питання зменшення часу завантаження-розвантаження електровозосоставов в специфічних умовах залізничних підприємств з підземними способами ведення гірських робіт. Встановлено, що при вантажно-розвантажувальних операціях, на які припадає більша частина циклу руху електровозосоставов в підземних гірничих виробках, електропоїзд пересувається ривками, при цьому зазори в зчепних пристроях погіршують точність позиціонування вагонеток під вантажними люками, а, отже, збільшують час виконання цієї технологічної операції і, крім того, викликають удари, що знижують термін служби додатків складів. Авторами проведено порівняльний аналіз різних математичних підходів для розв'язання задачі мінімізації цього виду ударів шляхом створення відповідного алгоритму управління тягової електромеханічної системою електровоза. У числі аналізованих методи: довгохвильового наближення ланцюжка зв'язаних осциляторів, ідентифікації об'єкта управління, теорії планування експериментів, нечіткого і нейросетевого регулювання. Встановлено, що з досліджуваного переліку методів слід виключити метод нечіткого управління, а решта підходи підлягають більш глибоке опрацювання для досягнення поставленої мети.

**Syomochkin A., Fedotov V., Smenova L.** Mathematical approach to solve the problem in positioning accuracy for mine trolleys of electric locomotives during loading and unloading operations

This article is about the way to reduce the time required for loading and unloading of electric trains in the specific conditions of iron ore enterprises with underground mining methods. It was established that during loading and unloading operations, which account for most of the movement cycle electric locomotives in underground mines, train moves jerkily, with gaps in the coupling devices which affects the accuracy of positioning of trolleys for loading hatches, and, consequently, increase the run time of this process step and, in addition, cause bumps which reduce the service life of electric locomotives. The authors of this article carried out a comparative analysis of different mathematical approaches to solving the problem of minimizing this type of attacks by creating an appropriate control algorithm of electromechanical electric traction system. Among the analysed methods: long-wave approximation chain of coupled oscillators, the identification of the object of management, design of experiments theory, fuzzy and neural network control. It is established that from the list of the tested methods should be excluded fuzzy control method, and the other approaches that require a deeper study to achieve this goal.

УДК 681.513.6

**Кондратець В.О., Мацуй А.М.** Метод автоматизованого керування подрібненням руди кульовим млином з оптимізацією динаміки розрідження пульпи

Метою роботи є розробка методу автоматизованого керування подрібненням руди кульовими млинами з оптимізацією динаміки розрідження пульпи та включенням в продуктивну роботу початкової ділянки барабана технологічного агрегата. Поставлена мета досягається автоматизованим керуванням на двох ієрархічних рівнях. Перший ієрархічний рівень керування здійснюється в межах стабілізації загального розрідження пульпи в кульовому млині з заданою точністю. Другий ієрархічний рівень керування реалізовано в межах першого використовуючи загальну витрату води у кульовий млин для досягнення заданого розрідження пульпи. Загальна витрата води розподіляється між адаптивними контурами керування витратою води на поверхню руди, що направляється в млин, в приймальний пристрій завитково-го живильника та безпосередньо в технологічний агрегат. Обидва контури виконані оптимальними і реалізують релей-ний закон керування. Завдання на розрідження пульпи формується автоматично в кожному циклі керування, адаптованому до швидкості руху конвеєрної стрічки. Доведені всі положення і залежності, на які спирається даний метод, зокрема, критерії оптимальності, алгоритми визначення площі поверхні рухомої дробленої руди, витрати води у приймальний пристрій завитково-го живильника та середньої крупності дробленого матеріалу. Вперше запропоновані залежності для визначення крупності дробленої руди в потоці, площі поверхні рухомого дробленого матеріалу, а також спосіб автоматизованого керування подрібненням руди з оптимізацією динаміки розрідження пульпи. Реалізація запропонованого методу керування забезпечує включення в продуктивну роботу початкової ділянки барабана млина, що дорівнює  $\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{3}$  його довжини. Це гарантує збільшення продуктивності за готовим продуктом до 7%, зменшення втрат корисного компонента без перевитрати електричної енергії, куль і футеровки.

**Кондратець В.А., Мацуй А.М.** Метод автоматизированного управления измельчением руды шаровым мельницей с оптимизацией динамики разрежения пульпы

Целью работы является разработка метода автоматизированного управления измельчением руды шаровой мельнице с Оптимизацией динамики разрежения пульпы и включением в производительную работу начального участка барабана технологического агрегата. Поставленная цель достигается автоматизированным управлением на двух иерархических уровнях. Первый иерархический уровень управления осуществляется в пределах стабилизации общего разрежения пульпы в шаровой мельнице с заданной точностью. Второй иерархический уровень управления реализован в рамках первого используя общий расход воды в шаровая мельница для достижения заданного разрежения пульпы. Общий расход воды распределяется между адаптивными контурами управления расходом воды на поверхность руды, направляется в мельницу, в приемное устройство завиткового питателя и непосредственно в технологический агрегат. Оба контура выполнены оптимальными и реализуют релейный закон управления. Задача на разжижение пульпы формируется автоматически в каждом цикле управления, адаптировано к скорости движения конвейерной ленты. Доказанные все положения и зависимости, на которые опирается данный метод, в том численности, критерии оптимальности, алгоритмы определения площади поверхности подвижной дробленой руды, расходы воды в принимающее устройство улиткового питателя и средней крупности дробленого материала. Впервые предложены зависи-

мо-сти для определения крупности дробленой руды в потоке, площади поверхности подвижного дробленого материала, а также способ автоматизированного управления измельчением руды с оптимизацией динамики разрезания пульпы. Реализация предложенного метода управления обеспечивает включение в продуктивную работу начального участка барабана мельницы коридоров  $\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{2}$  его длины. Это гарантирует увеличение производительности за готовым продуктом до 7%, уменьшение потерь полезного компонента без перерасхода электроэнергии, шаров и футеровки.

**Kondratets V., Matsui A.** Method automated management ore grinding ball mill optimization dynamics dilution of pulp

The aim is to develop a method for the automated management of ore grinding ball mill optimization dynamics dilution of the pulp and the inclusion of productive work process initial portion of the drum unit. The goal is achieved automated management at two hierarchical levels. The first hierarchical level control is carried out within the overall stabilization of pulp dilution in ball mills with the required accuracy. The second hierarchical level controls implemented within the first using the total water consumption in the ball mill to achieve a given dilution of pulp. The total water consumption is distributed between adaptive circuits control water flow to the surface ore sent to the mill, a receiver cranial feeder and directly in the manufacturing unit. Both made optimal contours and implement relay control law. Tasks for dilution of the pulp is generated automatically in each cycle management, adapted to the speed of the conveyor belt. Proven and all provisions, depending on which is based the present method, particularly optimality criteria, algorithms determine the surface area of the movable split ore, water consumption in the receiver cranial feeder and the average size of crushed material. Depending first proposed to determine the size of the split in the ore flow, surface rolling crushed material and way of automated management grinding ore dilution dynamics optimization pulp. Implementation of the proposed control method ensures the inclusion of productive work for the initial portion of the drum mill is equal to  $\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{2}$  of its length. This ensures increased productivity for the finished product to the 7% decrease in losses of useful components without overspending electrical energy balls and lining.

УДК 621.3.011.712: 621.3.014.8

**Савицкий А.И., Семочкин А.Б., Семочкина С.В.** Моделирование системы автоматического управления энергетическими параметрами электроприводов клетей прокатных станов

В данной статье проводится анализ коэффициента мощности, гармонического состава тока и напряжения, а также оценка их уровней на основе стандарта IEEE 519-1992. Целью работы является определение необходимости мониторинга параметров качества электрической сети и точек замеров в промышленных условиях за счет внедрения сетевых систем дистанционного сбора информации. Указаны последствия несоответствия реальных значений требуемым стандартам. Моделирование электроэнергетической системы выполнено в программной среде Matlab. Проводились исследования энергетических показателей для 12-пульсной и 6-пульсной схем нереверсивного тиристорного привода при управлении отдельной клетью прокатного стана. Рассмотрен случай управления прокатной линией из 21 клетки, при одинаковом угле отпирания для всех тиристоров и при согласованном управлении с помощью сдвига между углами отпирания тиристорных преобразователей для соседних клетей прокатного стана. Даны рекомендации по выбору значений углов управления, с учетом необходимости соблюдения технологических ограничений (согласование скоростей клетей). Кроме этого результаты работы будут положены в ряд мероприятий по эффективному фазовому управлению распределенными силовыми преобразователями прокатных приводов по промышленной информационной сети. Отмечена целесообразность применения методов нечеткой логики для согласованного энергоэффективного управления отдельными электроприводами.

**Савицкий О.И., Семочкин А.Б., Семочкина С.В.** Моделирование системы автоматического управления энергетическими параметрами электроприводов клетей прокатных станов

У данной статті проводиться аналіз коефіцієнта потужності, гармонійного складу струму і напруги, а також оцінка їх рівнів на основі стандарту IEEE 519-1992. Метою роботи є визначення необхідності моніторингу параметрів якості електричної мережі і точок замірів в промислових умовах за рахунок впровадження мережевих систем дистанційного збору інформації. Вказані наслідки невідповідності реальних значень необхідним за стандартами. Моделювання електроенергетичної системи виконано в програмному середовищі Matlab. Проводилися дослідження енергетичних показників для 12-пульсної і 6-пульсної схем нереверсивного тиристорного привода при управлінні окремою кліттю прокатного стану. Розглянуто випадок керування прокатною лінією з 21 кліті, при однаковому куті відмикання для всіх тиристорів і при узгодженому управлінні за допомогою зсуву між кутами відмикання тиристорів для сусідніх клітей прокатного стану. Дано рекомендації щодо вибору значень кутів управління, з урахуванням необхідності дотримання технологічних обмежень (узгодження швидкостей клітей). Крім цього результати роботи будуть покладені в ряд заходів з ефективного фазового управління розподіленими силовими перетворювачами прокатних приводів через промислову інформаційну мережу. Відзначено доцільність застосування методів нечіткої логіки для узгодженого енергоефективного керування окремими електроприводами.

**Savitsky O., Semochkin A., Semochkina S.** Simulation of system for automatic control by energy parameters of the rolling mill stands' electric drives

This article analyzes power factor, harmonic consist of current and voltage, as well as an assessment of their levels based on the standard IEEE 519-1992. The aim of the job is to determine the need for monitoring of the quality parameters of the electricity network and measuring points in the industrial environment through the introduction of network systems for remote information acquisition. Shown consequences of the discrepancy between actual values and required by the standards. Simulation of the electric power system has been performed in the software environment Matlab. Researches of energy indicators for the 12-pulse and 6-pulse circuits of irreversibly thyristor drive in the management of individual stand of rolling mill were conducted. The case of the control of the rolling line from 21 stands at the same opening angle for all thyristors and coordinated management using the shift between the opening angles of thyristor converters for the adjacent rolling stands was considered. The recommendations on the choice of control angles' values, taking into account the need to observe the technological limitations (coordination speeds of stands) were given. In addition, the results of the work will be put in a series of activities to effectively phase manage the rolling mill drives' distributed power converters using industrial information network.

Advisability of applying of fuzzy logic methods for concerted energy-efficient management of individual electric drives has been noted.



УДК 681.3

**Осадчук Ю.Г., Козакевич І.А., Ільченко Р.А.** Порівняльний аналіз асинхронних, синхронних машин з постійними магнітами та вентильних реактивних двигунів для гібридних транспортних засобів

Внаслідок підвищеної енергетичної ефективності та низького значення показника вартість/шлях, електричні та гібридні транспортні засоби привертають до себе все більшу увагу. Для задоволення вимог щодо електроприводу двигуни цих механізмів повинні задовольняти специфічні вимоги щодо продуктивності та ефективності. Це призводить до необхідності відпрацювання чітких критеріїв вибору електричних двигунів. У роботі виконано розробку критеріїв порівняння, що можуть бути використані при аналізі синхронних двигунів з постійними магнітами з розподіленими обмотками та зосередженими обмотками, асинхронних двигунів та вентильних реактивних двигунів для електричних та гібридних транспортних засобів. Для проектування конструкції асинхронного двигуна використовувався метод кінцевих елементів. Для урахування нелінійних параметрів машини та досягнення високого рівня ефективності двигунів, оптимальні траєкторії струму отримані для розширеної моделі синхронних двигунів з постійними магнітами та асинхронних. Додаткові критерії порівняння з урахуванням показників шуму та вібрацій також враховано при узагальненому аналізі.

**Осадчук Ю.Г., Козакевич І.А., Ільченко Р.А.** Сравнительный анализ асинхронных, синхронных машин с постоянными магнитами и вентильных реактивных двигателей для гибридных транспортных средств

Вследствие повышенной энергетической эффективности и низкого значения показателя вартість/шлях, электрические и гибридные транспортные средства привлекают к себе все большее внимание. Для удовлетворения требований по электроприводу двигатели этих механизмов должны удовлетворять специфические требования по производительности и эффективности. Это приводит к необходимости отработки четких критериев выбора электрических двигателей. В работе выполнена разработка критериев сравнения, которые могут быть использованы при анализе синхронных двигателей с постоянными магнитами с распределенными обмотками и сосредоточенными обмотками, асинхронных двигателей и вентильных реактивных двигателей для электрических и гибридных транспортных средств. Для проектирования конструкции асинхронного двигателя использовался метод конечных элементов. Для учета нелинейных параметров машины и достижения высокого уровня эффективности двигателей, оптимальные траектории тока полученные для расширенной модели синхронных двигателей с постоянными магнитами и асинхронных. Дополнительные критерии сравнения с учетом показателей шума и вибраций также учтено при общем анализе.

**Osadchuk Y., Kozakiewicz I., Ilchenko R.** Comparative analysis of asynchronous, synchronous machines with permanent magnet and switched reluctance motors for hybrid vehicles

Due to the increased energy efficiency and the low value of the indicator vartist / Way, electric and hybrid vehicles are attracting more and more attention. To meet the requirements for the electric motors of these mechanisms must meet specific requirements for productivity and efficiency. This leads to the necessity of working out clear criteria for the selection of electric motors. The development work performed comparison criteria that may be used in the analysis of synchronous permanent magnet motors with concentrated windings and distributed windings of asynchronous motors and switched reluctance motor for electric and hybrid vehicles. For the design of the asynchronous motor design used the finite element method. To account for the nonlinear parameters of the machine and to achieve a high level of engine efficiency, optimal trajectories obtained for the current extended model of synchronous motors with permanent magnets and induction. Additional criteria comparison based on noise and vibration performance is also taken into account in the overall analysis.

УДК 681.3

**Козакевич І.А.** Система рекуперативного гальмування вентильним двигуном електромобіля

Вдосконалення електромеханічних систем транспортних засобів в даний момент направлено на підвищення рівня їх енергоефективності. Синтез раціональних способів реалізації рекуперативного гальмування є одним з актуальних шляхів збільшення автономності електромобілів через те, що дозволяє суттєво зменшити рівень споживаної електроенергії за цикл руху. Безщіткова машина, в основі якої є синхронний двигун, відноситься до найбільш популярних типів двигунів, що використовуються в електроприводах транспортних засобів. Векторний простір системи керування ділиться на шість секторів, кожен з яких відповідає одному з шести станів сигналу датчика Холла. У той же час, безщіткова машина постійного струму при роботі на низькій кутовій частоті не створює достатню величину проти-ЕРС обмоток для заряду акумулятора, тобто в такому режимі відсутні умови для відновлення його заряду. Через наявність індуктивності обмоток в двигуні існують можливості для створення підвищуючого ланцюга. Для відновлення заряду акумулятора в такому режимі необхідно підняти напругу ланки постійного струму за допомогою індуктивності акумулятора. З цією метою необхідно закрити всі силові ключі, які підключені до позитивної шини ланки постійного струму, а управління ключами, підключеними до негативної шини, здійснювати за допомогою широтно-імпульсної модуляції. У роботі виконано вирішення наукової задачі, що пов'язана з розробкою системи керування рекуперативним гальмуванням електричного транспортного засобу на базі безщіткової машини постійного струму. Розроблена система керування містить блоки розділення гальмівного моменту, що виходить з позицій безпеки руху, енергоефективності та балансування координат електромобіля. За рахунок застосування нечіткого керування та ПІД-регулятора система виконує розділення зусилля механічного гальмування та електричного рекуперативного. Використання ПІД-регулятора є досить поширеним методом у теорії автоматичного керування, проте воно не враховує такі параметри, як заряд батареї, швидкість, інтенсивність гальмування і т.д. У розробленій системі використовується нечітке керування з трьома входними параметрами: швидкість, заряд батареї та інтенсивність гальмування.

