$$k_{pi} = \omega_i L_g; \quad (20)$$

$$k_{ii} = \omega_i R_g, \quad (21)$$

де ω_i – кутова частота зрізу контуру струму.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Розглянуто схему модульного багаторівневого перетворювача у якості мережевого випрямляча. Для керування ключами модулів схеми використано систему з орієнтацією за вектором мережевої напруги. Дана система дозволяє забезпечити роздільне керування величинами активної та реактивної потужності. Отримано аналітичні залежності, що описують функціонування даної системи. Запропоновано варіант вибору параметрів регуляторів струму системи керування перетворювачем. В якості напрямку подальших досліджень слід виділити створення математичної моделі для всебічного дослідження роботи даної системи керування в умовах зміни керуючих та збурюючих величин.

Список літератури

1. **Козакевич І.А.** Керування потоками потужності гібридних транспортних засобів / **І.А. Козакевич, Ю.Г. Осадчук, Р.А. Ільченко** // Гірничий вісник. – 2017. – Випуск 102. С. 124-129.
2. **Козакевич І.А.** Система енергоефективного керування динамічним компенсатором викривлень напруги / **І.А. Козакевич, А.А. Кондратенко** // Гірничий вісник. – 2019. – Випуск 105. С. 154-159.
3. **Козакевич І.А.** Дослідження роботи синхронного двигуна з постійними магнітами в гібридних тягових електроприводах / **І.А. Козакевич, І.В. Касаткіна, Л.В. Єрьоменко** // Гірничий вісник. – 2018. – Випуск 104. С. 106-110.
4. **Козакевич І.А.** Система керування вентильними реактивними двигунами / **І.А. Козакевич, І.І. Шевченко** // Гірничий вісник. – 2017. – Випуск 102. С. 135-138.
5. **Сінчук І.О.** Превентивна оцінка і основні напрями підвищення енергоефективності підземних залізорудних підприємств / **І.О. Сінчук, І.А. Козакевич, М.Л. Барановська, Т.М. Берідзе, І.І. Пересунько** // Вісник Криворізького національного університету. Збірник наукових праць. – Кривий Ріг, 2020. – Вип. 50. С. 142-147.
6. **Utvić M.** Generalized theory on direct arm energy control in modular multilevel converters / **M. Utvić, D. Dujić** // CPSS Transactions on Power Electronics and Applications. – 2020. – Vol. 5, iss. 4. – Pp. 388-399.
7. **Du S.** Common-Mode Voltage Minimization for Grid-Tied Modular Multilevel Converter / **S. Du, B. Wu, N. Zargari** // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2019. – Vol. 66, iss. 10. – Pp. 7480-7487.
8. **Hao Q.** Operating region and boundary control of modular multilevel converter station under unbalanced grid conditions / **Q. Hao, B. Li, Y. Sun, L. Wu, S. Wang** // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2020. – Vol. 35, iss. 3. – Pp. 1146-1157.
9. **Hu P.** A Currentless Sorting and Selection-Based Capacitor-Voltage-Balancing Method for Modular Multilevel Converters / **P. Hu, R. Teodorescu, S. Wang, S. Li, J. M. Guerrero** // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2019. – Vol. 34, iss. 2. – Pp. 1022-1025.
10. **Wang C**. Design and Application of the SFCL in the Modular Multilevel Converter Based DC System / **C. Wang, B. Li, J. He, Y. Xin** // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2017. – Vol. 27, iss. 4. – Pp. 1-4. doi: https://doi.org/10.1109/TASC.2017.2652489

УДК 004.896:681.3:621.311

І.А. КОТОВ*, канд. техн. наук, доц.
Криворізький національний університет

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ПІДТРИМКА АВТОМАТИЗАЦІЇ ДИСПЕТЧЕРСЬКОГО КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМОЇ З УРАХУВАННЯМ ІМОВІРНІСНОГО ХАРАКТЕРУ НАВАНТАЖЕННЯ ВУЗЛІВ

Метою статті є виклад результатів дослідження з розробки і впровадження методів отримання числових характеристик оперативного керування режимом енергосистеми в аварійних ситуаціях та побудови на цій основі бази знань інтелектуальної системи автоматизації керування. Розглянуті підходи до інтелектуальної підтримки автоматизації прийняття управлінських рішень диспетчерського персоналу енергосистеми. Величини керуючих впливів формуються як елементи матриці чутливості контрольованих параметрів режиму до регульованих навантажень споживачів. В якості додаткового завдання поставлено врахування імовірнісного характеру навантаження вузлів.