**Козакевич І.А.** Система рекуперативного торможения вентильным двигателем электромобиля

Совершенствование электромеханических систем транспортных средств в данный момент направлено на повышение уровня их энергоэффективности. Синтез оптимальных способов реализации рекуперативного торможения является одним из актуальных путей увеличения автономности электромобилей из-за того, что позволяет существенно

уменьшить уровень потребляемой электроэнергии за цикл движения. Бесщеточный машина, в основе которой синхронный двигатель, относится к наиболее популярных типов двигателей, используемых в электроприводах транспортных средств. Векторное пространство системы управления делится на шесть секторов, каждый из которых соответствует одному из шести состояний сигнала датчика Холла. В то же время, бесщеточный машина постоянного тока при работе на низкой угловой частоте не создает достаточную величину противЕРС обмоток для заряда аккумулятора, то есть в таком режиме отсутствуют условия для восстановления его заряда. Из-за наличия индуктивности обмоток в двигателе существуют возможности для создания повышающего цепи. Для восстановления заряда аккумулятора в таком режиме необходимо поднять напряжение звена постоянного тока с помощью индуктивности аккумулятора. С этой целью необходимо закрыть все силовые ключи, которые подключены к положительной шины звена постоянного тока, а управление ключами, подключенными к отрицательной шины, осуществлять с помощью широтно - импульсной модуляции. В работе выполнено решение научной задачи, связанной с разработкой системы управления рекуперативного торможения электрического транспортного средства на базе бесщеточных машины постоянного тока. Разработана система управления содержит блоки разделения тормозного момента получается с позиций безопасности движения, энергоэффективности и балансировки координат электромобиля. За счет применения нечеткого управления и ПИД-регулятора система выполняет разделение усилия механического торможения и электрического рекуперативного. Использование ПИД-регулятора является достаточно распространенным методом в теории автоматического управления, однако оно не учитывает такие параметры, как заряд батареи, скорость, интенсивность торможения и т.д. В разработанной системе используется нечеткое управления с тремя входными параметрами: скорость, заряд батареи и интенсивность торможения.

**Kozakiewicz I**, Regenerative braking system brushless electric

Improving vehicle electromechanical systems currently is aimed at improving their energy efficiency. Synthesis rational way to implement regenerative braking is one of the urgent ways to increase the autonomy of electric vehicles because they can significantly decrease the electricity consumption per cycle traffic. Brushless machine, based on which the synchronous motor, one of the most popular types of motors used in electric drives of vehicles. Space Vector control system is divided into six sectors, each of which corresponds to one of the six states of the sensor signal Hall. At the same time, brushless DC machine when working at low angular frequency does not create sufficient value for protyERS windings battery is in this mode there are no conditions to restore its charge. Because of the inductor windings in the motor are increasing opportunities to create chain. To restore the battery in this mode need to raise the voltage level of DC power via inductance. For this purpose the power to close all keys that are connected to the positive bus link DC, and key management, connected to negative bus made using pulse - width modulation. In the work the scientific problem solving that is associated with the development of control systems regenerative braking electric vehicle based on brushless DC machine. The system includes power management division braking torque emanating from the standpoint of traffic safety, energy efficiency and coordinate balancing electric vehicle. Through the application of fuzzy control and PID-controller system performs the separation of the mechanical braking force and regenerative electric. Use regulator is a common method in the theory of automatic control, but it does not take into account parameters such as battery life, speed, braking intensity, etc. In the developed fuzzy control system uses three input parameters: speed, battery power and intensity of braking.

УДК 681.3

**Козакевич І.А.** Система керування синхронним двигуном з постійними магнітами з використанням фільтру Калмана

Синхронні двигуни з постійними магнітами широко використовуються у електромеханічних системах з високими вимогами щодо якості керування завдяки високому коефіцієнту потужності, високим показникам керування кутовою швидкістю і т.д. Для сервосистем з синхронними двигунами з постійними магнітами необхідні сигнали зворотного зв'язку за положенням ротора та кутовою швидкістю. Традиційні підходи до вирішення цього завдання передбачають використання оптичного інкрементального, абсолютного або комбінованого енкодера. Проте, використання енкодерів в якості датчиків швидкості має свої особливості, що пов'язані з роботою на низьких кутових швидкостях, оскільки в даному режимі існуючі методи не дають достатньої точності. Тому питання покращення властивостей сервоприводів з синхронними двигунами з постійними магнітами є актуальною й важливою науково-технічною задачею. Здійснено теоретичне узагальнення й розв'язання актуальної науково-технічної задачі підвищення точності керування синхронними машинами з постійними магнітами при наявності абсолютного чи інкрементального енкодера. Суть виконаних досліджень полягає в впровадженні у систему керування самоадаптивного спостерігача Калмана, що дозволяє суттєво покращити показники якості керування. Застосування адаптивного спостерігача Калмана на відміну від існуючих способів виміру кутової швидкості здатний оцінювати одночасно положення ротора та швидкість з високою точністю та без часової затримки. Керування синхронним двигуном на базі системи з адаптивним спостерігачем Калмана дозволяє суттєво підвищити показники якості керування, зменшити пульсації кутової швидкості, а також коливання струму при пуску двигуна. Шляхом математичного моделювання доведено, що застосування спостерігача Калмана для таких систем дозволяє підвищити швидкість системи.

**Козакевич І.А.** Система управління синхронним двигателем с постоянными магнитами с использованием фильтра Калмана

Синхронные двигатели с постоянными магнитами широко используются в электромеханических системах с высокими требованиями к качеству управления благодаря высокому коэффициенту мощности, высоким показателям управления угловой скоростью и т.д. Для сервосистем с синхронными двигателями с постоянными магнитами необходимые сигналы обратной связи по положению ротора и угловой скорости. Традиционные подходы к решению этой задачи предусматривают использование оптического инкрементального, абсолютного или комбинированного энкодера. Однако, использование энкодеров в качестве датчиков скорости имеет свои особенности, связанные с работой на низких угловых скоростях, поскольку в данном режиме существующие методы не дают достаточной точности. Поэтому вопрос улучшения свойств сервоприводов с синхронными двигателями с постоянными магнитами актуаль-

на и важна научно-технической задачей. Осуществлено теоретическое обобщение и решение актуальной научно-технической задачи повышения точности управления синхронными машинами с постоянными магнитами при наличии абсолютного или инкрементального энкодера. Суть выполненных исследований заключается во внедрении в систему управления самоадаптивного наблюдателя Калмана, что позволяет существенно улучшить показатели качества управления. Применение адаптивного наблюдателя Калмана в отличие от существующих способов средств измерения угловой скорости способен оценивать одновременно положения ротора и скорость с высокой точностью и без временной задержки. Управление синхронным двигателем на базе системы с адаптивным наблюдателем Калмана позволяет существенно повысить показатели качества управления, уменьшить пульсации угловой скорости, а также колебания тока при пуске двигателя. Путем математического моделирования доказано, что применение наблюдателя Калмана для таких систем позволяет повысить быстродействие системы.

**Kozakiewicz I.** Synchronous motor control system with regular magnesium-ter using a Kalman filter

Synchronous motors with permanent magnets are widely used in electromechanical systems with high demands on quality control through high power factor, high levels of control angular velocity, etc. For servosystem with synchronous motors with permanent magnets necessary feedback signals for rotor position and angular velocity. Traditional approaches to solving this problem include the use of optical incremental, absolute encoder or combined. However, the use of the encoder as a speed sensor has its own characteristics associated with work at low angular speed, as in this mode, existing methods do not provide sufficient accuracy. This kind of better servo characteristics of synchronous motors with permanent magnets is relevant and important scientific and technical challenge. The theoretical generalizations and solving actual scientific and technical problem of increasing the accuracy of management Sync their machines with permanent magnets in the presence of an absolute or incremental encoder. The essence of the research is to implement a control system samoadaptivnoho Kalman observer that can significantly improve quality control. Application of adaptive Kalman observer unlike existing ACT-sobiv measuring angular velocity is able to estimate both rotor position and velocity with high accuracy and without time delay. Synchronous motor control system based on adaptive Kalman observer can significantly increase the quality of management, reduce pulsation angular velocity and current fluctuations when starting the engine. Through mathematical modeling demonstrated that the application of Kalman observer for such systems can increase system performance.

УДК 621.3

**Сьомочкін А.Б., Шевчук В.В.** Застосування суперконденсаторів в гібридних системах

Суперконденсатор здатний функціонувати як пристрій для зберігання електричної енергії, викликає зростаючий інтерес серед фахівців. В даний час в багатьох роботах відзначаються позитивні якості суперконденсаторів (СК), які можуть ефективно застосовуватися для згладжування пікових струмів, що виникають в системах енергоживлення. Істотно увага приділяється застосуванню СК в системах з електрохімічними джерелами живлення (зокрема з АКБ), що використовуються в якості основних у автономних транспортних засобах. Іоністори являють собою високоємні конденсатори із подвійним електричним шаром. На відміну від звичайних конденсаторів, іоністори мають характеристики, які дозволяють поєднувати велику потужність і значну енергію. Відомо, що максимальну потужність в навантаженні (споживачі електроенергії) можна отримати за однакової кількості її резистивного опору внутрішньому активному спротиву джерела або накопичувача електричної енергії, в тому числі і СК. Внутрішній активний опір сучасних суперконденсаторів може становити 0,11 ... 1,5 мОм, а максимальна щільність потужності може бути більше 90 кВт / кг, що в 3 тис. разів більше, ніж у пускового свинцевого акумулятора автомобілів.

Дослідження основних властивостей та переваг суперконденсаторів для застосування в електромеханічних системах і є основою даної роботи. Метою даної роботи є складання оптимального алгоритму роботи суперконденсаторів у складі тягової системи ЕМ.

Розглянуто нові технології виготовлення іоністорів на основі деревної тріски, які значно зменшують вартість даних елементів. Проаналізувавши властивості іоністорів були визначені основні напрямки їхнього застосування.

**Семочкин А.Б., Шевчук В.В.,** Применение суперконденсаторов в гибридных системах

Суперконденсатор способен функционировать как устройство для хранения электрической энергии, вызывает растущий интерес среди специалистов. В настоящее время во многих работах от-определяются положительные качества суперконденсаторов (СК), которые могут эффективно применяться для сглаживания пиковых токов, возникающих в системах энергоснабжения. Существенное внимание уделяется применению СК в системах с электрохимическими источниками живления (в частности с АКБ), используемых в качестве основных в автономных транспортных средствах. Ионистора представляют собой высоко емкостные конденсаторы с двойным электрическим слоем. В отличие от обычных конденсаторов, ионистора имеют характеристики, которые позволяют сочетать большую мощность и значительную энергию. Известно, что максимальную мощность в нагрузке (потребители электроэнергии) можно получить при одинаковом количестве ее резистивного сопротивления внутреннему активному сопротивлению источника или накопителя электрической энергии, в том числе и СК. Внутренний активное сопротивление современных суперконденсаторов может составлять 0,11 ... 1,5 мОм, а максимальная плотность мощности может быть более 90 кВт / кг, что в 3 тыс. Раз больше, чем в пускового свинцевого аккумулятора автомобилей.

Исследование основных свойств и преимуществ суперконденсаторов для применения в электромеханических системах и является основой данной работы. Целью данной работы является составление оптимального алгоритма работы суперконденсаторов в составе тяговой системы ЭМ.

Рассмотрены новые технологии изготовления ионисторов на основе древесной щепы снижают стоимость данных элементов. Проанализировав свойства ионисторов были определены основные направления их применения.

**Semochkin A., Shevchuk V.** Application supercapacitors in hybrid systems

Supercapacitors, able to function as a storage device for electrical energy is growing interest among specialists. Currently, many studies observed positive qualities supercapacitors (SC) which can be effectively applied to smooth peak currents that occur in the systems of energy. Considerable attention is paid to the use of IC engines with electrochemical power sources (including the battery), used as key in autonomous vehicles. As the main material for the production of electrodes considered

due to their unique properties, carbon nanomaterials, such as nanoporous carbon, carbon nanotubes and graphene. Supercapacitor are high capacitance capacitors with Double Layer. Unlike conventional capacitor, supercapacitor have characteristics that allow to combine great strength and great energy.

It is known that the maximum power load (electricity consumers) can be obtained the same number of active resistive resistance internal resistance of the source or storage of electricity, including IC. The internal resistance of current ultracapacitors can be 0.11 ... 1.5 mOhm and the maximum power density can be more than 90 kWh / kg, which is 3 thousand. Times more than the starting lead battery cars.

Investigation of basic properties and advantages of ultracapacitors for use in electromechanical systems and is the basis of this work. The aim of this work is of optimal algorithm of supercapacitors traction system consisting of EM.

Considers new manufacturing technology supercapacitor based on wood chips, which significantly reduces the cost of data elements. After analyzing the properties of supercapacitor developed algorithm.

УДК 629.349:62-182

**Філіпп Ю.Б., Белоус А.В.,** Дослідження енергетичних показників тягової підстанції тролейбусів Кривого Рогу  
Визначення енергетичних показників тягової підстанції в районі підстанції Ленинская-2, що обслуговує маршрути тролейбусів №3, 17 наукове обґрунтування і розробка методів розрахунку показників якості електроенергії, що дозволяють підвищити енергоефективність тягових підстанцій міських тролейбусів. Підвищити енергетичну ефективність роботи тягового електроприводу можливо за рахунок використання енергії гальмування великовантажних кар'єрних самоскидів, застосувавши рекуперативне гальмування, як основний спосіб електричного гальмування. визначення енергетичних показників тягової підстанції в районі підстанції Ленинская-2, що обслуговує маршрути тролейбусів №3, 17 наукове обґрунтування і розробка методів розрахунку показників якості електроенергії, що дозволяють підвищити енергоефективність тягових підстанцій міських тролейбусів.

**Филипп Ю.Б., Белоус А.В.,** Исследование энергетических показателей тяговой подстанции троллейбусов Кривого Рога

Определение энергетических показателей тяговой подстанции в районе подстанции Ленинская-2, обслуживает маршруты троллейбусов №3, 17 научное обоснование и разработка методов расчета показателей качества электроэнергии, позволяющие повысить энергоэффективность тяговых подстанций городских троллейбусов. Повысит энергетическую эффективность работы тягового электропривода возможно за счет использования энергии торможения большегрузных карьерных самосвалов, применив рекуперативное торможение, как основной способ электрического торможения. определение энергетических показателей тяговой подстанции в районе подстанции Ленинская-2, обслуживает маршруты троллейбусов №3, 17 научное обоснование и разработка методов расчета показателей качества электроэнергии, позволяющие повысить энергоэффективность тяговых подстанций городских троллейбусов.

**Philipp J., Bilous A.,** The study of the energy performance of traction substation trolleybuses in Kryvyi Rih  
Determination of the energy performance of traction substation near the substation Lenynskaya-2, which serves routes trolley №3, 17 scientific substantiation and development of methods of calculation of power quality that improve the energy efficiency of city trolley buses traction substations. To increase the energy efficiency of electric traction possible by utilizing the braking energy of heavy mining truck, using regenerative braking as the main method of electric braking. determine the energy performance of traction substation near the substation Lenynskaya-2, which serves routes trolley №3, 17 scientific substantiation and development of methods of calculation of power quality that improve the energy efficiency of city trolley buses traction substations.

УДК 622.272:004.051

**Сінчук І.О., Самохіна А.С.,** До питання підвищення енергоефективності видобутку залізної руди підземним способом

Напрями підвищення електроенергоефективності видобутку корисних копалин відомі, більш того, в останні 5-10 років їх кількість збільшилася. Однак, як правило, це відноситься до знову проєктованим або глобально переобладнаним гірничим підприємствам. Щодо діючих, то це проблема ще далеко не вирішена. Між тим, з огляду на те, що в найближчі 35 - 45 років будівництво нових залізрудних підприємств в Україні не планується, то саме в напрямку вдосконалення комплексу: системи електропостачання - системи електроспоживання діючих гірничорудних виробництв необхідно вести наукові дослідження. Викликано це, перш за все, факторами підвищення сегмента енерговитрат взагалі і електроенергозатрат, зокрема, в загальному обсязі собівартості видобутого ЗРС. Найбільш енергоємними споживачами електричної енергії залізрудних шахт і раніше є стаціонарні установки - водовідлив, вентиляція, підйом, компресорні - разом споживають понад 80% всієї електроенергії, споживаної шахтою. Особливо великі електроенергозатрати на вироблення стисненого повітря центральними компресорними станціями, які становлять близько 30% від всієї споживаної комбінатом електроенергії.

**Синчук И.О., Самохина А.С.,** К вопросу повышения энергоэффективности добычи железной руды подземным способом

Направления повышения электроенергоеффективности добычи полезных ископаемых известны, более того, в последние 5-10 лет их количество увеличилось. Однако, как правило, это относится к вновь проектируемым или глобально переоборудованным горным предприятиям. О действующих, то это проблема еще далеко не решена. Между тем, учитывая то, что в ближайшие 35-45 лет строительство новых железорудных предприятий в Украине не планируется, то именно в направлении совершенствования комплекса: системы электроснабжения - системы электроснабжения действующих горнорудных производств необходимо вести научные исследования. Вызвано это, прежде всего, факторами повышения сегмента энергозатрат вообще и электроенергозатрат, в частности, в общем объеме себестоимости добытого ЖРС. Наиболее энергоемными потребителями электрической энергии железорудных шахт по-прежнему являются стационарные установки - водоотлив, вентиляция, подъем, компрессорные - вместе потребляют более 80% всей электроэнергии, потребляемой шахтой. Особенно большие электроенергозатраты на выработку сжа-

того воздуха центральными компрессорными станциями, составляют около 30% от всей потребляемой комбинатом электроэнергии.

**Sinchuk I., Samokhina A.**, Questions to energy efficiency iron ore underground mining

Directions increase electrical energy efficiency mining known, in fact, in the last 5-10 years, their number has increased. However, generally, it refers to the newly projected or converted mining companies globally. As for the acting, it is a problem far from solved. Meanwhile, due to the fact that in the next 35 - 45 years to build new iron ore business in Ukraine is not planned, it is in improving complex: electrical system - power system operating mining enterprises must conduct research. It is caused, first of all, ways to increase energy segment in general and electrical energy costs, in particular, in the total cost of iron ore extracted. The most energy-intensive consumers of electric power and iron ore mines still the fixed installation - pumping, ventilation, lift, compressor - together consume more than 80% of all electricity consumed by the mine. Especially large electric energy production costs of compressed air central compressor stations, which account for about 30% of the electricity consumed combine.

УДК 629.423.2-52

**Сінчук І.О., Самохіна А.С.** Застосування комбінованого приводу електровозів для підвищення тягових властивостей

В даний час електровозний транспорт є найбільш поширеним видом транспорту на гірничих підприємствах. Так на шахтах з його допомогою здійснюється до 70% перевезень, а на рудниках до 100%. Настільки широке поширення електровозного транспорту обумовлено тим, що останній найбільш економічний при великих довжинах транспортування більш ніж інші види рудничного транспорту. Електровози можуть застосовуватися при різних умовах експлуатації, в тому числі на шахтах небезпечних по газу і пилу. Даний вид транспорту відрізняється порівняно малою енергоємністю, хорошою пристосованістю до автоматизації, практично відсутній шкідливий вплив на навколишнє природне середовище. Для електровозного транспорту характерні також відносні мобільність і надійність, обумовлена тим, що несправність одного локомотива не веде до істотного зниження продуктивності транспортної системи, на відміну, наприклад, від конвеєрного транспорту. Є можливість використання електровозного транспорту в якості засобу усереднення гірської маси.

**Синчук И.О., Самохина А.С.**, Применение комбинированного привода в электровозах для повышения тяговых свойств

В настоящее время электровозный транспорт является наиболее распространенным видом транспорта на горных предприятиях. Так на шахтах с его помощью осуществляется до 70% перевозок, а на рудниках до 100%. Столь широкое распространение электровозного транспорта обусловлено тем, что последний наиболее экономичен при больших длинах транспортировки более чем другие виды рудничного транспорта. Электровозы могут применяться при различных условиях эксплуатации, в том числе на шахтах опасных по газу и пыли. Данный вид транспорта отличается сравнительно малой энергоемкостью, хорошей приспособляемостью к автоматизации, практически отсутствует вредное влияние на окружающую природную среду. Для электровозного транспорта характерны также относительные мобильность и надежность, обусловленная тем, что неисправность одного локомотива не ведет к существенному снижению производительности транспортной системы, в отличие, например, от конвейерного транспорта. Имеется возможность использования электровозного транспорта в качестве средства усреднения горной массы.

**Sinchuk I., Samokhina A.** Application of the combined drive for improvement the electric locomotive traction

Currently, for electric vehicles is the most common mode of transport in mining enterprises. Since the mines it is carried out with the help of up to 70% of transportation, and in the mines up to 100%. Such widespread electric locomotive transportation due to the fact that the latter is the most economical for large lengths of transporting more than other types of mine transport. Electric can be used in various operating conditions, including in mines dangerous on gas and dust. This mode of transport has a relatively low power consumption, good adaptability to automation, there is practically no harmful effect on the environment. Electric locomotive for transport and relative mobility characteristic and reliability, due to the fact that the failure of one locomotive does not lead to a significant reduction of the transport performance of the system, as opposed, for example, from the transport conveyor. It is possible to use as electric locomotive transport means averaging the rock mass.

УДК 621.316.13

**Плешков С.П., Плешков П.Г., Зінзура В.В.** Оптимальне керування параметрами режиму розподільчих електричних мереж з допомогою симетрокомпенсуючих пристроїв

Запропоновано підхід до керування режимами реактивних навантажень розподільчих електричних мереж номінальною напругою 6-10 кВ шляхом використання симетрокомпенсуючих пристроїв. Розроблено структурну схему системи автоматичного керування режимами реактивної потужності розподільчих електричних мереж, яка базується на розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації знайденому методом наближення до утопічної точки в просторі критеріїв. Проведене комп'ютерне моделювання показало перевагу запропонованої системи автоматичного керування над існуючими.

**Плешков С.П., Плешков П.Г., Зинзура В.В.** Оптимальное управление параметрами режима распределительных электрических сетей с помощью симетрокомпенсирующих устройств

Предложен подход к управлению режимами реактивных нагрузок распределительных электрических сетей номинальным напряжением 6-10 кВ путем использования симетрокомпенсирующих устройств. Разработана структурная схема системы автоматического управления режимами реактивной мощности распределительных электрических сетей, которая основывается на решении задачи многокритериальной оптимизации найденном методом приближения к утопической точке в пространстве критериев. Проведенное компьютерное моделирование показало преимущество предложенной системы автоматического управления над существующими.

Ключевые слова: система автоматического управления, распределительные электрические сети, реактивные нагрузки, несимметрия напряжений.

**Plieshkov S., Plieshkov P., Zinzura V.,** Optimal control of parameters mode of electric distribution networks with symmetry compensating device

An approach to the management of modes of reactive loads electricity distribution networks with rated voltage of 6-10 kV through the use of symmetry-balancing settings. The block diagram of the automatic control mode of reactive power electricity distribution networks, which is based on solving the problem of multi-criteria optimization obtained by approaching the utopian point in space criteria. Holding computer simulation showed the advantages of the proposed system of automatic control over existing ones.

УДК 621.926: 524.16

**Бабець Є.К., Хорольський В.П., Хорольська Т.В.** Моделювання режимів роботи внутрішньомлиних навантажень кульових млинів багатостадійного процесу збагачення

Використано математичний апарат теорії катастроф для ідентифікації складного динамічного процесу здриблення, який дозволяє враховувати варіації нелінійних збурень текстурних характеристик сирової руди, її міцності і змінних режимів роботи устаткування та запропоновано систему керування завантаженням руди в кульові млини першої, другої, третьої стадії з врахуванням геометрії внутрішньомлиного навантаження, оцінки в часі аварійних ситуацій. Розроблено метод ідентифікації геометрії внутрішньомлиного завантаження кульових млинів шляхом діагностики траєкторії об'ємного заповнення складного технологічного об'єкту, та визначенні параметри оптимального внутрішньомлиного завантаження з мінімізацією часу знаходження матеріалу в технологічному агрегаті, параметри якого змінюються в часі. Доведено, що максимізації продуктивності кульових млинів шляхом оперативного моніторингу геометрії внутрішньомлиного завантаження робочого простору і визначення знову утвореного готового продукту, є головною умовою оптимізації питомих витрат електрики і проектних рішень, щодо розробки інтелектуальних систем управління електроприводами кульових млинів, насосних агрегатів та сепараторів.

**Бабець Е.К., Хорольский В.П., Хорольская Т.В.** Моделирование режимов работы внутримельничных нагрузок шаровых мельниц многостадийного процесса обогащения

Использован математический аппарат теории катастроф для идентификации сложного динамического процесса измельчения, который позволяет учитывать вариации нелинейных возмущений текстурных характеристик сырой руды, ее прочности и переменных режимов работы оборудования и предложена система управления загрузкой руды в шаровые мельницы первой, второй, третьей стадии с учетом геометрии внутримельничной нагрузки, оценки во времени аварийных ситуаций. Разработан метод идентификации геометрии внутримельничной загрузки шаровых мельниц путем диагностики траектории объемного заполнения сложного технологического объекта, определены оптимальные режимы внутримельничной загрузки с минимизацией времени нахождения материала в технологическом агрегате, параметры которого изменяются во времени. Доказано, что максимизация производительности шаровых мельниц путем оперативного мониторинга геометрии внутримельничной загрузки рабочего пространства и определения вновь образуемого готового продукта, является главным условием оптимизации удельных расходов электричества и проектных решений, по разработке интеллектуальных систем управления электроприводами шаровых мельниц, насосных агрегатов и сепараторов.

**Babets E., Khorolsky V., Khorolsky T.,** Simulation modes of internally mlynnyh stress ball mills multistage enrichment

The authors used apparatus mathematics of catastrophe theory to identify the complex dynamic processes of crushing, which takes account of changes in nonlinear perturbations texture crude ore characteristics, its strength and variable equipment operating conditions and the proposed load control system ore in ball mills first, second and third stages, the evaluation inside the mill geometry load during emergencies. A method of identifying geometry inside the mill download ball mills for the diagnosis trajectory volume filling of a technological complex. The optimal loading modes inside the mill and minimize residence time in the process, the parameters of which change over time. It is proved that maximize the performance of the ball mill operational monitoring geometry inside the mill download the workspace and define the newly formed finished product, it is essential to optimize electricity consumption and specific design solutions for the development of intelligent control systems, electric ball mills, pumps and separators.

УДК 621.316

**Сінчук О.М., Філіпп Ю.Б., Максимов М.М., Ялова А.М.** Методологія оцінки та формування енергоефективних режимів споживання електроенергії на залізорудних підприємствах

Виконано аналіз процесу визначення і заявки лімітів енергоспоживання на залізорудних підприємствах і встановлено, що норми питомого електроспоживання визначаються в умовах невизначеності практично без достатнього аналізу процесу та рівнів електроспоживання, промислових показників роботи підприємства та розвитку геологічних умов на перспективу. За перевищення ліміту електроенергії з підприємств стягується штраф за споживані величини перебору електроенергії. Розглянуто методологічні аспекти оцінки та формування енергоефективних режимів споживання електроенергії на залізорудних підприємствах, запропоновано методи інтервального прогнозування споживання електроенергії. Для прогнозування електроспоживання з урахуванням зміни різних факторів може бути створена інформаційна база даних рівнів споживання електроенергії підприємствами галузі. Авторами статті розроблені методика і блок-схеми алгоритмів одержання тимчасових і факторних моделей енергоспоживання. Також розроблено алгоритм визначення статей видаткової частини електробалансів технологічних приймачів. Запропоновані заходи дозволяють проводити визначення рівня енергопостачання підприємства, встановлювати раціональні норми, здійснювати прогнозування його зміни у ході роботи підприємства й контролювати наднормативні витрати електроенергії.

**Синчук О.Н., Филипп Ю.Б., Максимов М.Н., Яловая А.Н.** Методология оценки и формирования энергоефективных режимов потребления электроэнергии на железорудных предприятиях

Выполнен анализ процесса определения и заявки лимитов энергопотребления на железорудных предприятиях и установлено, что нормы удельного электропотребления определяются в условиях неопределенности практически без

достаточного анализа процесса и уровней электропотребления, промышленных показателей работы предприятия и развития геологических условий на перспективу. За превышение лимита электроэнергии из предприятий взимается штраф за потребляемые величины перебора электроэнергии. Рассмотрены методологические аспекты оценки и формирование энергосберегающих режимов потребления электроэнергии на железорудных предприятиях, предложены методы интервального прогнозирования потребления электроэнергии. Для прогнозирования электропотребления с учетом изменения разных факторов может быть создана информационная база данных уровней потребления электроэнергии предприятиями области. Авторами статьи разработаны методика и блок-схемы алгоритмов получения временных и факторных моделей энергопотребления. Также разработан алгоритм определения статей расходной части электробалансов технологических приемников. Предложенные мероприятия разрешают проводить определение уровня энергоснабжения предприятия, устанавливать рациональные нормы, осуществлять прогнозирование его изменения в ходе работы предприятия и контролировать сверхнормативные затраты электроэнергии.

**Sinchuk O., Filipp Yu., Maximov M., Yalovay A.** The methodology of evaluation and formation of energy-efficient modes of power consumption for iron ore mining companies

The analysis of the process of definition of and application for power supply allocations at iron ore mining companies was carried out, and it was established that the specific power consumption rates are determined under the conditions of uncertainty, almost without any adequate analysis of the process and the levels of power consumption, without the analysis of the industrial performance of the company and the would-be development of the geological conditions. Companies are fined for using excessive amounts of power above the prescribed consumption rates. The methodological aspects of the evaluation and formation of energy-efficient modes of power consumption at iron ore mining companies were dealt with and methods of interval forecasting of power consumption were proposed. To predict power consumption with the changes of various factors taken into account, an information database of the current levels of power consumption by the companies of the industry sector can be created. The authors of the article developed a methodology and block diagrams of algorithms for obtaining temporary and factor models of power consumption. Also developed was an algorithm for establishing the items of the expenditure side of energy balance of process power consuming units. The proposed measures make it possible to determine the level of power supply of a company, to establish reasonable consumption rates, to forecast the supply's changes in the course of the company operation, and to control the excessive power consumption.

УДК 622.684:629.353:621.333.4

**Касаткіна І.В., Сидоренко А.М.,** Підвищення енергоефективності використання автосамоскидів у кар'єрі

Підвищити енергетичну ефективність роботи тягового електроприводу можливо за рахунок використання енергії гальмування великовантажних кар'єрних самоскидів, застосувавши рекуперативне гальмування, як основний спосіб електричного гальмування. Це дає змогу знизити споживання дизельного палива і зменшити забруднення атмосфери кар'єрів, застосувавши комбіновану енергосилову установку, яка містить в собі дизельний або газотурбінний двигун внутрішнього згорання, електродвигун і потужний накопичувач електричної енергії (акумулятор або електрохімічний конденсатор). Одним з варіантів системи накопичувачів у складі комбінованої енергосилової установки може виступати система з асиметричними суперконденсаторними модулями. Встановлені на автосамоскидах з комбінованою енергосиловою установкою конденсаторні накопичувачі, значно перевершуватимуть акумуляторні батареї та ряд конденсаторів інших типів за техніко-економічними і експлуатаційними показниками. Застосування суперконденсаторів в якості накопичувача енергії в комбінованій енергосиловій установці кар'єрного автосамоскида дозволить виключити роботу дизельного двигуна на допоміжних операціях транспортного циклу, і, отже, скоротити час роботи на часткових і холостих режимах.

**Касаткина И.В., Сидоренко А.Н.,** Повышение энергоэффективности использования автосамосвалов в карьере

Повысити энергетическую эффективность работы тягового электропривода возможно за счет использования энергии торможения большегрузных карьерных самосвалов, применяя рекуперативное торможение, как основной способ электрического торможения. Это позволяет снизить потребление дизельного топлива и уменьшить загрязнение атмосферы карьеров, применив комбинированную энергосиловую установку, которая содержит в себе дизельный или газотурбинный двигатель внутреннего сгорания, электродвигатель и мощный накопитель электрической энергии (аккумулятор или электрохимический конденсатор). Одним из вариантов системы накопителей в составе комбинированной энергосиловой установки может выступать система с асимметричными суперконденсаторными модулями. Установленные на автосамосвалах с комбинированной энергосиловой установкой конденсаторные накопители, значительно превосходят аккумуляторные батареи и ряд конденсаторов других типов по технико-экономическим и эксплуатационным показателям. Применение суперконденсаторов в качестве накопителя энергии в комбинированной энергосиловой установке карьерного автосамосвала позволит исключить работу дизельного двигателя на вспомогательных операциях транспортного цикла, и, следовательно, сократить время работы на частичных и холостых режимах.

**Kasatkina I., Sidorenko A.,** Increase energy efficiency of use the dump trucks

Increase the energy efficiency of the traction electric drive is possible through the use of the braking energy of heavy dump trucks, using regenerative braking as the main method of electric braking. This will reduce fuel consumption and reduce pollution of the atmosphere quarries by applying a combined power plant which comprises a gas turbine or a diesel internal combustion engine, a powerful drive motor and electric power (battery or an electrochemical capacitor). The system with asymmetric supercapacitor modules can be used in a combination power plant. Installed on dump trucks with a combined power plant condenser drives, much better batteries and other types of capacitors of the techno-economic and performance indicators. Application supercapacitors as energy storage power plant in combination career dump would eliminate the diesel engine to auxiliary operations transport cycle, and reduce the time for partial and idle modes.

УДК 621.311.086.5:621.3.001.57

**Синчук І.О., Касаткіна І. В., Яловая А.Н., Юрченко Н.Н.** Оценка направлений повышения энергоэффективности добычи железорудного сырья подземным способом

Рассмотрены методы оценки закономерностей влияния комплекса технических и технологических факторов на уровень потребления электрической энергии и обоснование выбора направлений повышения энергоэффективности добычи железорудного сырья в условиях подземных горнорудных предприятий. Предложен комплексный подход к решению задачи повышения электроэнергоэффективности добычи ЖРС путем применения системы контроля, оценки и управления этим процессом с учетом обоснованных прогнозных технологических слагаемых, который позволит достичь желаемого эффекта в анализируемой проблеме – сокращения уровня потребления электрической энергии.

**Сінчук І. О., Касаткіна І. В., Ялова А. Н., Юрченко М.М.** Оцінка напрямків підвищення енергоефективності видобутку залізорудної сировини підземним способом

Розглянуто методи оцінки закономірностей впливу комплексу технічних і технологічних факторів на рівень споживання електричної енергії та обґрунтування вибору напрямків підвищення енергоефективності видобутку залізорудної сировини в умовах підземних гірничорудних підприємств. Запропоновано комплексний підхід до вирішення завдання підвищення електроенергоефективності видобутку ЖРС шляхом застосування системи контролю, оцінки та управління цим процесом з урахуванням обґрунтованих прогнозних технологічних доданків, який дозволить досягти бажаного ефекту в аналізованій проблемі – скорочення рівня споживання електричної енергії.