Методи дослідження полягають у використанні методів теорії імовірності, теорії множин, математичної логіки, теорії автоматів, електроенергетичних систем, теорії графів, математичної статистики. Величини керуючих впливів формуються в результаті планування та реалізації розрахункових експериментів оцінки множини аварійних режимів електричної мережі енергосистеми. Враховано закони розподілу випадкових величин навантажень споживачів.

Наукова новизна полягає в новій моделі включення різних форм лінгвістичних знань, представлених єдиною онтологічною моделлю, та числових параметрів чутливості режиму енергосистеми до керуючих дій у інтегровану базу знань, що дозволяє створити побудову ефективних інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень та

* © Котов І.А., 2021

впровадження їх в діючу автоматизовану диспетчерську систему диспетчерського керування. Величини керуючих дій обчислюються з урахуванням імовірнісного характеру навантаження вузлів електричної мережі.

Практична значимість дослідження передбачає побудову бази знань диспетчерського керування режимом електричної мережі з урахуванням імовірнісного характеру навантаження вузлів, що дозволяє реалізувати програмний комплекс системи підтримки прийняття рішень, спрямованої на автоматизацію диспетчерського керування в режимі нормального та аварійного режимів енергосистем. Застосування запропонованого підходу до побудови бази знань та його використання для підтримки прийняття рішень персоналом диспетчерської служби підвищує надійність керування та збільшує час безперервної роботи оперативного персоналу із забезпеченням надійної ліквідації аварій.

Результатами роботи є методи отримання та побудови бази професійних знань з урахуванням імовірнісного характеру навантаження вузлів для підтримки диспетчерського керування режимами енергосистем. Результати розрахунків для аварійного режиму дозволяють будувати функції впливу та визначати коефіцієнти матриці чутливості. Отримані набори даних режимів, що використовуються як компоненти бази знань, дозволяють ефективно оцінювати та корегувати аварійний режим шляхом автоматизації інтелектуальної підтримки процесу його диспетчеризації.

Ключові слова: абревіатура, аварійний режим, закон розподілу, ймовірність, матриця чутливості, режим, сенсорна точка, цільова функція

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-95-104

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. Аналіз сучасних тенденцій розвитку засобів автоматизації диспетчерського керування електроенергетичних систем (ЕЕС) показує значне зростання складності подібних систем і збитків від аварійних ситуацій в енергосистемах. При цьому, виникає суперечність між зростанням складності сучасних ЕЕС, збитками від аварійних ситуацій і існуючими обмеженими можливостями використання систем підтримки прийняття рішень (СППР) оперативного диспетчерського персоналу (ОДП). Тому необхідна масова розробка і впровадження СППР в середу діючих автоматизованих систем диспетчерського керування (АСДК).

Однак, в даний час основною проблемою при побудові СППР є складність формалізації та інтерпретації їх баз знань (БЗ). Існуюча практика використання промислових систем підтримки прийняття рішень передбачає їх переважно індивідуальне проектування з високою вартістю і тривалим терміном розробки. Тому необхідно констатувати, що для автоматизації процесу інтелектуалізації керування режимами енергосистем необхідна уніфікація виробництва систем підтримки рішень. Така уніфікація повинна базуватися на комплексному підході до отримання знань про об'єкт керування. Тому існує актуальна проблема здобування знань оперативного керування режимами енергосистем для побудови баз знань диспетчерських інтелектуальних комплексів.

Рішення зазначеної проблеми передбачає максимальне зниження невизначеності вихідної інформації, особливо при плануванні і оперативному керуванні режимами ЕЕС. Це обумовлюється відсутністю надійних прогнозів рівнів очікуваного навантаження і генеруючих потужностей вузлів системи, що призводить до неможливості строго обґрунтування використовуваних величин питомих збитків від недовідпуску електроенергії споживачам. Ця обставина різко обмежує ефективне застосування аналітичних методів, що надійно працюють. Тому в більшості випадків доводиться ідеалізувати причинно-наслідкові залежності між характеристиками вузлів системи і відповідними моделями. На цьому тлі при розробці відповідних математичних моделей велика складність і ієрархічність організації сучасних ЕЕС не дозволяють об'єктивно оцінювати показники режимів роботи споживачів.