**Sinchuk I., Kasatkina I., Alova A., Yrcnenko N.** Assessing the development and trends pausania the efficiency of production of iron ore by underground method

Methods for estimating the patterns of influence of complex of technical and technological factors on the consumption of electrical energy and the rationale for the choice of directions of increase of efficiency of production zhelezorudnogo of raw materials in underground mining. A comprehensive approach to solving the problem of increasing electroenergoinvest production of iron ore raw materials by applying a system of monitoring, assessment and management process based predictive technological components that will allow you to achieve the desired effect on the analyzed problem – reducing the consumption of electrical energy.

УДК 62267:621.3

**Касаткіна І.В., Гнутов І.В.** Підвищення енергетичної ефективності тягового агрегату в кар'єрі

Підвищити енергетичну ефективність роботи тягового агрегату можливо за рахунок встановлення пристрою компенсації реактивної потужності в усьому діапазоні струмових навантажень шляхом плавної зміни реактивної потужності компенсатора. Пристрій складається з пасивного компенсатора реактивної потужності та вольтододавкового трансформатора. Використання компенсатора призводить до значного підвищення коефіцієнту потужності в номінальному режимі роботи і до перекомпенсації реактивної потужності при малих струмах навантаження, на тягових агрегатах та електровозах.

**Касаткіна І.В., Гнутов І.В.** Повышение энергетической эффективности тягового агрегата в карьере

Повысити энергетическую эффективность работы тягового агрегата возможно за счет установки устройства компенсации реактивной мощности во всем диапазоне токовых нагрузок путем плавного изменения реактивной мощности компенсатора. Устройство состоит из пассивного компенсатора реактивной мощности и вольтодобавочного трансформатора. Использование компенсатора приводит к значительному повышению коэффициента мощности в номинальном режиме работы и в перекомпенсации реактивной мощности при малых токах нагрузки, на тяговых агрегатах и электро-возах.

**Kasatkina I., Gnutov I.** Increase energy efficiency traction unit in career

Increase the energy efficiency of the traction unit is possible due to the installation of reactive power compensation device in the entire range of current loads by a smooth change of reactive power compensator. The apparatus includes a passive and reactive power compensator booster transformer. Using the compensator causes a considerable increase in rated power factor operation and the reactive power in overcompensation for small load currents, traction units and locomotives.

УДК 621.316

**Пересунько І.І.** Збільшення напруги дільничних мереж як спосіб підвищення якості електроенергії для самохідної техніки залізорудних шахт

У статті розповідається про переваги підвищення напруги до 660В внутрішньо шахтних дільничних мережах для застосування нової високо виробленої самохідної техніки. Мета роботи показати, що існує проблема якості електроенергії на шахтах що веде до зниження енергооснащеності підприємства. І запропоновано вирішення проблеми здійснити перехід на більш високий рівень напруги розподільних мереж. Підвищення напруги, як правило, покращує техніко-економічні показники системи електропостачання підприємства, одночасно поліпшується і якість електроенергії у споживачів.

**Пересунько І.І.,** Увеличение напряжения участковых сетей как способ повышения качества электроэнергии для самоходной техники железорудных шахт

В статье рассказывается про преимущества повышения напряжения до 660В внутришахтных участковых сетях для применения новой высоко производимой самоходной техники. Цель работы показать, что существует проблема качества электроэнергии на шахтах что ведет к снижению энерговооруженности предприятия. И предложено решение проблемы осуществить переход на более высокий уровень напряжения распределительных сетей. Повышение напряжения, как правило, улучшает технико-экономические показатели системы электроснабжения предприятия, одновременно улучшается и качество электроэнергии у потребителей.

**Peresunko I.** Increasing the voltage of the precinct networks as a means of improving the quality of electricity for self-propelled machinery iron ore mines



The article tells about the benefits of raising the voltage to 660V intramine district networks for the use of a new high made self-propelled equipment. The purpose of the work to show that there is a problem of power quality in the mines which leads to a decrease in enterprise power available. And propose a solution to make the transition to a higher level of voltage distribution networks. Increasing the voltage usually improves the technical and economic indicators of the enterprise power supply system, and at the same time improving the quality of electricity for consumers.

УДК 622.646:621.86.067.2:62.83

**Батраков Д.В.** Аналіз режимів роботи вібраційної транспортуючої машини з метою підвищення ефективності випуску руди

Проведений аналіз можливих режимів роботи вібраційної транспортуючої машини при використанні регульованого електропривода з метою підвищення ефективності процесу випуску руди. Математично розглянуто процес руху одиничної частинки по вібраційному органу для гармонійних коливань. Описані режими роботи для відповідних значень частоти коливань та амплітуди. Встановлено, що отриманий коефіцієнт режиму роботи вібротранспортної установки характеризує різні режими руху матеріалу: без відриву, з відривом та з відривом і без відриву матеріалу від ван-тажонесучого органу. Проведене математичне моделювання характеристики ефективності режиму роботи на прикладі одномасної вібраційної машини з інерційним приводом при зміні частоти обертання шляхом використання регульованого електропривода для номінальних параметрів. Встановлені значення коефіцієнту режиму роботи, частоти та амплітуди, які відповідають найбільш ефективним режимам вібротранспортування з точки зору досягнення максимальної швидкості транспортування руди.

**Батраков Д.В.** Анализ режимов работы вибрационной транспортирующей машины с целью повышения эффективности выпуска руды

Проведенный анализ возможных режимов работы вибрационной транспортирующей машины при использовании регулируемого электропривода с целью повышения эффективности процесса выпуска руды. Математически рассмотрен процесс движения единичной частицы по вибрационному органу для гармонических колебаний. Описанные режимы работы для соответствующих значений частоты колебаний и амплитуды. Установлено, что полученный коэффициент режима работы вибротранспортной установки характеризует различные режимы движения материала без отрыва, с отрывом и без отрыва материала от ван-тажонесущего органа. Проведенное математическое моделирование характеристики эффективности режима работы на примере одномассной вибрационной машины с инерционным приводом при изменении частоты вращения путем использования регулируемого электропривода для номинальных параметров. Установленные значения коэффициента режима работы, частоты и амплитуды, соответствующие самым эффективным режимам вибротранспортування с точки зрения достижения максимальной скорости транспортировки руды.

**Batrakov D.** Analysis of vibration modes of transport vehicles in order to improve ore output

The analysis of possible vibration modes of transport vehicles using regulated electric drive to improve the efficiency of production of ore. Mathematically considered the process of moving to a single particle vibration body for harmonic oscillations. Described modes for the respective values of the oscillation frequency and amplitude. It was established that the resulting ratio mode of installation vibrotransportnoyi describes different modes of motion of material: on the job, at a distance and margin without separation of material from van tazhonesuchoho body. Mathematical modeling characteristics of effective mode of vibration for example suited inertia machines driven by changing rotational speed by using adjustable Electric nominal parameters. Set ratio mode, frequency and amplitude, which correspond to the most efficient modes vibrotransportu-vannya in terms of achieving a maximum speed of transporting the ore.

УДК 621.316.7

**Козлов В.С., Євменов А. Ю.** Оцінка потенціалу енергоефективності прокатного стану

Подана робота присвячена питанням електричного енергозбереження. В роботі доведено, що найбільш затратним з енергетичної точки зору сектором національної промисловості є металургійне виробництво. Однією із ключових ланок металургії є прокатний стан. Таким чином, в роботі визначено основний об'єкт, який потребує «енергетичної оптимізації».

На прикладі неперервного заготівельного стану 900/700/500 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» виконано оцінку потенціалу енергоефективності. В результаті оцінки показано, що максимальний економічний ефект можна отримати при компенсації реактивної потужності в системі живлення. При цьому, компенсація активних втрат мережі, спричинених перетоками реактивної потужності та вищими гармоніками струму навантаження, дозволяє отримати значно менший економічний ефект.

Враховуючи проведену оцінку, запропоновано найбільш оптимальний за критерієм вартості шлях модернізації. Основні технічні та організаційні заходи запропонованого напрямку наступні: введення керованих перетворювачів в режим роботи з кутом керування, близьким до 0; регулювання швидкості обертання двигунів шляхом нереверсивного широтно-імпульсного перетворювача (ШІП); паралельне поєднання виходів керованих перетворювачів для створення спільної ланки постійного струму; реверс двигунів за допомогою збудника.

За попередніми підрахунками прогнозований термін окупності технічних рішень становить 2.5 місяців. Подальшими кроками обраного напрямку модернізації можуть бути розробка єдиної системи керування та технологічного контролю, вбудована до системи ШІП; модернізація законів керування ШІП для мінімізації впливу перетворювачів на мережу; уточнений розрахунок складових повної потужності мережі тощо.

**Козлов В.С., Евменов А. Ю.** Оценка потенциала энергоэффективности прокатного стана

Данная работа посвящена вопросам электрического энергосбережения. В работе доказано, что наиболее затратным с энергетической точки зрения сектором национальной промышленности является металлургическое производство. Одной из ключевых звеньев металлургии является прокатный стан. Таким образом, в работе определен основной объект, который нуждается в «энергетической оптимизации».

На примере непрерывного заготовительного состояния 900/700/500 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» выполнена оценка потенциала энергоэффективности. В результате оценки показано, что максимальный экономический эффект можно получить при компенсации реактивной мощности в системе питания. При этом, компенсация активных потерь сети, вызванных перетоками реактивной мощности и высшими гармониками тока нагрузки, позволяет получить значительно меньший экономический эффект.

Учитывая проведенную оценку, предложены наиболее оптимальный по критерию стоимости путь модернизации. Основные технические и организационные меры предложенного направления следующие: введение управляемых преобразователей в режим работы с углом управления, близким к 0; регулирования скорости вращения двигателей путем нереверсивного широтно-импульсного преобразователя (ШИП) параллельное соединение выходов управляемых преобразователей для создания совместной звена постоянного тока; реверс двигателей с помощью возбудителя. По предварительным подсчетам прогнозируемый срок окупаемости технических решений составляет 2.5 месяцев. Дальнейшими шагами выбранного направления модернизации могут быть разработка единой системы управления и технологического контроля, встроенная в систему ШИП; модернизация законов управления ШИП для минимизации влияния преобразователей на сеть; уточненный расчет составляющих полной мощности сети и тому подобное.

**Kozlov V., Yevmenov A.** Estimation of potential energy mill

The given issue is devoted to electrical energy conservation. It is proved that the most costly from an energy point of view of national industry sector is metallurgical production. One of the key parts of the industry are rolling mill. Thus, the paper identified the main subject in need of "energy optimization."

In the case of continuous blanking state 900/700/500 PJSC "ArcelorMittal Kryvyi Rih" the estimation of potential energy. In the evaluation shows that the maximum economic benefit can be obtained by reactive power compensation in power system. Thus, compensation active network losses caused by overflows of reactive power and higher harmonics load current provides a much smaller economic impact.

Given the ongoing assessment prompted the optimal value of the criterion path of modernization. Main technical and organizational measures proposed following direction: input converters in managed mode with the control angle close to 0; the motor speed control by pulse width Irreversible converter (SHIP); parallel combination of outputs controlled converters to create a common DC link; reverse engines using pathogen.

According to preliminary estimates of the projected payback period of technical solutions is 2.5 months. Next steps chosen direction of modernization can develop a unified management system and process control system built SHIP; SHIP management modernization laws to minimize the impact on network transformers; updated calculation component of power networks.

УДК 621.316.925:622.82

**Онищенко В.В.** Дослідження впливу коливань напруги живлення на роботу електричного привода рудникового електровоза

При роботі рудникових електровозів можливі відхилення напруги живлення від номінального значення, в зв'язку з чим, при виконанні певних умов, можуть відбуватися зриви комутацій в тиристорному перетворювачі, що знижують ефективність електричного гальмування. В даний час є ряд рішень, спрямованих на забезпечення безаварійного функціонування електроприводу в умовах знижень і зникнень напруги живлення. Це установка на електровозах спеціальних генераторів напруги, гальмування тягових двигунів при порушенні нормального режиму живлення, застосування контактно-акумуляторних електровозів. І все ж, відмічені шляхи вирішення цього завдання не є достатньо ефективними, тому що для досягнення поставленої мети вимагають застосування додаткового електрообладнання, що в деяких випадках ведуть до зниження продуктивності електровозної відкатки. На важких рудникових електровозах (величиною зчпної ваги менше 28 тон), а також середнього і легкого типу відсутній вільний простір для розміщення додаткового електроустаткування. Це викликає необхідність пошуку інших шляхів підвищення ефективності функціонування систем управління рудникових електровозів, розробки нових прогресивних засобів управління, розроблених на використанні енергії накопичувальних конденсаторів вхідних фільтрів, енергії обертових електричних машин (наприклад, в даному випадку енергії обертових ТД). Такий напрямок вирішення питання є достатньо економічним, так як не потребує використання додаткового силового обладнання, збільшення пов'язаних з цим експлуатаційних затрат.

**Онищенко В.В.** Исследование влияния колебаний напряжения питания на его работу привода рудничного электрова

При работе рудничных электровозов возможные отклонения напряжения питания от номинального значения, в связи с чем, при выполнении определенных условий, могут происходить срывы коммутаций в тиристорных преобразователях, снижающих эффективность электрического торможения. В настоящее время есть ряд решений, направленных на обеспечение безаварийного функционирования электропривода в условиях снижений и исчезновений напряжения питания. Это установка на электровозах специальных генераторов напряжения, торможения тяговых двигателей при нарушении нормального режима питания, применение контактно-аккумуляторных электровозов. И все же, отмеченные пути решения этой задачи не являются достаточно эффективными, так как для достижения поставленной цели требуют применения дополнительного электрооборудования, в некоторых случаях ведут к снижению производительности электровозной откатки. На тяжелых рудничных электровозах (величиной сцепного веса менее 28 тонн), а также среднего и легкого типа отсутствует свободное пространство для размещения дополнительного электрооборудования. Это вызывает необходимость поиска других путей повышения эффективности функционирования систем управления рудничных электровозов, разработки новых прогрессивных средств управления, разработанных на использовании энергии накопительных конденсаторов входных фильтров, энергии вращающихся электрических машин (например, в данном случае энергии вращающихся ТД). Такое направление решения вопроса является достаточно экономичным, так как не требует использования дополнительного силового оборудования, увеличение связанных с этим эксплуатационных затрат.

**Onishchenko V.** Investigation of voltage fluctuations to work electric drive of mine locomotive

When working mine electric voltage deviations from the nominal value, in connection with which, under certain conditions, there may be disruptions in switching thyristor converters that reduce the efficiency of electric braking. Currently, there are a number of decisions aimed at ensuring trouble-free operation under reduced electric and disappearance voltage. This installation of electric locomotives special voltage generators, braking traction engines in violation of normal power use, rechargeable electric contact. Yet marked solutions to this problem are not sufficiently effective as to achieve the purpose of requiring the use of additional electrical equipment, which in some cases lead to reduced productivity elektrovoznoy haulage. On heavy mine electric locomotives (Coupling largest weight less than 28 tons) and medium and light type no space for extra electrical equipment. This makes it necessary to find other ways to improve the efficiency of electric control system of mine, development of new advanced management tools designed to use energy storage capacitor input filter power rotating electrical machines (for example, in this case energy revolving TD). This way the question is quite economical as it does not require the use of additional power equipment, an increase in related operating costs.

УДК 622.625.28-83

**Гузов Е.С., Сінчук І.О., Кальмус Д.О.** Дослідження електромагнітних процесів в тяговому двигуні постійного струму з послідовною обмоткою збудження

Аналіз парку електричних машин сучасних підприємств показує, що найбільш поширеними залишаються двигуни постійного струму з послідовною обмоткою збудження. Наряду з існуючими перевагами яких, основним недоліком залишається складність переходу останніх в режим гальмування, та пов'язані з цим незручності в роботі транспортного засобу. Так один з найпоширеніших видів гальмування, як електродинамічне, обмежено значенням критичної частоти обертання, а режим противмикання – максимальним значенням струму гальмування. Тому для збереження ресурсу роботи двигунів та розширення діапазону застосування режиму динамічного гальмування, було проведено аналіз перехідних процесів у двигуні постійного струму з послідовною обмоткою збудження. Відзначено, що дослідження електромагнітних процесів даного виду електричних двигунів ускладнене, тим що в двигунах послідовного збудження магніторухливі сила, як наслідок, і магнітний потік змінюється із зміною струму якоря. Для можливості проведення досліджень було використано лабораторний стенд, який дозволив провести експеримент, та побудувати криву намагнічення. Було проведено її апроксимацію, та побудовано графіки. Аналіз графіків показує, що в зоні низьких швидкостей найбільш близьким є вираз гіперболічного синуса, а в зоні насичення гіперболічний. Отримані завдяки аналітичному виразу кривої намагнічення вирази дали можливість побудувати поверхні швидкості протікання електромагнітних процесів у двигуні постійного струму з послідовною обмоткою збудження в режимах противмикання та електродинамічного гальмування. Аналіз отриманих поверхонь показує, що перемикання з одного режиму електричного гальмування на інший буде супроводжуватись значними кидками струму двигунів, що не є бажаним та суттєво погіршує стан ізоляції обмоток двигуна, чим знижує його ресурс роботи та надійність електричного гальмування, від чого в значній мірі залежить ефективність роботи рудничного електровозу. Очевидним, також, є підвищений рівень пульсацій струму двигуна у такому режимі. Отримані результати формулюють основні вимоги до системи гальмування транспортного засобу, які полягають у розробці чіткого алгоритму функціонування такої системи.