Аналіз досліджень і публікацій. Створення і наповнення БЗ є найважливішим етапом побудови і впровадження інтелектуальної системи. У якості джерела знань професійної області в роботі визначені об'єкти керування – фрагмент електричної мережі та параметри її режиму, а також нормативна документація диспетчеризації режимів ЕЕС. Однак, знання про об'єкт керування базуються на детермінованих значеннях навантажень вузлів системи, що вносить суттєві похибки в прийняті рішення. Тому задача урахування імовірнісного характеру навантажень споживачів є актуальною, і її ефективне рішення повинно підвищити достовірність оцінок режимів роботи ЕЕС [1, 2]. У реальних умовах експлуатації енергосистем навантаження споживачів є випадковими величинами, і закони їх розподілу визначаються статистичними даними, на основі яких визначаються оцінки техніко-економічних показників режимів роботи ЕЕС [2, 3]. Отже, отримання знань про об'єкт управління має обов'язково враховувати імовірнісні характеристики навантажень споживачів.

Відомо, що в основі керування знаннями знаходиться проблема здобування знань (Knowledge Mining). В міру ускладнення і поглиблення структуризації предметних областей ускладнюються способи здобування знань, яким присвячено безліч спеціалізованих досліджень [4 – 6].

В роботі [7] проаналізовані методи керування і повторного використання знань. Проведено класифікацію підходів до повторного використання знань в малих і середніх підприємствах. Відзначено, що необхідні нові організаційні структури подання і використання знань в масштабах організації. Робота [8] присвячена особливостям застосування методів керування знаннями для різних секторів і промислових галузей, детально систематизовані методи та інструменти керування знаннями. Зазначено, що ефективність вкладень підприємств у системи керування знаннями є недостатньою. В [9] зазначено, що використання професійних знань сьогодні призвело до нової хвилі цифрової трансформації на базі штучного інтелекту. Робота [10] присвячена інтелектуальному аналізу великих даних. Аналіз показав, що в постійно мінливому промисловому середовищі і умовах невизначеності вилучення та інтелектуальне керування великими даними і знаннями стикається зі значними труднощами.

У завданнях вилучення знань особливу роль має їх уніфікація на основі добре формалізованих інтерпретованих моделей. До таких моделей, перш за все, слід віднести формалізми онтологій. В [11] показана актуальність розробки системи онтологій для узгодженості досліджень в області підтримки прийняття стратегічних рішень в енергетиці. Робота [12] розглядає модель онтологій стосовно слабоформалізованих областей. Обґрунтована необхідність розробки узагальнюючих моделей онтологій для процесів підтримки прийняття рішень в слабоформалізованих професійних областях. В [13] запропонована математична модель репрезентації знань на основі фрактального підходу. В роботі [14] розглянути підходи до використання моделі онтологій для пошуку і отримання професійної інформації. В [15] розглянуто формування та використання накопичених знань геологічного характеру для побудови геоінформаційних та комунікаційних систем при підготовці кваліфікованих інженерних кадрів. Робота [16] присвячена використанню систем подання знань для керування інтегрованими енергосистемами на основі інтелектуалізації процесу підтримки прийняття рішень. Наведено методику отримання знань про режим електричної мережі. Запропоновано схему інтеграції системи підтримки прийняття рішень в середу апаратно-програмних засобів автоматизованої системи диспетчерського керування. В [17] досліджено використання розрахункових даних технологічного процесу видобутку і обробки природних копалин для скорочення електроспоживання в гірничодобувній промисловості. При цьому зазначено, що критично важливим є ефективний розподіл електричної енергії між споживачами всередині гірничодобувної компанії.

Аналіз показав, що особливе значення має розробка, впровадження та застосування інтелектуальних систем підтримки рішень в області керування великими системами енергетики. Слід відзначити значний внесок в теорію і методологію побудови та використання інтелектуальних програмних засобів в області диспетчерського керування енергосистемами, який внесли вітчизняні та зарубіжні вчені: Вагін В.М., Веников В.А., Вороненко Д.І., Воропай Н.И. , Геловані В.А., Єремеєв А.П., Єремєєв Л.П., Кощєєв Л.А., Купершмідт Ю.Я., Ларін О.М., Лебедєв Л.С., Любарський Ю.Я., Массел Л.В., Моржін Ю.І., Поспєлов Д.А., Самойлов В.Д., Стогній Б.С., Терелянскій П. В., Хорошевський В.Ф., Чачко А.Г., Badami M. , Daniel J., Ragsdale CT, Yao F.S.

У якості загальноприйнятих і ефективних рішень в області підвищення продуктивності диспетчерського керування ЕЕС і зниження збитків аварійних ситуацій необхідно відзначити інтелектуалізацію електричних мереж (SmartGrid) [18] і інтелектуальні системи підтримки диспетчерських рішень [19]. Аналіз науково-дослідних і практичних робіт в зазначених професійних областях показує значні успіхи і практично значущі результати. З іншого боку, є нагальна потреба в розробці нових підходів і методів комп'ютерного застосування професійних знань керування складними промисловими комплексами. Становище ускладнюється постійним ускладненням організаційної структури керування, зростанням вартості обладнання і значним збільшенням збитків від аварійних ситуацій.

Постановка завдання. Аналіз показує, що в багатьох дослідженнях детально розглянуті аспекти інженерії знань і методи їх формалізації. Однак, отримання знань в різних професійних середовищах і, зокрема, в галузі управління режимами електроенергетичних систем, вимагає специфічних підходів, які не отримали достатнього висвітлення. Зокрема, потрібно урахування

імовірнісного характеру навантаження споживачів. Проведений аналіз показує, що в науково-технічній літературі недостатньо розроблені і висвітлені методи отримання і формалізації знань про параметри режимів електричної мережі. Крім того, відсутні конкретні рекомендації по інкорпорації знань про керуючи режимні впливи і інструктивні диспетчерські матеріали.

Таким чином, існує актуальна проблема здобування знань з масиву стохастичних даних, які характеризують конкретну аварійну ситуацію в енергосистемі, їх інтеграція з інструктивними диспетчерськими матеріалами і формалізація в єдиній онтологічної моделі.

Викладення матеріалу та результати. Очевидно, що величини керуючих впливів повинні бути пропорційні очікуваному коригуючому ефекту. Тому повинне вирішуватися завдання визначення чутливості контрольованих параметрів по відношенню до керуючих впливів. Зокрема, можуть використовуватися такі критерії чутливості

$$Q_V = \frac{\partial V_i}{\partial Q_j}, \quad P_V = \frac{\partial V_i}{\partial P_j}, \tag{1}$$

де ∂V_i – зміна напруги в контрольованому i-ому вузлі; ∂Q_j – зміна реактивної потужності в регульованому j-ому вузлі; ∂P_j – зміна активної потужності в регульованому j-ому вузлі.

Коефіцієнти чутливості, що відображають множину керуючих впливів на множину параметрів, що контролюються, утворюють матрицю чутливості. У першому наближенні елементи матриці чутливості можуть бути виражені коефіцієнтами лінійної регресії. Таким чином, матриця чутливості може прийматися як компонент знань експертної керуючої системи про величини і напрямки керуючих впливів по відношенню до конкретної електричної мережі в конкретної аварійної ситуації. На цій основі можуть бути автоматизовані диспетчерські управлінські рішення.

Визначення взаємних коефіцієнтів чутливості вимагає масових розрахунків режиму ЕЕС. Для реалізації таких розрахунків проведено порівняльний аналіз існуючих програмних пакетів і обраний комплекс – RastrWin3 [20]. В якості розрахункової математичної моделі електричної мережі енергосистеми прийнята система нелінійних рівнянь вузлових напруг у вигляді балансу потужностей. Рівняння представлені окремо для активних і реактивних значень потужностей і провідностей. Невідомими є модулі і фази напруги у вузлах, як показано нижче.

$$\begin{aligned}
\omega_{Pk} &= P_k - g_{kk}U_k^2 - U_k \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq k}}^{n+1} U_j (g_{kj}\cos\delta_{kj} - b_{kj}\sin\delta_{kj}), \\
\omega_{Qk} &= Q_k - b_{kk}U_k^2 - U_k \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq k}}^{n+1} U_j (b_{kj}\cos\delta_{kj} + g_{kj}\sin\delta_{kj}), \\
\delta_{kj} &= \delta_k - \delta_j; \quad k = \overline{1,n}.
\end{aligned} \tag{2}$$

Розрахунок проводився методом Ньютона. В результаті розрахунків аварійного режиму отримані дані для побудови функцій впливу і коефіцієнтів матриці чутливості. У першому наближенні побудовано лінійні регресії. Матриця впливу має вигляд, наведений в табл. 1.