**Гузов Е.С., Сінчук І.А., Кальмус Д.А.** Исследование электромагнитных процессов в тяговом двигателе постоянного тока с последовательной обмоткой возбуждения

Анализ парка электрических машин современных предприятий показывает, что наиболее ширине остаются двигатели постоянного тока с последовательной обмоткой возбуждения. Наряду с существующими преимуществами которых, основным недостатком остается сложность перехода последних в режим торможения, и связанные с этим неудобства в работе транспортного средства. Так один из наиболее распространенных видов торможения, как электродинамический, ограничен значением критической частоты вращения, а режим противовключения - максимальным значением тока торможения. Поэтому для сохранения ресурса работы двигателей и расширение диапазона применения режима динамического торможения, был проведен анализ переходных процессов в двигателе постоянного тока с последовательной обмоткой возбуждения. Отмечено, что исследования электромагнитных процессов данного вида электрических двигателей затруднено, тем, что в двигателях последовательного возбуждения магнитоиндукция сила, как следствие, и магнитный поток меняется с изменением тока якоря. Для возможности проведения исследований были использованы лабораторный стенд, который позволил провести эксперимент, и построить кривую намагничивания. Было проведено ее аппроксимацию, и построены графики. Анализ графиков показывает, что в зоне низких скоростей наиболее близким является выражение гиперболического синуса, а в зоне насыщения гиперболический. Полученные благодаря аналитическому выражению кривой намагничивания выражения позволили построить поверхности скорости протекания электромагнитных процессов в двигателе постоянного тока с последовательной обмоткой возбуждения в режимах противовключения и электродинамического торможения. Анализ полученных поверхностей показывает, что переключение с одного режима электрического торможения на другой будет сопровождаться значительными бросками тока двигателей, не желательно и существенно ухудшает состояние изоляции обмоток двигателя, чем снижает его ресурс работы и надежность электрического торможения, от чего в значительной степени зависит эффективность работы рудничного электровоза. Очевидно, также, является повышенный уровень пульсаций тока двигателя в таком режиме. Полученные результаты определяют основные требования к системе торможения транспортного средства, которые заключаются в разработке четкого алгоритма функционирования такой системы.

**Huzov E., Sinchuk I., Kalmus D.** Research of electromagnet processes in traction motor DC successive winding

Analysis fleet of electric cars modern enterprises shows that most popular are DC motors with successive winding. Along with the existing benefits whose main disadvantage is the complexity of the transition last braking mode, and the associated discomfort in the vehicle. So one of the most popular types of brake as electrodynamic, limited by the critical speed, and mode protyvmykannya - maximum braking power. So to save the life of the engine and expand the range of application of dynamic braking mode, an analysis of transients in DC motors sequentially winding. It is noted that the study of electro-

magnetic processes this type of complicated electric motors, the motors in sequential excitation mag-nitorushiyana force, as a consequence, the magnetic flux changes with the change of the current anchor. To be able to conduct research used laboratory stand, which allowed to experiment and build-ing curve magnetized. It held its approximation and graphs. Analysis charts shows that the area of low speeds is the closest expression hyperbolic sine and hyperbolic saturation zone. Obtained through analytical expression expressions magnetization curve made it possible to build a surface of the speed of electromagnetic processes in DC motors sequentially winding modes protyvmykannya and electrodynamic braking. Analysis of the surface shows that switching from one mode electric braking on the other will be accompanied by large current surge engines that are not desirable and significantly worsens the condition of Isola tion of motor windings, the decreases its operation life and reliability of the electric braking, causing greatly depends on the efficiency of the mine electric locomotives. Obvious, too, is an increased level of output ripple current in this mode. The results formulate the basic requirements for braking systems transpotrnoho means that the preparation of a clear algorithm for operation of the system.

УДК 621.316.925:622.82

**Кальмус Д.О., Грачев М.М.** Дослідження граничних умов ефективного переходу тягового електроприводу рудникових електровозів з режиму тяги у режим гальмування

Важливою складовою для побудови надійної системи керування електроприводом рудникового електровозу є визначення граничних умов переходу електроприводу із режиму тяги в режим динамічного гальмування. Особливо несприятливо на роботі імпульсних систем управління позначаються зниження і спотворення напруги на струмознімачах електроприводу, що істотно знижує надійність та ефективність гальмування тягового електроприводу і може служити причиною втрати керуваності. Існують різні методи вирішення цієї задачі, але методи основані на використування накопиченої енергії у конденсаторі вхідного фільтру отримали найбільше поширення. Метою цієї роботи є дослідження електромагнітних процесів у тяговому двигуні рудничного електровозу при переході системи електроприводу з режиму тяги у режим гальмування. Проведено аналіз електромагнітних процесів у тягових двигунах при переході системи електроприводу з режиму тяги у режим гальмування. З аналізу була встановлена залежність, що дозволяє зробити оцінку граничних умов переходу з режиму тяги у режим гальмування в залежності від ряду факторів, які враховують конструктивні особливості системи електроприводу та початкові умови у колі гальмування.

**Кальмус Д.А., Грачев М.Н.** Исследование граничных условий эффективного перехода тягового электропривода рудничных электровозов из режима тяги в режим торможения

Важной составляющей для построения надежной системы управления электроприводом рудничного электровоза является определение граничных условий перехода электропривода из режима тяги в режим динамического торможения. Особенно неблагоприятно на работе импульсных систем управления сказываются снижение и искажение напряжения на токосъемник электропривода, что существенно снижает надежность и эффективность торможения тягового электропривода и может служить причиной потери управляемости. Существуют различные методы решения этой задачи, но методы основаны на использовании накопленной энергии в конденсаторе входного фильтра получили наибольшее распространение. Целью настоящей работы является исследование электромагнитных процессов в тяговом двигателе рудничного электровоза при переходе системы электропривода из режима тяги в режим торможения. Проведен анализ электромагнитных процессов в тяговых двигателях при переходе системы электропривода из режима тяги в режим торможения. Из анализа была установлена зависимость, позволяет сделать оценку граничных условий перехода из режима тяги в режим торможения в зависимости от ряда факторов, которые учитывают конструктивные особенности системы электропривода и начальные условия в кругу торможения.

**Kalmus D., Grachev M.** Research limiting the effective transfer of traction electric mine locomotives mode traction in braking mode

An important component for building a sound system of motor control mine electric locomotive is to determine the boundary conditions of transition mode electric traction in dynamic braking mode. Especially at work adversely impulse control systems marked reduction in stress and distortion electric current collector, which significantly reduces the reliability and efficiency of electric traction and braking can cause loss of control. There are various methods of solving this problem, but the methods are based on the use of stored energy in the capacitor input filter is common. The aim of this work is to study electromagnetic processes in mine electric locomotives traction motor system during the transition mode electric traction in braking mode. The analysis of electromagnetic processes in the traction motor system during the transition mode electric traction in braking mode. The analysis is the dependence that makes evaluation of boundary conditions transition mode traction in braking mode depending on a number of factors that the design features of the electric system and initial conditions in the range of braking.

УДК 621.316.14

**Лікарченко А.Г., Петриченко А.А., Зиманков Р.В.** Оценка электрических параметров изоляции распределительных сетей железнодорожных шахт Кривбасса в нынешних условиях их эксплуатации

В статье приведены результаты исследований состояния изоляции распределительных сетей шахт Криворожского железнодорожного бассейна. Анализ параметров изоляции сетей железнодорожных шахт является важным этапом для повышения эффективности функционирования существующих и разработки новых аппаратов защиты от утечек тока, задача которых осуществлять безопасность горнорабочих при эксплуатации электротехнических комплексов в подземных горных выработках. Эффективная и стабильная работа аппаратов защиты от утечек определяется правильностью измерения активного сопротивления и емкости изоляции сети, т.е. косвенного определения токов утечки, дальнейшей компенсации емкостных токов утечки и обеспечения достаточно быстрого отключения сети при повреждении изоляции или прикосновении человека. Проведен анализ и статистическая оценка электрических параметров изоляции сетей железнодорожных шахт. Полученные результаты рекомендуется принимать в качестве исходных данных при разработке эксплуатационно-технических требований к устройствам защитного отключения в распределительных сетях железнодорожных шахт.

**Лікарченко А.Г., Петриченко А.А., Зиманков Р.В.** Оцінка електричних параметрів ізоляції розподільних мереж залізничних шахт Кривбасу в сучасних умовах їх експлуатації

У статті наведено результати досліджень стану ізоляції розподільних мереж шахт Криворізького залізничного басейну. Аналіз параметрів ізоляції мереж залізничних шахт є важливим етапом для підвищення ефективності функціонування існуючих і розробки нових апаратів захисту від витоків струму, завдання яких здійснювати безпеку гірників при експлуатації електротехнічних комплексів в підземних гірничих виробках. Ефективна і стабільна робота апаратів захисту від витоків визначається правильністю вимірювання активного опору і ємності ізоляції мережі, тобто непрямого визначення струмів витоків, подальшої компенсації ємнісних струмів витоків і забезпечення достатньо швидкого відключення мережі при пошкодженні ізоляції або дотику людини. Проведено аналіз та статистична оцінка електричних параметрів ізоляції мереж залізничних шахт. Отримані результати рекомендується приймати в якості вихідних даних при розробці експлуатаційно-технічних вимог до пристроїв захисного відключення в розподільних мережах залізничних шахт.

**Likarenko A., Petrychenko A., Zimankov R.** Evaluation parameters electrical insulation of distribution networks Kryvbas iron ore mines in the conditions of their operation

The results of investigations of the state of insulation of distribution networks mines Kryvbas. Analysis of the insulation value of iron ore mines networks is an important step to improve the efficiency of existing and development of new protective devices against current leakage, which carries out the task of miners safety in the operation of electrical systems in underground mines. Efficient and stable operation of protective devices against leakage measurement is determined by the accuracy of resistance and capacitance network isolation, ie indirect determination of leakage currents, further compensation of capacitive leakage currents and provide a fast enough network outages when an insulation fault or human touch. The analysis and statistical evaluation of electrical insulation parameters of iron ore mines networks. The results are encouraged to take as input in the development of operational and technical requirements for protective devices in distribution networks iron ore mines.

УДК 621.316.925:622.82

**Гузов Е.С., Синчук І.О., Кальмус Д.О., Лагода М.І.** Підвищення ефективності електричного гальмування тягових електроприводів рудникових електровозів

У статті розглянуто способи гальмування рудникових електровозів з електроприводом постійного струму. Відзначено актуальність та необхідність пошуку рішень щодо підвищення ефективності електричного гальмування рудникових електровозів. Встановлено, що область застосування останнього обмежена умовою самозбудження тягових двигунів, що в свою чергу ускладнює процес гальмування необхідністю застосовувати додаткові елементи з метою ініціації струму збудження. Виходячи з умови самозбудження двигунів було проведено аналіз найбільш поширених схемних рішень тягових електроприводів, виділено основні елементи, що входять до таких схем, та складено узагальнену структуру тягового електропривода з імпульсним регулятором. Розглянуто можливі варіанти спільного використання режиму електродинамічного гальмування і противмикання тягових двигунів. Відзначено проблеми, які виникають при такому способі гальмування. Складено рекомендації щодо застосування режимів гальмування. Визначено основні функції, які має виконувати алгоритм ефективного гальмування. Зазначено, що головним завданням є забезпечення широкого діапазону застосування та запобігання відмовам системи електричного гальмування.

**Гузов Е.С., Синчук И.А., Кальмус Д.А., Лагода М.И.** Повышение эффективности электрического торможения тяговых электроприводов рудничных электровозов

В статье рассмотрены способы торможения рудничных электровозов с электроприводом постоянного тока. Отделено актуальность и необходимость поиска решений по повышению эффективности электрического торможения рудничных электровозов. Установлено, что область применения последнего ограничена условием самовозбуждения тяговых двигателей, в свою очередь усложняет процесс торможения необходимостью применять дополнительные элементы с целью инициации тока возбуждения. Исходя из условия самовозбуждения двигателей был проведен анализ наиболее распространенных схемных решений тяговых электроприводов, выделены основные элементы, входящие в таких схем, и составлен обобщенную структуру тягового электропривода с импульсным регулятором. Рассмотрены возможные варианты совместного использования режима электродинамического торможения и противовключения тяговых двигателей. Отмечено проблемы, возникающие при таком способе торможения. Составлен рекомендации по применению режимов торможения. Определены основные функции, которые должен выполнять алгоритм эффективного торможения. Отмечено, что главной задачей является обеспечение широкого диапазона применения и предотвращения отказов системы электрического торможения.

**Huzov E., Sinchuk I., Kalmus D., Lagoda M.** Improved dynamic braking traction electric mine locomotives

The article deals with how mine electric braking with the electric DC. From Values urgency and the need to find solutions to improve the efficiency of the electric braking mine electric locomotives. It is established that the scope of the latter is limited by self-excitation traction motors, which in turn makes it difficult to brake the need to use additional elements to initiate excitation current. Based on the conditions of self-excitation motors have analyzed the most common circuit design of electric traction, highlights the main elements that make up such schemes and generalized structure composed of traction electric drive with impulse control. The possible options for sharing regime electrodynamic braking and traction engines protyvmykannya. Noted problems that arise with this method of braking. Prepared guidelines for a braking mode. The main features that should perform effective braking algorithm. It is noted that the main task is to provide a wide range of application failures and prevent electrical braking system.

УДК 621.316.925:622.82

**Кальмус Д.О., Коваленко І.І.** Підвищення надійності роботи тягового електричного привода рудникового контактного електровоза засобами системи керування

Тяговий електропривод рудникового контактної електровоза має ряд проблем з надійністю роботи. Зокрема постає питання про підвищення функціонування контактних рудникових електровозів при порушеннях нормальних умов живлення. В теперішній час є ряд рішень спрямованих на забезпечення безаварійного функціонування електроприводу при зниженні або зникненні напруги живлення, розроблені системи координуючі інтервал часу формування замикаючих і відкриваючих імпульсів. Але даний варіант підвищення надійності не захищає від помилкових імпульсів перешкод. Так при відхиленні від номінальних значень або навіть зникненні напруги живлення можуть виникати аварійні режими. Метою

даного способу є підвищення надійності роботи тягових електроприводів контактних електровозів засобами системи керування. Зникнення напруги живлення є найбільш несприятливою ситуацією. При цьому зі зменшенням напруги конденсатора від якого живиться система керування виникають імпульсні перешкоди в результаті відбувається перемикання імпульсної апаратури. Інформація про перемикання контакторів надходить на керуючий вхід, змінюючи в сторону зменшення його вихідну напругу за допомогою чого здійснюється контроль співвідношення величини напруги пропорційного пульсаціям струму і напруги пропорційного рівню їх обмеження. При перевищенні струмом цього рівня, і при відсутності процесу перезарядження конденсатора, а також якщо струм в силовому ланцюзі двигуна наростає, то формується позачерговий імпульс на відмикання ключа. Якщо імпульс перешкоди виникає в керуючому ланцюзі в період закритого стану ІР, струм двигуна починає наростати. Таким чином оперативно розпізнається порушення нормального режиму роботи ІР на ранній стадії. При цьому також формується позачерговий коригувальний імпульс. Тому, в разі зникнення напруги в мережі живлення струм розряду конденсатора вхідного фільтра, під час створення ініціюючого гальмівного струму, не перевищує заданого рівня. З метою запобігання аварійних ситуацій, що можуть виникнути при тривалих зникненнях напруги живлення на струмознімачі транспортного засобу, необхідно зберігати керуваність електроприводу при порушенні нормального режиму живлення. Для чого під час зникнення напруги живлення, режим роботи системи управління повинен вибиратися автоматично, виходячи з умов руху характеру зміни рівнів напруги на струмознімачі і конденсаторі.

**Кальмус Д.А., Коваленко І.І.,** Повышение надежности работы тягового электрического привода рудничного контактного электровоза средствами системы управления

Тяговый электропривод рудничного контактного электровоза имеет ряд проблем с надежностью работы. В частности встает вопрос о повышении функционирования контактных рудничных электровозов при нарушениях нормальных условий питания. В настоящее время есть ряд решений направленных на обеспечение безаварийного функционирования электропривода при снижении или исчезновении напряжения питания, разработанные системы координирующие интервал времени формирования замыкающих и открывающих импульсов. Но данный вариант повышения надежности не защищает от ложных импульсов помех. Так при отклонении от номинальных значений или даже исчезновении напряжения питания могут возникать аварийные режимы. Целью данного способа является повышение надежности работы тяговых электроприводов Контактный электровозов средствами системы управления. Исчезновение напряжения питания является наиболее неблагоприятной ситуацией. При этом с уменьшением напряжения конденсатора от которого питается система управления возникают импульсные помехи в результате происходит переключение импульсной аппаратуры. Информация о переключении контакторов поступает на управляющий вход, изменяя в сторону уменьшения его выходное напряжение с помощью чего осуществляется контроль соотношения величины напряжения пропорционального пульсаціям тока и напряжения пропорционального уровню их ограничения. При превышении током этого уровня, и при отсутствии процесса перезарядки конденсатора, а также если ток в силовой цепи двигателя нарастает, то формируется внеочередной импульс на отпирание ключа. Если импульс препятствия возникает в управляющей цепи в период закрытого состояния ІР, ток двигателя начинает нарастать. Таким образом оперативно распознается нарушения нормального режима работы ІР на ранней стадии. При этом также формируется внеочередной Корр тельный импульс. Поэтому, в случае исчезновения напряжения в сети питания ток разряда конденсатора входного фильтра, при создании иницирующего тормозного тока, не превышает заданного уровня. С целью предотвращения аварийных ситуаций, которые могут возникнуть при длительных исчезновениях напряжения питания на токосъемники транспортного средства, необходимо сохранять управляемость электропривода при нарушении нормального режима питания. Для чего при исчезновении напряжения питания, режим работы системы управления должен выбираться автоматически, исходя из условий движения характера изменения уровней напряжения на токосъемники и конденсаторе.