Таблиця 1

Матриця впливу для сенсорних точок

Керуючі чинники	U (СШ 150 кВ ПС Павлоградська-330), кВ	I (Л-82-1), А	I (Л-82-2), А
P (Л-ДН-1)	-0.2788P25 + 121.600	8.317P25 + 1093.2847	8.2212P25 + 883.6200
Q (Л-ДН-1)	-0.2077Q25 + 115.535	5.3824Q25 + 1279.7342	5.4382Q25 + 1065.3945
P (Л-ДН-2)	-0.2386P29 + 116.955	7.2892P29 + 1218.7947	7.1659P29 + 1008.6350
Q (Л-ДН-2)	-0.1815Q29 + 114.295	4.7302Q29 + 1319.2247	4.7637Q29 + 1105.5450

На основі розрахункових даних динаміки інтенсивностей керуючих впливів і епюр напруг уздовж відповідальних радіусів електричної мережі побудована база знань. Для зберігання обраний уніфікований формат XML. Фрагмент файлу даних епюр напружень, прийнятий в якості знань про керування режимом і призначений для завантаження в БЗ, проілюстрований на лістингу нижче.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="yes"?>
```

```
<data-set xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance">
    <record>
        <P>2.00</P>
        <P_unit>МВт</P_unit>
        <node>3</node>
        <U>116.02</U>
        <U_unit>кВ</U_unit>
    </record>
    <record>
        <P>4.00</P>
        <P_unit>МВт</P_unit>
        <node>3</node>
        <U>115.59</U>
        <U_unit>кВ</U_unit>
    </record>
   <!-- ..... -->
</data-set>
```

Фрагмент файлу даних коефіцієнтів матриці впливу для сенсорних точок проілюстрований на наступному лістингу.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="yes"?>
<data-set xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance">
    <parameter U = "U (СШ 150 кВ ПС Павлоградська-330)">
        <factor name = "P (Л-ДН-1)">
            <b0>121.600</b0>
            <b>-0.2788</b>
        </factor>
     </parameter>
 <!-- ..... -->
</data-set>
```

Отримані файли режимних даних, використовуваних як компоненти бази знань, дозволяють здійснювати оперативну оцінку тяжкості аварійного режиму, а також його диспетчерську корекцію.

Разом з розрахунковими параметрами інтенсивностей керуючих впливів базу знань становлять також лінгвістичні концепти, факти і правила інструктивних диспетчерських матеріалів. Для побудови БЗ також зроблена вибірка з інструкцій, які розглядаються як джерело достовірних знань оперативного управління аварійним режимом.

На основі зазначеного лінгвістичного корпусу побудований тезаурус професійних концептів БЗ. З лінгвістичних концептів виділені професійні терміни і абревіатури. Фрагмент файлу концептів тезауруса професійної області наведено нижче.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="yes"?>
<data-set xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance">
    <thesaurus>
        <base_info>
            <base_date>22.08.2020</base_date>
            <base_context>instruction_12</base_context>
            <base_type>concept</base_type>
            <base_admin>admin</base_admin>
        </base_info>
        <concept id = "0001">
            <type>action</type>
            <context_type>instruction_12</context_type>
            <concept_date>22.08.2020</concept_date>
            <content>трансформатор</content>
        </concept>
     <!-- ..... -->
    </thesaurus>
</data-set>
```

Аналогічним чином будується сховище професійних термінів, абревіатур, фактів і продукцій.

Вище було відзначено, що здобування знань оперативного керування режимами енергосистем передбачає максимальне зниження невизначеності вихідної інформації, особливо при плануванні і оперативному керуванні режимами ЕЕС. Це обумовлюється відсутністю надійних прогнозів рівнів очікуваного навантаження і генеруючих потужностей вузлів системи, що призводить до неможливості строго обґрунтування використовуваних величин питомих збитків від недовідпуску електроенергії споживачам. Тому, при формуванні бази знань диспетчерського керування необхідне урахування імовірнісного характеру навантаження вузлів споживачів.

Як відомо, випадковий характер навантаження системи обумовлюється нерегулярними коливаннями навантажень і помилками прогнозу їх очікуваних рівнів. Нерегулярні коливання навантаження відіграють істотну роль в оцінці експлуатаційних режимів, а помилки прогнозу – перспективних режимів роботи ЕЕС. В останньому випадку, припускаючи підпорядкованість випадкових величин навантажень нормальному закону, щільність розподілу навантаження системи можна визначити за відомим виразом

$$f(P) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(P_н - m)^2}{2\sigma^2}}, \tag{3}$$

де m — математичне очікування випадкової величини ($P_н$) активної потужності навантаження системи; σ – середньоквадратичне відхилення випадкової величини $P_н$.

Будемо вважати, що ймовірність відхилення фактичного навантаження вузла від прогнозованого значення $R(P_{нj})$ підпорядковується нормальному закону розподілення. Тоді ймовірність відхилення навантаження від прогнозованого значення $P_{нj}$ в j-му часовому розрізі на величину ΔP_{ij} внаслідок помилок прогнозу, може бути оцінена за виразом

$$p_{ij} = \frac{1}{2}\Phi\left(\frac{\Delta P_{ij} + \frac{\Delta P_{rj}}{2}}{\sigma_j\sqrt{2}}\right) - \Phi\left(\frac{\Delta P_{ij} - \frac{\Delta P_{rj}}{2}}{\sigma_j\sqrt{2}}\right), \tag{4}$$

де i – поточний номер інтервалу, відповідний ряду відхилень навантажень від прогнозованих значень; $i=1...I$, де I – максимальний номер інтервалу; $j=1...I$ – поточний індекс розглянутої зони графіка навантаження; ΔP_{ij} – передбачуваний інтервал відхилення навантаження P_{ij} від прогнозованого значення в j-й часовій зоні графіка навантаження (величини ΔP_{ij} повинні бути рівні або кратні величинам ΔP_{rj}); $\Delta P_{rj}/2$ – крок відхилення навантажень від прогнозованих значень; Φ – функція Лапласа (інтеграл ймовірностей), що обчислюється за відомими величинами $P_{нj}$ и ΔP_{ij}; σ – середньоквадратичне відхилення навантажень від величини $P_{нj}$.

В результаті реалізації виразу (2) за всіма i-ми інтервалами отримують ряд розподілу ймовірності $R(P_{ij})$. Далі, перемноживши отримані ряди розподілу $R(P_{ij})$ на відповідні значення ряду навантажень $R(P_{нj})$, отримують новий ряд $R(P_{ij})$ навантажень системи, скоригований з урахуванням помилок прогнозу.