**Kalmus D., Kovalenko I.** Improve the reliability of the traction electric drive of mine locomotive means of contact management system

Traction electric mine locomotive contactor has some problems with reliability. In particular, the question of improving the functioning of the contact mine electric locomotives in violation of normal power supply. Currently, there are a number of solutions to ensure trouble-free operation while reducing electric or disappearance of the supply voltage, developed a system coordinating the formation interval closing and opening pulses. But this option is increasing the reliability does not protect against false pulse interference. Since the deviation from nominal values or even the disappearance of the supply voltage can occur. The goal of this method is to improve the reliability of electric traction electric tools's contact management system. The disappearance of the supply voltage is the most unfavorable situation. At the same time with a decrease in capacitor voltage from which powered the control system having impulse noise resulting from the switching pulse equipment. Information about switching contactors enters the control input changing towards reducing its output voltage whereby the monitored voltage proportional to the ratio value of ripple current and voltage proportional to the level of restriction. In excess of the current level, and in the absence of capacitor recharging process, and if the current in the power circuit of the engine increases, then formed an extraordinary impulse to unlocking key. If impulse noise occurs in the circuit manager during the closed state of the IP, the current engine begins to grow. So quickly recognized the disruption of the IP regime early. It also formed an extraordinary Correct-thick boost. Therefore, in case of power failure in the power supply capacitor discharge current filter input when creating the initiating braking current does not exceed the specified level. In order to prevent accidents which may occur during prolonged power failure in power supply current collectors vehicle to keep control of the electric in violation of the normal supply. Why disappearances during supply voltage mode control system should be selected automatically based on the nature of the traffic changes in voltage levels and current collectors capacitor.

УДК 622.7: 658.562

**Савицкий А.И., Тимошенко М.А.** Управление гидроциклоном второй стадии рудоизмельчения

Основными направлениями достижения экономического эффекта в обогащении железной руды является увеличение производительности технологических агрегатов и повышение качества получаемого продукта, что требует комплексной автоматизации обогатительных процессов. Управление обогатительным комплексом требует значительных затрат – дорогостоящего измерительного оборудования и значительных вычислительных мощностей. Кроме того, процесс обогащения железной руды целесообразно рассматривать как распределенную систему, состоящую из отдельных технологических

процессов с отдельными системами управления, связанными между собой и влияющими друг на друга. Рассматривая гидроциклон одной, отдельно взятой, второй стадии измельчения можно значительно упростить вычисления и рассмотреть возможные реакции. Таким образом, встает вопрос разработки системы управления, которая учитывала бы рассмотренные аспекты. Решение задачи разработки такой системы управления обуславливает актуальность данной работы. Ее целью является разработка системы управления гидроциклоном второй стадии измельчения с учетом его позиции в иерархии общей системы. Обусловлены основные параметры, влияющие на работу гидроциклона в комплексе с зумпфом и возможные управляющие воздействия. Рассмотрены основные способы управления технологическим комплексом зумпф-гидроциклон. Разработана система управления рассмотренным технологическим комплексом при детерминированных параметрах. Указаны направления дальнейших исследований – использование современных интеллектуальных средств автоматизации и усовершенствование распределенного управления комплексом обогащения железной руды.

**Савицький О.І., Тимошенко М.А.** Управління гідроциклоном другій стадії рудоподрібнення

Основними напрямками досягнення економічного ефекту у збагаченні залізної руди являється збільшення продуктивності технологічних агрегатів та підвищення якості отримуваного продукту, що вимагає комплексної автоматизації процесів збагачення. Керування збагачувальним комплексом вимагає значних затрат – коштовного вимірювального обладнання та значних розрахункових потужностей. Крім того, процес збагачення залізної руди доцільно розглядати як розподілену систему, що складається з окремих технологічних процесів з окремими системами управління, що пов'язані між собою та впливають одна на одну. Розглядаючи гідроциклон однієї, окремо взятої, другої стадії подрібнення, можна значно спростити розрахунки та розглянути можливі реакції. Таким чином, постає питання розробки системи керування, яка враховувала б розглянуті аспекти. Вирішення задачі розробки такої системи обумовлює актуальність даної роботи. Її ціллю являється розробка системи керування гідроциклоном другої стадії подрібнення з урахуванням його позиції в ієрархії загальної системи. Обумовлені основні параметри, що впливають на роботу гідроциклона у комплексі з зумпфом та можливі керуючі впливи. Розглянуті основні способи керування технологічним комплексом зумпф-гідроциклон. Розроблена система керування розглянутим технологічним комплексом при детермінованих параметрах. Указані напрямки подальших досліджень – використання сучасних інтелектуальних засобів автоматизації та удосконалення розподіленого керування комплексом збагачення залізної руди.

**Savytskyi O., Tymoshenko M.** Control of the hydrocyclone of the second stage of ore grinding

The main areas of achievement of economic benefit in iron ore enriching is to increase the productivity of production units and improving the quality of the product, which requires a complex automation of enrichment processes. Control of processing complex is costly – expensive measuring equipment and considerable computing power. In addition, iron ore beneficiation process should be viewed as a distributed system consisting of separate processes with separate control systems, interconnected and influenced each other. Considering hydrocyclone of one single, the second stage of grinding, can greatly simplify the calculations and allow to consider possible reaction. This begs the question of the development of a control system, that takes into account the considered aspects. Solution of development of such control system determines the urgency of this work. Its purpose is to develop a second stage hydrocyclone grinding control system in view of its position in the hierarchy of the overall system. Major parameters that affect the operation of the hydrocyclone in conjunction with a sump and possible control actions are caused. The basic technological complex control methods sump-hydrocyclone are reviewed. A control system of considered complex process with deterministic parameters designed. Shown directions for further research - the use of modern intelligent automation and improvement of the distributed control of iron ore enrichment complex.

УДК 65.011.56: 622.7.01

**Моркун В.С., Моркун Н.В., Тронь В.В.** Идентификация нелинейных объектов управления обогатительного производства на основе ядерного преобразования Вольтерра-Лагерра

В статье приведены результаты исследования методов идентификация нелинейных объектов управления в условиях обогатительного производства на основе ядерного преобразования Вольтерра-Лагерра в условиях неустойчивости характеристик поступающего на переработку железорудного сырья. Рассмотрены методы определения коэффициентов Лагерра при формировании модели процессов переработки железорудного сырья.

**Моркун В. С., Моркун Н. В., Тронь В.В.** Идентификация нелинейных объектов управления збагачувального виробництва на основі ядерного перетворення Вольтерра-Лагерра

У статті наведені результати дослідження методів ідентифікації нелінійних об'єктів керування в умовах збагачувального виробництва на основі ядерного перетворення Вольтерра-Лагерра в умовах нестійкості характеристик залізрудної сировини, що надходить на переробку. Розглянуто методи визначення коефіцієнтів Лагерра при формуванні моделі процесів переробки залізрудної сировини.

**Morkun V. S., Morkun N.V., Tron V.V.** Identification of non-linear control of objects in a processing production through Volterra-Laguerre kernel transformation

The results of the research methods of identification of nonlinear control objects in a processing industry on the basis of kernel Volterra-Laguerre transformations in the conditions of instability specifications for the processing of iron ore were proposed. The methods of determining factors in the formation of Laguerre models of processing of iron ore was analysed.

УДК 681.513.54:622.788

**Клименко Д.О.** Аналіз систем автоматичного керування процесом термічної обробки обкотишів на фабриці огрудкування

У статті розглянуто актуальні питання ефективності термічної обробки залізрудних обкотишів на конвеєрних випалювальних машинах. Розглянуто існуючі підходи та методи автоматичного керування процесом термічної обробки обкотишів, на основі розглянутої інформації виділено основні переваги та недоліки представлених систем автоматичного керування. Виявлено, що способи та методи керування процесом термічної обробки обкотишів вивчені не повною мірою та знаходяться на стадії дослідження. На основі аналізу існуючих робіт, а також перспективних методів керування інерційними процесами, що характеризуються нестационарністю параметрів в часі, визначено напря-

мок подальших досліджень – розвиток методів адаптивного прогнозного керування процесом термічної обробки обкотишів в умовах коливань гранулометричного складу та порозності шару, зміни параметрів технологічного устаткування. Запропоновано варіант структури системи керування температурним режимом випалювання обкотишів для окремої газоповітряної камери конвеєрної випалювальної машини, де пропонується здійснювати оперативне оцінювання параметрів моделі процесу для подальшої адаптації параметрів прогнозного регулятора.

**Клименко Д.А.** Анализ систем автоматического управления процессом термической обработки окатышей на фабрике окомкования

В статье рассмотрены актуальные вопросы эффективности термической обработки железорудных окатышей на конвейерных обжиговых машинах. Рассмотрены существующие подходы и методы автоматического управления процессом термической обработки окатышей на основе рассмотренной информации выделены основные преимущества и недостатки представленных систем автоматического управления. Выявлено, что способы и методы управления процессом термической обработки окатышей изучены не в полной мере и находятся на стадии исследования. На основе анализа существующих работ, а также перспективных методов управления инерционными процессами, характеризующихся нестационарностью параметров во времени, определено направление дальнейших исследований - развитие методов адаптивного прогнозирующего управления процессом термической обработки окатышей в условиях колебаний гранулометрического состава и порозности слоя, изменения параметров технологического оборудования. Предложен вариант структуры системы управления температурным режимом обжига окатышей для отдельной газозвушной камеры конвейерной обжиговой машины, где предлагается осуществлять оперативное оценивание параметров модели процесса для последующей адаптации параметров прогнозирующего регулятора.

**Klimenko D.** Analysis of automatic control process heat treatment pellets in a factory pelletizing

The article deals with current issues of efficiency thermal processing of iron ore pellets on conveyor roasting machines. Existing approaches and methods of automatic process control pellet heat treatment on the basis of the information highlights the main advantages and disadvantages presented by the systems of automatic control. Found that the methods and techniques to manage the process of heat treatment of pellets not fully understood and are under investigation. Based on the analysis of existing operations as well as advanced management methods inertia processes are characterized by parameters transience of time, determined the direction of future research - development of methods for predicting adaptive process control heat treatment conditions in pellet size distribution and fluctuations poroznosti layer, changing the parameters of the process equipment. The variant management structure of the temperature regime of burning pellets to separate the gas chamber kilns conveyor machines, offering the operational parameter estimation process model for further adaptation parameters predictive controller.

УДК 681.513.6:621.69

**Охота К.А.** Адаптивна система керування продуктивністю насосної станції подачі води на збагачувальну фабрику

У статті розглянуто актуальні питання ефективності процесу подачі води на збагачувальну фабрику. Коротко описаний технологічний процес подачі води в трубопровід. Обґрунтовано питання продуктивності адаптивної системи керування насосною станцією подачі води, та вимоги до неї, проведена аналогія між існуючими системами. Розглянуто приклади САР насосних станцій, визначено їх переваги та недоліки, проаналізовано якість та продуктивність автоматизованих систем насосних станцій. Розроблено та проаналізовано систему керування насосною станцією на базі нечіткої логіки, приведено її переваги та недоліки. Описано спосіб керування, виведені формули адаптації.

Таким чином, вказано напрямки подальших досліджень – розвиток автоматичних систем керування продуктивністю насосної станції, вираховувати об'єм води необхідний кожній секції.

**Охота К.А.** Адаптивная система управления производительностью насосной станции подачи воды на обогатительную фабрику

В статье рассмотрены актуальные вопросы эффективности процесса подачи воды на обогатительную фабрику. Коротко описаний технологический процесс подачи воды в трубопровод. Обоснованно вопрос производительности адаптивной системы керування насосной станцией подачи воды, и требования к ней, проведена аналогия между существующими системами. Рассмотрены примеры САР насосных станций, определены их преимущества и недостатки, проанализированы качество и производительность автоматизированных систем насосных станций. Разработан и проанализирована система управления насосной станцией на базе нечеткой логики, приведены ее преимущества и недостатки. Описан способ управления, выведены формулы адаптации.

Таким образом, указано направление дальнейших исследований - развитие автоматических систем управления производительностью насосной станции, вычислив объем воды необходим каждой секции.

**Okhota K.** Adaptive System of Rate Control Considering Random Variables of Water Consumption at a Concentrating Plant's Pumping Station

In the article the actual questions the efficiency of the water supply to the beneficiation plant. Briefly described manufacturing process water supply pipeline. Grounded performance issues adaptive control system pump station water supply and demands her drawn an analogy between existing systems. Examples ATS pumping stations, identified their strengths and weaknesses, analyzes the quality and performance of automated systems for pumping stations. Developed and analyzed pump station control system based on fuzzy logic, given its benefits and drawbacks. Describes how to control formulas adaptation.

Thus, given the direction of future research – development of automated systems management products-ness pumping station, setting the volume of water needed each section.

УДК 681.51: 622.788

**Лобов В.Й., Нескоромна М.В.** Синтез модального регулятора для процесу випалу обкотишів у конвеєрній печі фабрики орудкування

Обґрунтовано наукову та практичну задачу використання багатомірної системи керування технологічним процесом випалу обкотишів у конвеєрній печі. Багатомірна математична модель враховує: висоту шару обкотишів, стабілізацію тиску



газу, витрат газу в зоні сушки, регулювання температури та тиску в горні зони підігріву, стабілізацію витрат повітря в зоні охолодження, регулювання температури повітря та інші технологічні параметри. Для забезпечення оптимального режиму випалу обкотишів запропоновано використати систему автоматичного керування на основі модального регулятора. Проведено моделювання процесу випалу обкотишів у конвеєрній печі фабрики орудкування за допомогою SIMULINK програмного пакету MATLAB. Виконано синтез модального регулятора для цієї моделі. В результаті моделювання багатовимірної системи автоматичного керування при використанні модального регулятора встановлено, що максимальна тривалість перехідного процесу складає 120 с витрат повітря в зоні сушки 1, а мінімальна – секунду, при регулюванні висоти шару обкотишів.

**Лобов В.И., Нескоромная М. В.** Синтез модального регулятора для процесса обжига окатышей в конвейерной печи фабрики окомкования

Обоснована научная и практическая задача использования многомерной системы управления технологическим процессом обжига окатышей в конвейерной печи. Многомерная математическая модель учитывает высоту слоя окатышей, стабилизацию давления газа, расхода газа в зоне сушки, регулирования температуры и давления в горне зоны подогрева, стабилизацию расхода воздуха в зоне охлаждения, регулировка температуры воздуха и другие технологические параметры. Для обеспечения оптимального режима обжига окатышей предложено использовать систему автоматического управления на основе модального регулятора. Проведено моделирование процесса обжига окатышей в конвейерной печи фабрики орудкування с помощью SIMULINK программного пакета MATLAB. Выполнен синтез модального регулятора для этой модели. В результате моделирования многомерной системы автоматического управления при использовании модального регулятора установлено, что максимальная продолжительность переходного процесса составляет 120 с расхода воздуха в зоне сушки 1, а минимальная - секунду, при регулировании высоты слоя окатышей. Синтез модального регулятора для процесса обжига окатышей в конвейерной печи фабрики окомкования

**Lobov V., Neskormnna M.** Synthesis of modal regulator of pellet firing in a conveyor-type kiln at pelletizing plants

A scientific and practical task using multivariate system control process of pellet firing in a conveyor-type kiln Multidimensional mathematical model include: the height of the layer of pellets, stabilize the gas pressure, gas consumption in the drying zone, temperature and pressure in the furnace heating zone, stabilization of air flow in the cooling zone, regulating temperature and other process variables. To ensure the best mode of firing pellet proposed use the automatic control system based on modal regulator. The modeling process of firing pellets in a conveyor-type kiln using SIMULINK software package MATLAB. Done the synthesis of modal regulator for this model. As a result of multidimensional modeling automatic control system using modal regulator found that the maximum duration of the transition process is 120 with costs of air in the drying zone 1 and the minimum - second the height adjustment layer pellet.

УДК 622.733-52

**Жосан А.А.** Непараметрический регулятор нелинейных процессов

Значительная часть современных методов синтеза систем управления технологическими процессами базируется на линейных представлениях об объекте управления. Главной особенностью линейных процессов является допущение справедливости принципа суперпозиции. Однако, большинство существующих процессов линейными можно назвать лишь условно. Поэтому попытка получить глобальную модель нелинейного объекта практически обречена. В настоящее время целым рядом математических и физических школ развивается подход, основанный на неравновесной динамике, позволяющей все шире ставить вопрос об объекте управления как о "черном ящике". В представленной работе развивается именно такой подход. Приведенные результаты дают основания считать такой подход более рациональным, чем линейный.