Врахування імовірнісного характеру навантажень особливо необхідне при багатокритеріальному аналізі режимів роботи ЕЕС, що описує відповідні зв'язки між досліджуваними критеріями (функціями мети) і групами параметрів, що оптимізуються, у вигляді нелінійних залежностей. Саме тому помилки у визначенні достовірних рівнів навантаження вузлів системи істотно впливають на кількісні значення величин параметрів, що оцінюються.

Слід очікувати, що імовірнісний характер навантаження ЕЕС призведе до уточнення положення глобального мінімуму цільової функції і до отримання більш достовірних чисельних значень досліджуваних критеріїв оцінки перспективних режимів роботи ЕЕС.

Рішення завдання керування режимом роботи ЕЕС завжди пов'язане з розглядом безлічі критеріїв, які потребують, в залежності від їх характеристик, або нормалізації, або введення в розрахунок коефіцієнтів важливості критеріїв. Кількість критеріїв і ступінь їх важливості можуть змінюватися в часі в певних межах.

Цільова функція оцінки режиму з урахуванням коефіцієнтів важливості критеріїв при врахуванні імовірнісного характеру навантаження може бути записана у вигляді

$$F(P,Q)=\sum_{j=1}^{J}\left[\sum_{i=1}^{I}\sum_{m=1}^{M}P_{ij}\alpha_{mj}\Phi_{mj}(P_{нij})\right]\Delta t_{ij}\rightarrow\min,$$

$$\alpha_{mj}=\alpha_{mj}(t),\quad\sum_{m=1}^{M}\alpha_{mj}(t)=1, \tag{5}$$

де α_{mj}, m=1, M – вектор розподілу коефіцієнтів важливості критеріїв Φ_{1j}, Φ_{2j}, Φ_{3j}, … , Φ_{mj} в j-му розрізі графіка навантаження; m – поточний індекс критерію; Δt_j – тривалість j-ї зони розглянутого графіка навантаження системи.

На практиці оцінка значень коефіцієнтів важливості критеріїв може здійснюватися досвідченими диспетчерами енергосистем, які керують оперативними режимами ЕЕС.

Рішення завдання керування режимом роботи ЕЕС з урахуванням імовірнісного характеру навантаження вузлів можна ефективно здійснити на основі використання експериментально-статистичних методів, зокрема, методів екстремального планування експерименту.

В роботі обраний кластер ЕЕС, що містить 7 генеруючих вузлів (з урахуванням балансуючого пункту), 13 навантажувальних вузлів і 27 гілок. Була визначена статистична сукупність величин в обсязі n = 96 значень активних потужностей навантаження системи. Весь діапазон спостережуваних випадкових значень потужності ($1300 \le P_н \le 2200$ МВт) розбитий на дев'ять розрядів з інтервалом по ΔP=100 МВт. Підраховано кількість випадкових величин навантажень системи (m_i), які припадають на кожен i-й розряд. На цій підставі визначені частоти ($P^*_i = m_i / n$) і побудований статистичний ряд розподілу навантажувальних потужностей системи.

Результати розрахунків функції розподілу $F^*(P)$ і значення статистичної щільності розподілу $f^*(P)$, отриманих на основі статистичної інформації, наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Розрахункові показники розподілу навантаження

Найменування показників	Чисельні значення параметрів								
Діапазон значень потужності, P_i, МВт	1300-1400	1400-1500	1500-1600	1600-1700	1700-1800	1800-1900	1900-2000	2000-2100	2100-2200
Поточний номер розряду, m_i, о.е.	1	3	8	18	26	21	9	8	2
Значення розподілу частоти i-го разряда, P^*_i, в.о.	0.0104	0.0310	0.0830	0.1870	0.2710	0.2190	0.0940	0.0830	0.0210
Значення функції розподілу, $F^*(P)$, в.о.	0.0104	0.0114	0.1244	0.3114	0.5820	0.8610	0.8950	0.9784	1.0000
Значення статистичної щільності розподілу $f^*(P)$, в.о.	$0.9\cdot10^{-4}$	$42.8\cdot10^{-4}$	$7.48\cdot10^{-4}$	$16.8\cdot10^{-4}$	$24.4\cdot10^{-4}$	$19.7\cdot10^{-4}$	$8.47\cdot10^{-4}$	$7.48\cdot10^{-4}$	$1.89\cdot10^{-4}$

Розрахункові значення функції $F^*(P)$ відповідають максимальним величинам потужностей по кожному i-му інтервалу, а статистична щільність розподілу $f^*(P)$ визначена відповідно до експериментальних даних.

Як випливає з даних табл. 2, ймовірність випадкового розподілу навантаження системи підпорядковується нормальному закону розподілу. Отже, вважаючи, що випадкова величина активної потужності навантаження системи також підпорядкована нормальному закону, можна подати рівняння щільності розподілу навантаження наступним чином