**Жосан А.А.** Непараметрических регулятор нелинейных процессов

Значительная часть современных методов синтеза систем управления технологическими процессами базируется на линейных представлениях о объекте управления. Главной особенностью линейных процессов является допущение справедливости принципа суперпозиции. Однако, большинство существующих процессов линейными можно назвать лишь условно. Поэтому попытка получить глобальную модель нелинейного объекта практически обречена. В настоящее время целым рядом математических и физических школ развивается подход, основанный на неравновесной динамике, позволяющей все шире ставить вопрос об объекте управления как о "черном ящике". В представленной работе развивается именно такой подход. Приведенные результаты дают основания считать такой подход более рациональным, чем линейный.

**Zhosan A.** Nonparametric controller for nonlinear processes

A significant part of modern methods of synthesis of control systems of technological processes is based on linear representations about the object of management. The main feature of linear processes is the assumption of the validity of the superposition principle. However, most existing processes are linear can be called only conditionally. Therefore, the attempt to obtain a global model of nonlinear object is practically doomed. Currently a number of mathematical and physical schools develops an approach based on nonequilibrium dynamics, allowing increasingly raise the question about the control object as a "black box". In the presented work develops such an approach. The results give reason to believe this approach is more efficient than linear.

УДК 622.73:622.023

**Азарян А.А., Пыбулевский Ю.Е., Кучер В.Г., Швец Д.В.** Исследование влияния вещественного состава железистых кварцитов гока Арселор Миттал на их прочность

В статье рассмотрена взаимосвязь содержания магнетита в железистых кварцитах ГОКа Арселор Миттал Кривой Рог и их прочности. Объектом исследования является процесс дробления магнетитовой руды. Предметом исследования является определение методов обнаружения влияния вещественного состава железистых кварцитов на их прочность. Целью исследования является получение аналитической зависимости между содержанием магнетита в железистых кварцитах ГОКа Арселор Миттал Кривой Рог и их прочности. Основной научный результат заключается в получении зависимости между содержанием полезного компонента и крепостью железистых кварцитов. Также предлагается усовершенствовать устройство магнитного каротажа карьерных взрывных скважин, добавив в него блок вычисления крепости руды вокруг скважи-

ны с целью расчета закладываемого количества взрывчатого вещества, необходимого для эффективного проведения взрывных работ.

**Азарян А.А., Цибулевський Ю.Е., Кучер В.Г., Швець Д.В.** Дослідження впливу речового складу залізистих кварцитів ГЗК Арселор Міттал на їх міцність

У статті розглянуто взаємозв'язок змісту магнетиту в залізистих кварцитах ГЗК Арселор Міттал Кривий Ріг та їх міцності. Об'єктом дослідження є процес дроблення магнетитової руди. Предметом дослідження є визначення методів виявлення впливу речовинного складу залізистих кварцитів на їх міцність. Метою дослідження є отримання аналітичної залежності між вмістом магнетиту в залізистих кварцитах ГЗК Арселор Міттал Кривий Ріг та їх міцності. Основний науковий результат полягає в отриманні залежності між вмістом корисного компонента і міцністю залізистих кварцитів. Також пропонується удосконалити пристрій магнітного каротажу кар'єрних вибухових свердловин, додавши в нього блок обчислення міцності руди навколо свердловини з метою розрахунку кількості вибухової речовини, що закладається, необхідної для ефективного проведення вибухових робіт.

**Azaryan A., Tsybulevsky U, Kucher V, Shvets D.** Investigation of the influence of the material composition of ferruginous quartzite Mining ArcelorMittal their strength

The article considers the relation between magnetite content in ferruginous quartzite of ArcelorMittal Kryviy Rih mining plant and their strength. The object of research is the grinding process of magnetite ore. The subject of the study is to determine the methods of detecting the influence of the material composition of ferruginous quartzite on their strength. The aim of the study is to obtain analytical dependence between the content of magnetite in ferruginous quartzite of ArcelorMittal Kryviy Rih and their strength. The main scientific result is to obtain a relationship between the content of useful component [magnetite] and the strength of ferruginous quartzite. Also it was suggested to improve magnetic logging of quarry blastholes device by adding the computing unit of the ore strength around the well in order to calculate the amount of planting explosives which is necessary for the effective conducting of blasting operations.

УДК 621.311.086.5:621.3.001

**Кольсун В.А., Івашко А.А., Іутін І.А.** Создание и внедрение в курс изучения преобразовательной техники модуля «Автономный инвертор напряжения»

В статье приведены практические результаты по построению модуля «Автономный инвертор напряжения», для проведения лабораторных и исследовательских работ в условиях лаборатории. Вопросу улучшения качества знаний студентов с преобразовательной техники - уделяется все больше внимания. Качество знаний с преобразовательной техники определяет уровень квалификации будущих специалистов электротехнического направления, но возможности, которые предоставляются на данный момент ограничены в связи с моральным износом лабораторного оборудования. Таким образом, была поставлена задача, разработать модуль автономного инвертора напряжения, как одного из основных видов преобразователя. Исходя из последнего, задача, которая была поставлена, является актуальным и эффективным средством повышения качества знаний студентов в сфере преобразовательной техники.

**Кольсун В.А., Івашко А.А., Іутін І.А.** Створення та впровадження в курс вивчення перетворювальної техніки модуля «Автономний інвертор напруги»

У статті наведено практичні результати щодо побудови модуля «Автономний інвертор напруги», для проведення лабораторних і дослідницьких робіт в умовах лабораторії. Питанню поліпшення якості знань студентів з перетворювальної техніки - приділяється все більше уваги. Якість знань з перетворювальної техніки визначає рівень кваліфікації майбутніх фахівців електротехнічного напрямку, але можливості, які надаються на даний момент обмежені в зв'язку з моральним зносом лабораторного обладнання. Таким чином, було поставлено завдання, розробити модуль автономного інвертора напруги, як одного з основних видів перетворювача. Виходячи з останнього, завдання, яке було поставлене, є актуальним та ефективним засобом підвищення якості знань студентів в сфері перетворювальної техніки.

**Kolsun V., Iwashko A., Iutin I.** Creation and implementation of the course in the study of transformational technology module "Independent voltage inverter"

The paper presents practical results on the construction of the module "Self-contained Voltage Inverter" for laboratory and research work in the laboratory. The issue of improving the quality of students' knowledge with converter equipment - paid more attention. The quality of knowledge of transformational technology determines the level of qualification of future professionals of the electro-technical direction, but the opportunities that are available at the moment is limited due to the obsolescence of laboratory equipment. Thus, there was a task to develop a stand-alone module voltage of the inverter, as one of the main types of converter. Based on the latter, a task that has been put, is a relevant and effective tool to improve the quality of students' knowledge in the field of converter technology.

УДК: 62 – 83: 629.423.1

**Синчук О.Н., Касаткіна І.В., Сменова Л.В.** Моделирование переходных процессов в асинхронных двигателях тяговых электромеханических комплексов двоосных электропоездов

Рассмотрены результаты моделирования переходных процессов в асинхронных двигателях тяговых двоосных электропоездов на математической модели по мгновенным и средним значениям, описываемых рекуррентными соотношениями, которые позволяют рассчитать мгновенные и средние значения координат соответствующие координатам измеренным датчиками. Применение модели предлагаемой структуры и создание системы по средним значениям текущих электротехнических параметров тяговых асинхронных двигателей позволит избавиться от помех, влияющих на точность работы системы, и повысить ее надежность в целом.

**Сінчук О.М., Касаткіна І.В., Сменова Л.В.** Моделювання перехідних процесів в асинхронних двигунах тягових електро-механічних комплексів двоосних електропоезвів

Розглянуто результати моделювання перехідних процесів в асинхронних двигунах тягових двоосних електропоезвів на математичній моделі за миттєвим і середнім значенням, описуваних рекурентних співвідношеннями, які дозволяють розраховувати миттєві і середні значення координат відповідні координатам вимірюваним датчиками. Застосування моделі пропону-

ваної структури та створення системи за середнім значенням поточних електротехнічних параметрів тягових асинхронних двигунів дозволить позбутися від перешкод, що впливають на точність роботи системи, і підвищити її надійність в цілому.

**Sinchuk O., Kasatkina I., Smenova L.** Simulation of transients in asynchronous traction motors electromechanical systems dvoosnyh electric

The results of the simulation of transient processes in asynchronous traction motors dvoosnyh electric locomotives on a mathematical model for the instantaneous and average values described by the recurrence relations that allow us to calculate instantaneous and average values of coordinates corresponding to the coordinates measured by the sensor. Application of the model of the proposed structure and the establishment of the average value of the current electrical parameters of asynchronous motors of traction system will get rid of noise, affecting the accuracy of the system, and increase its reliability as a whole.

---

УДК 621.316

**Антоненко А.О.** Особливості контролю стану якості електроенергії промислових систем електропостачання

У статті розглядається сутність проблеми відхилення якості електричної енергії промислових розподільних мереж від нормованих значень. Метою роботи є акцентування уваги на питанні недостатньої нормативної та технічної баз, на підставі яких великі об'єкти промисловості проводять заходи щодо контролю і регулювання якості електричної енергії систем електропостачання. Визначено, що для зниження питомих енерговитрат та підвищення енергоефективності підприємства необхідно значно підвищити пріоритетність енергоменеджменту в процесі планування його роботи, що в свою чергу, неможливо без ефективної та дієвої системи контролю і регулювання основних параметрів системи електропостачання.

**Антоненко А.О.** Особенности контроля состояния качества электроэнергии промышленных систем электроснабжения

В статье рассматривается суть проблемы отклонения качества электрической энергии промышленных распределительных сетей от нормируемых значений. Целью работы является акцентирования внимания на вопросе недостаточной нормативной и технической баз, на основании которых крупные объекты промышленности проводят мероприятия по контролю и регулированию качества электрической энергии систем электроснабжения. Определено, что для снижения удельных энергозатрат и повышения энергоэффективности предприятия необходимо значительно повысить приоритетность энергоменеджмента в процессе планирования его работы, что в свою очередь, невозможно без эффективной и работоспособной системы контроля и регулирования основных параметров системы электроснабжения.

**Antonenko A.** Features condition monitoring power quality in industrial power systems

The article discusses the problem of deviation of power quality in industrial distribution networks from standardized values. The aim is to focus on the issue of the lack of regulatory and technical bases on the basis of which large objects of the industry and implement measures to control and regulate the electric power quality of power systems. Determined that to reduce the specific energy consumption and improvement of energy efficiency necessary to significantly raise the priority of energy management in the process of planning his work, which, in turn, is impossible without an effective and workable system of control and regulation of the main parameters of the power supply system.



## Привітання

*Шановні читачі!*

Від імені Відділення фізико-технічних проблем енергетики Національної академії наук України та Інституту електродинаміки вітаю колектив кафедри автоматизованих електромеханічних систем у промисловості та транспорті з її ювілеєм!

За роки свого існування кафедра підготувала більше тисячі кваліфікованих спеціалістів, які внесли вагомий вклад у розвиток промисловості України, вирішення актуальних питань автоматизації електромеханічних систем у промисловості та транспорті.

Колективу кафедри завжди були притаманні високий професіоналізм і динамізм в освоєнні нових галузей знань, бажання відгукуватися на найбільш актуальні запити економіки та новітні наукові досягнення. Громадськості добре відомі дослідження і розробки вчених кафедри. Серед їх досягнень слід відзначити роботи з вирішення питань енергозаощадження засобами електроприводу, використання новітніх методів аналізу та синтезу сучасних тягових електромеханічних систем, розробки систем захисту людей від ураження електричним струмом в умовах залізничних шахт та кар'єрів.

Велика заслуга колективу кафедри – у згуртуванні та активізації наукової діяльності фахівців-електротехніків України в галузі електроприводу. У складний період становлення нашої держави провідні фахівці кафедри проводять дослідження, беруть участь у проведенні науково-технічних конференцій.

Як академіку-секретарю Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України, мені особливо приємно вітати колектив кафедри з її ювілеєм. Бажаю всім доброго здоров'я, на-  
снаги і нових творчих успіхів.

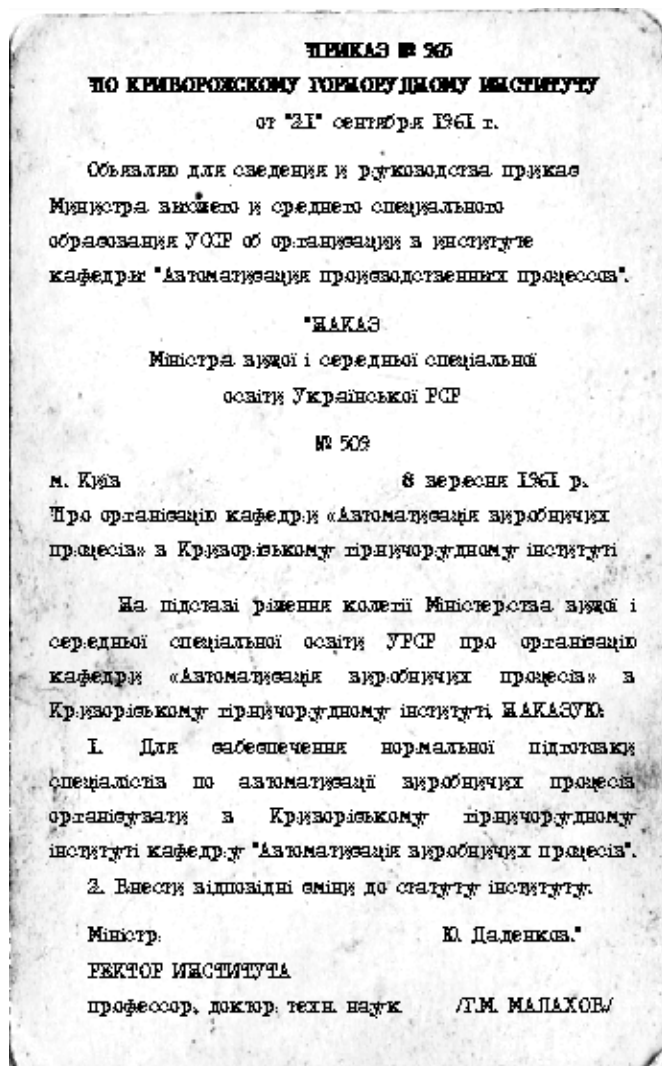
З повагою,  
**О.В. Кириленко, доктор технічних наук, професор,  
Академік-секретар Відділення фізико-технічних проблем  
енергетики НАН України,  
директор Інституту електродинаміки НАН України,  
Академік НАН України**

## *Кафедра автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті. Із минулого у сучасність*

Наступного року нашому навчальному закладу (ДВНЗ «Криворізький національний університет») виповниться 95 років. Від самого заснування, чи не щодня відбувалися події, значимість яких для нашого міста та нашої держави важко переоцінити. Така установа не має права на консерватизм, не має права опиратися на усталені традиції, звісно, якщо ці традиції не стосуються високого освітянського та наукового рівня, - тільки динаміка та постійний пошук зможуть утримувати наш навчальний заклад на визначному рівні. Саме це й можна спостерігати, досліджуючи історію університету, починаючи від утворення Криворізького вечірнього робітничого технікуму у приміщенні школи-семирічки на станції Вечірній Кут 4 жовтня 1922 року і закінчуючи, внаслідок низки трансформацій, ДВНЗ «Криворізький національний університет» у березні 2011 року. Три відділення стали основою Криворізького вечірнього робітничого технікуму - гірниче, механічне та електротехнічне, і фактично з перших років діяльності закладу відбувається підготовка фахівців електромеханіків — у наказах тих часів значиться як «Гірничо-електромеханічна спеціальність».

Час висуває свої вимоги, на які будь-яка освітня чи наукова установа вимушена однозначно реагувати. Наслідкування таким вимогам відгукнулося у запровадженні нових спеціальностей та спеціалізацій: «Гірничо-електротехніка», «Гірничо-електромеханіка», «Автоматизація процесів збагачувальних фабрик» (Наказ Міністерства вищої освіти УРСР №290 від 29.06.1959, Наказ №148 по Криворізькому гірничорудному інституту від 09.03.1960), «Автоматизація виробничих процесів» з різними спеціалізаціями, що стосуються гірничих підприємств та збагачувальних процесів, «Електрифікація промислових підприємств та установок» (дозвіл Міністерства вищої та середньої освіти УРСР від 24.09.1959 за №35/1128, Наказ №838 по Криворізькому гірничорудному інституту від 8 жовтня 1959 року). Усі ці події створили підґрунтя до формування у 1961 році кафедри автоматизації виробничих процесів (Наказ Міністра вищої і середньої спеціальної освіти Української РСР №509 про організацію кафедри «Автоматизація виробничих процесів» в Криворізькому гірничорудному інституті від 8 вересня 1961 року, Наказ №965 по Криворізькому гірничорудному інституті від 21 вересня 1961 року, Наказ №990 по Криворізькому гірничорудному інституті від 29 вересня 1961 року).

Керівництво кафедрою автоматизації виробничих процесів (АВП) покладається на доцента Бондаря Віктора Даниловича. У складі кафедри АВП - доцента, 5 асистентів, 1 старший лаборант, 2 лаборанти. За кафедрою АВП закріплюється 3 лабораторії.



А трохи згодом спеціальність «Електрифікація промислових підприємств та установок» перетворена у спеціальність «Електропривод і автоматизація промислових установок» (Наказ Міністра вищої та середньої спеціальної освіти УРСР №664 від 8.12.1961, Наказ Криворізького гірничорудного інституту №1305 від 20.12.1961), яка буде, протягом усіх наступних часів, візитівкою кафедри АВП. Так відбулося народження кафедри автоматизації виробничих процесів, яка цього року відзначає свій 55-річний ювілей, якому й присвячено даний випуск «Вісника Криворізького національного університету».

1964 року в лютому на зміну Вікторові Даниловичу Бондарю приходить Валентин Михайлович Чермалих. Чермалих В.М. зробив значний внесок у розбудову кафедри. Під його керівництвом були створені й оснащені сучасним обладнанням 8 навчальних і науково-дослідних лабораторій.

До 1973 року, працюючи завідувачем кафедри, він підготував 12 кандидатів технічних наук.



1983-18н-22





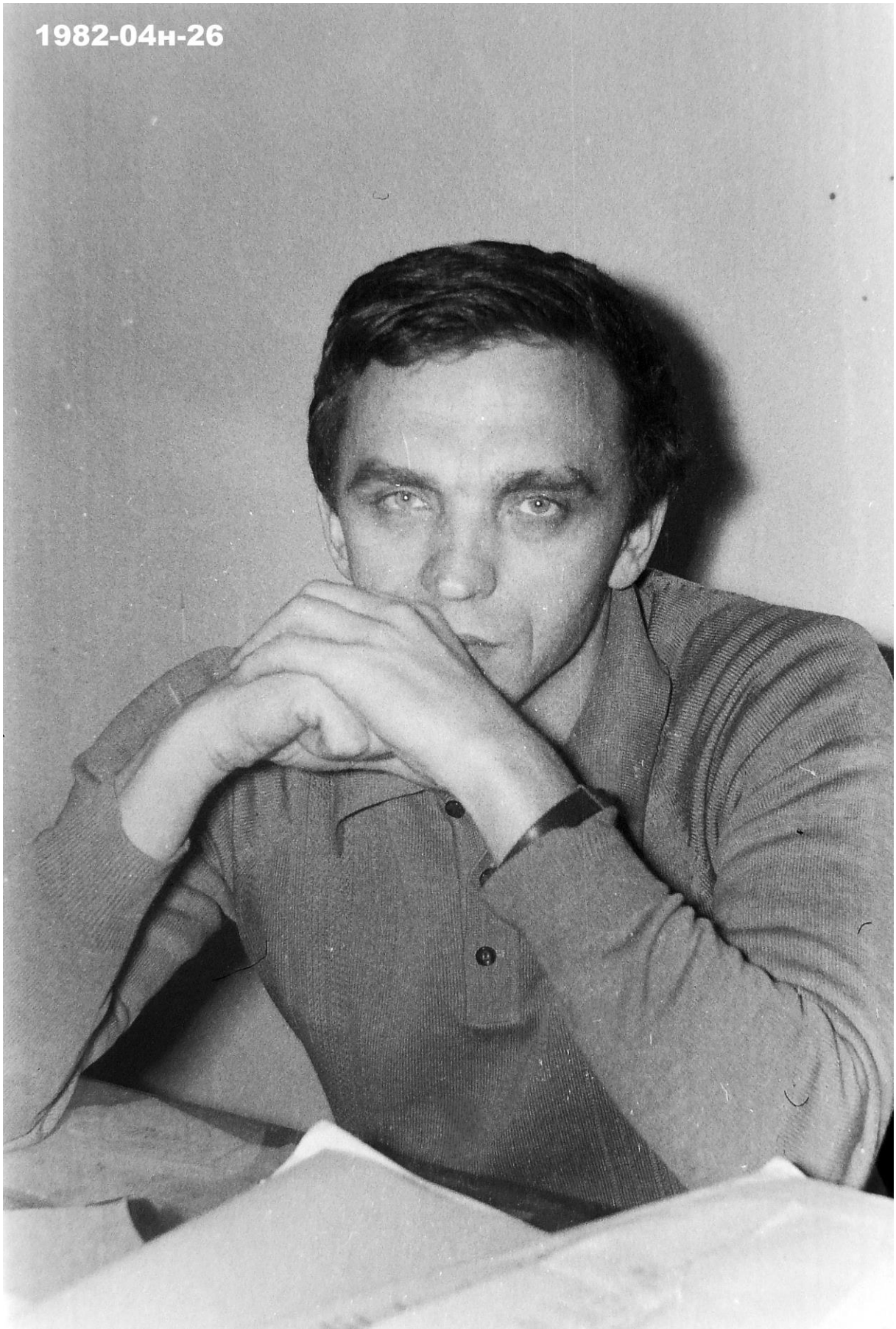




1978-06н-30



1982-04н-26



Не можна не враховувати й те, що кафедра АВП була невід'ємною одиницею як самого навчального закладу, так і факультету, тому не слід залишати поза увагою події, що відбувалися на таких рівнях. Одна з таких подій - заснування першого вересня 1964 року електротехнічного факультету (Наказ Міністра вищої і середньої спеціальної освіти Української РСР №294 від 30 липня 1964 року про реорганізацію факультетів Криворізького гірничорудного інститутів, Наказ №1084 по Криворізькому гірничорудному інституту від 28 серпня 1964 року). Наприкінці цього ж року запускається новий корпус закладу. З цією подією у розпорядження кафедри надаються нові приміщення, які згодом оснащувалися лабораторним та медійним обладнанням.

З 1973 по 1980 рр. кафедру очолював кандидат технічних наук, доцент Григорій Іванович Ляук. Під його керівництвом було продовжено формування колективу кафедри і створено нові лабораторії: промислової електроніки, перетворювальної техніки, які багато в чому визначали якісний рівень підготовки фахівців спеціальності «Електропривод і автоматизація виробничих процесів і технологічних комплексів».

У 1980 р. Григорій Іванович Ляук за власним бажанням покидає посаду завідуючого кафедри і продовжує працювати доцентом на кафедрі. В цьому ж році завідувачем кафедри АВП призначають доцента Дмитра Йосиповича Родькіна, який працюватиме на цій посаді до 1998 року.

Між тим, відбувається подальша спеціалізація кафедр електротехнічного факультету. Назріла необхідність виділення й організації із кафедри «Автоматизація виробничих процесів» кафедри автоматизованого електроприводу (Наказ 881-к по Криворізькому гірничорудному інституту від 29 липня 1982 року). Кафедра була розділена на дві - другою стала кафедра автоматизованого електроприводу. Дмитро Йосипович Родькін за роки роботи на кафедрі видав більше 500 наукових праць і підготував 15 кандидатів наук. Під його керівництвом велася глибока і різнобічна науково-дослідницька робота.

Кафедра автоматизованого електроприводу (АЕП) виконувала реальні дослідження у таких напрямках, як: енергетика систем електроприводу з тиристорними перетворювачами; автоматизація виробничих процесів гірничо-металургійної промисловості; випробування і діагностика електричних машин; управління енергоспоживанням; розробка промислових енергозберігаючих систем керування енергоємними об'єктами гірничо-металургійного комплексу; дослідження та розробка систем автоматизованого розрахунку, прогнозування і контролю енергетичних режимів групового електроприводу прокатних станів; дослідження оптимальних систем керування складними електромеханічними системами; дослідження і розробка систем полегшеного запуску потужних електроприводів змінного струму, систем векторного керування електроприводом змінного струму, систем динамічного навантаження електричних машин постійного і змінного струму.

З 1982 року на основі базової спеціальності «Електропривод і автоматизація промислових установок і технологічних комплексів» (ЕПА) ведеться підготовка фахівців за спеціальностями ЕПАГ, ЕПАМ для гірничої і машинобудівної галузей. Підготовка аспірантів і докторантів здійснюється за спеціальністю 05.09.03 - Електротехнічні комплекси та системи.

Кафедра АЕП веде підготовку фахівців за інтегрованими планами навчання, тісно співпрацює з науковими та вищими навчальними закладами України, зі спеціальними середніми навчальними закладами, які входять до структури нашого навчального закладу, зміцнює зв'язки з виробництвом, результатом чого стало заснування філії на Криворізькому державному гірничо-металургійному комплексі «Криворіжсталь» (нині «АрселорМіттал Кривий Ріг»).

З 1998 року робота кафедри ведеться під керівництвом професора Анатолія Пилиповича Сінолицького (1998-2013 рр.). У цей час при кафедрі створено регіональний науковий семінар Національної Академії наук України, активно ведеться підготовка молодих наукових кадрів. Кафедра продовжує виконувати реальні дослідження за напрямками, сформованими його попередниками, досить інтенсивно ведуться роботи з проблем керування енергопостачання систем електроприводу.

На цей час підготовка бакалаврів, спеціалістів і магістрів здійснюється за ліцензією серії ВПД-ІУ № 048135 від 22.07.1999 р. зі спеціальності «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод», а з 2005 року проводиться набір на спеціальність «Електричний транспорт».

Стрімкий розвиток науки й техніки неможливий без викладання у закладах освіти передових технологій, якими б вони утопічними не здавалися на сьогодні. Освіта стала фінансуватися

неналежним чином. Якщо що-небудь і робилося в цій сфері, то тільки завдяки ентузіазму та самовідданості працівників освіти. Виробництво почало віддалятися від вищої школи. І все ж таки цей бар'єр був подолано. 28 квітня 2011 року в Криворізькому технічному університеті на кафедрі автоматизованого електроприводу відбулося відкриття лабораторії з сучасних систем автоматизованого електроприводу на базі японського обладнання «OMRON». Ця подія стала можливою завдяки випускникові нашого університету Миколі Новаку (нині директор ТОВ «Техноімпекс», м. Черкаси), та Карі Блумквісту (регіональний директор OMRON ELECTRONICS OY, Фінляндія, Білорусь, Україна та Прибалтика). До речі, слід зауважити, що така лабораторія є другою у практиці «OMRON» на теренах східної Європи, перша була заснована ще в 1996 році у місті Санкт-Петербург.

Звісно, що все це сприяє зближенню освіти та виробництва, а випускникам допомагає адаптуватися на підприємствах і підвищити їх конкурентоспроможність на теренах ринку праці як нашої Вітчизни, так і закордонного світу.

У 2012-2014 рр. кафедра переживає ряд реструктуризацій, унаслідок чого з 2013 року кафедра починає йменуватися кафедрою автоматизованих електромеханічних систем у промисловості та транспорті (АЕСПТ), яку очолює академік Академії гірничих наук України, доктор технічних наук, професор О.М. Сінчук. Невичерпне джерело ентузіазму, наукових ідей, практичного досвіду дозволило Олегу Миколайовичу, в цей нелегкий для університету і країни час, спрямувати енергію колективу кафедри на створення нових лабораторій, впровадження у навчальний процес новітніх технологій, інтенсифікацію співробітництва з промисловістю, активне залучення молоді до роботи у науковому секторі, створення нових відгалужень у наукових дослідженнях: електроенергоаудит промислових підприємств гірничо-металургійного комплексу, розробка систем полегшеного запуску двигунів великої потужності, розробка тягових асинхронних електроприводів для рудничних електровозів, дослідження стану рівня ізоляції силових кабелів шахтних електричних мереж, розробка пристроїв електробезпеки для мереж до 1200 В підземних виробок шахт гірничовидобувних підприємств, аналіз ефективності впровадження альтернативних джерел електричної енергії в сільсько-господарську та легку промисловість, розробка ефективної системи керування сонячними трекерами. Кафедра бере участь у виконанні низки науково-дослідних робіт на державне замовлення, стає організатором Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих учених «Актуальні питання енергоефективності гірничо-металургійного виробництва».

Як видно з такого короткого нарису, впродовж своєї історії, кафедра автоматизованих електромеханічних систем у промисловості та транспорті, дещо змінюючи свою назву, об'єднувала зусилля вчених, висококваліфікованих фахівців підприємств, викладацький склад на виконання наукових досліджень, підготовку інженерних і наукових кадрів для гірничодобувної галузі та промислових виробництв.

За роки існування ДВНЗ «Криворізький національний університет» закінчили десятки тисяч осіб, серед них значний відсоток випускників кафедри. Колектив кафедри пишається своїми випускниками, які плідно працюють у різних сферах народного господарства України й далеко за її межами. Серед них — керівники областей і міст України, народні депутати, доктори наук та академіки, ректори вищих навчальних закладів, директори промислових підприємств, банкіри й бізнесмени, лауреати Державних премій, фахівці, нагороджені орденами і медалями.

Сьогодні всі зусилля професорсько-викладацького складу, аспірантів, навчально-допоміжного персоналу кафедри АЕСПТ спрямовані на підготовку і виховання висококваліфікованих кадрів, які відповідають освітньо-науковим вимогам світового рівня.



**Завідувач кафедри автоматизованих електромеханічних систем у промисловості та транспорті, д-р техн. наук, професор, академік Академії гірничих наук України, О.М. Сінчук**





## ПРОИЗВОДСТВО ШАХТНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ



ООО "Завод "Амплитуда"  
Тел/факс: +38 (062) 297-45-02, (062) 302-82-31

e-mail: [amplituda@gmail.com](mailto:amplituda@gmail.com)  
<http://www.amplituda.com.ua>  
<http://www.amplituda-zvd.com>

### ПАО «ЭЛЕКТРОМАШИНА»

Публичное Акционерное Общество «Электромашина» - крупнейшее машиностроительное предприятие Украины.

Основной продукцией предприятия являются электрические машины постоянного тока мощностью от 0,37 до 315 кВт любого конструктивного и климатического исполнения (в том числе взрывобезопасные и предназначенные для работы при высоких температурах и в сложных климатических условиях), оборудование для рудничных, тяговых, контактных и аккумуляторных электровозов, железнодорожного транспорта, металлургических и иных заводов, рудничная аппаратура, регулируемые преобразователи постоянного напряжения для железных дорог. За время существования предприятием изготовлено более 200 типов, серий и отдельных видов качественных электрических машин и аппаратов. С учетом различных исполнений по электрическим и климатическим параметрам, монтажным размерам, способам охлаждения и защиты, номенклатура выпускаемой продукции насчитывает десятки тысяч модификаций, учитывающих индивидуальные требования заказчика.

ПАО «Электромашина» является современным предприятием, продукция которого успешно экспортируется в страны ближнего и дальнего зарубежья. Тысячи единиц электрооборудования производства ПАО «Электромашина» эксплуатируются на промышленных объектах Украины, России, Беларуси, стран Балтии, Средней Азии, Кавказа, на железных дорогах Германии, в угольных шахтах Македонии, Болгарии, Ирана и Вьетнама.

Предприятие располагает собственной совершенной экспериментальной и исследовательской базой. Разработка образцов новой продукции ведется с применением автоматизированных систем проектирования. В практику производства успешно внедрена комплексная система управления качеством ISO 9001. Продукция сертифицирована и отвечает международным нормам. Заводу неоднократно присуждалось почетное звание «Лидер отрасли». В интересах заказчика предприятие обеспечивает гарантийное и послегарантийное обслуживание изделий и быструю поставку комплектующих. Производственный и кадровый потенциал позволяет выпускать оборудование для нужд оборонного комплекса. Помимо основной производственной деятельности наше предприятие также может оказать следующие услуги:

сварочные работы по изготовлению металлоконструкций любой сложности, вальцовка цилиндров  $D = 800$  мм и  $L = 1000$  мм из листа  $h = 20 \div 40$  мм

механообработка тел вращения диаметром до 200 мм и длиной до 500 мм с гальванопокрытием на станках с ЧПУ и токарно-фрезерном обрабатывающем центре «MULTUS» производства «OKUMA» Японии.

изготовление деталей методом штамповки изделий из металла диаметром до 500 мм и толщиной до 8 мм.

Осуществляем ремонт любой сложности электродвигателей постоянного тока отечественного и иностранного производства.

ПАО «Электромашина» приглашает к сотрудничеству новых деловых партнеров. Со своей стороны готовы принять участие в совместных разработках новых видов продукции, выполнить работы по лицензиям ведущих мировых электротехнических предприятий.

**Публичное Акционерное Общество «Электромашина» г.Харьков**

**[www.electromashina.com.ua](http://www.electromashina.com.ua)**

**[td.electromashina@gmail.com](mailto:td.electromashina@gmail.com)**

**Факс: +38 (057) 372-38-19 Тел.: +38(057) 373-75-59, 373-75-60, 373-75-35**







***Збірник наукових праць***

***В і с н и к***  
***Криворізького національного університету***

***Випуск 42 (присвячений ювілею кафедри автоматизованих електромеханічних систем  
в промисловості та транспорті)***

Редактор, коректор  
Комп'ютерний набір, верстка

Сінчук О.М., Філіпп Ю.Б.  
Макодзьоб В.М., Зіманков Р.В.

Здано в набір 25.03.16. Підписано до друку 26.04.16 за рекомендацією Вченої Ради

ДВНЗ «Криворізький національний університет», протокол № 8.

Формат 60×84/8. Ум. друк. арк. 33. Тираж 100 прим.

Замовл. № 4. Укр., рос.

Надруковано:

ФОП Бурова Оксана Анатоліївна

Свідоцтво ДП № 159-р від 26.03.13.

50084 м. Кривий Ріг, мкр. Ювілейний, 10/104

Тел. 401-04-29

*Адреса видавництва:*

*50027, Кривий Ріг, вул. XXII партз'їзду, 11*

*ДВНЗ «Криворізький національний університет»  
2016. Вип. 42, С. 3-282.*