$$f(P)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(P_н-m)^2}{2\sigma^2}}=\frac{1}{575.88}e^{-\frac{(P-1773.1)^2}{105616.08}},$$

де $m = \Sigma_{i=1}^{96} P_i$ /96=1773.1 – математичне очікування випадкової величини активного навантаження системи, МВт; $\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{52840.8} = 229.87$ – середньоквадратичне відхилення випадкової величини потужності; $D = a - m^2 = 3196873.8 - 1773.142^2 = 52840.8$ – дисперсія випадкової величини потужності; $a = \Sigma_{i=1}^{J} (P_i^2)$ /96 – постійний коефіцієнт.

В якості критеріїв оцінки режиму роботи ЕЕС прийняті: Φ_1 – критерій, що відображає мінімум витрат, пов'язаних з витратою палива в системі; Φ_2 – критерій мінімуму шкоди, пов'язаного з викидом тепловими електростанціями шкідливих речовин в атмосферу; Φ_3 – критерій максимуму забезпечення надійності джерел генерації. Динаміка зміни критеріїв представлена на рис. 1.

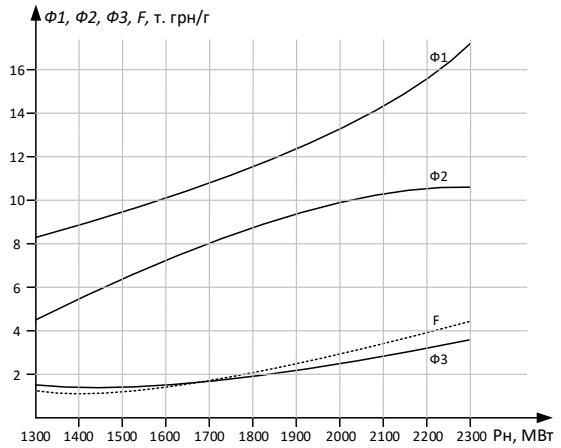

Рис. 1. Змінення критеріїв– $\Phi_i(P)$ і функції мети– $F(P)$

Оскільки всі перераховані вище критерії оцінки режиму роботи ЕЕС є однорідними і рівноцінними, тобто виражаються в однакових размерностях, то величина функції мети може бути визначена простим додаванням значень перерахованих критеріїв для досліджуваної точки факторного простору.

Як випливає з рис. 1, в прийнятих інтервалах зміни потужності системи величини критеріїв і функції мети мають явно виражений нелінійний характер при збільшенні активної потужності навантаження.

У якості математичної моделі, що відбиває залежність цільової функції від варійованих факторів, обрана нелінійна залежність поліноміального виду. Остання реалізується на основі методу планування експерименту, зокрема, з використанням ортогонального центрального композиційного плану (ОЦКП).

Динаміка зміни власних коефіцієнтів (*b1, b2, b3*) цільової функції $F(P)$ при реалізації експерименту за допомогою ОЦКП при різних значеннях навантажень приведена на рис. 2.

Як випливає з рис. 2, чисельне значення градієнта цільової функції $\partial F(P)/\partial P$ змінюється нерівномірно при зміні потужності навантаження системи. При цьому, динаміка зміни по кожному s-му фактору (Ps, s = 1, 3) різна: найбільш інтенсивна зміна має місце по другому фактору, потім по третьому і, нарешті, по першому. Діапазони зміни градієнта цільової функції по факторам відповідно складають

$$\partial F(P)/\partial P_1=(-0.1690–0.3380);$$
$$\partial F(P)/\partial P_2=(-0.3280\text{-}0.5326);$$
$$\partial F(P)/\partial P_3=(-0.0350–0.4840).$$

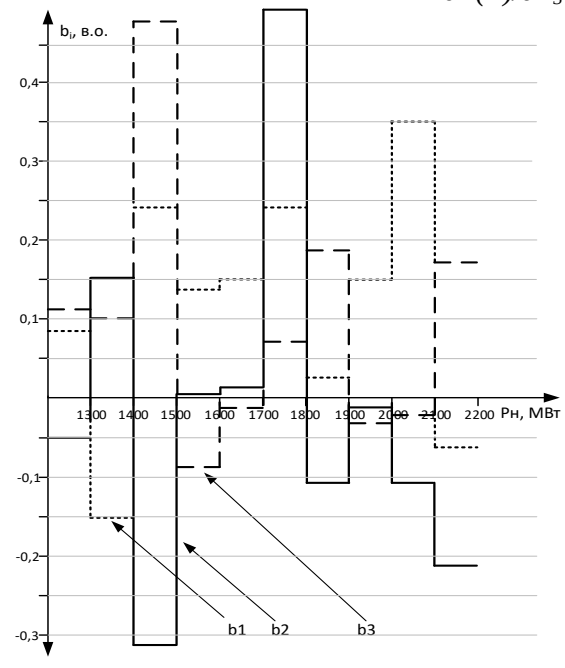

Рис. 2. Динаміка зміни коефіцієнтів цільової функції

Нерівномірність градієнта цільової функції щодо запропонованих факторів визначається різницею техніко-економічних показників генеруючих джерел. Збільшення градієнта цільової функції пояснюється відмінністю сукупності техніко-економічних характеристик розглянутих джерел генерації і балансуючого пункту, особливо при збільшенні навантаження системи, коли балансуючий пункт працює з граничною наявною потужністю.

Після формування функції мети у вигляді полінома другого порядку реалізована оптимізація режиму ЕЕС методом ковзного допуску з урахуванням імовірнісного характеру зміни навантаження і при заданому середньому значенні навантаження системи – 1773,1 МВт.

Динаміка зміни величин критеріїв в результаті розрахунку приведена в табл. 3.

Аналіз даних табл. 3 підтверджує припущення про те, що облік імовірнісного характеру навантажень призводить до уточнення чисельних значень критеріїв за рахунок підвищення достовірності величин параметрів, що оптимізуються. Це підтверджує досягнення більш глибокого мінімуму цільової функції за рахунок уточнення фактичних оптимальних значень варійованих змінних при обліку імовірнісного характеру навантажень.

Таблиця 3

Динаміка змін критеріїв

Умова рішення задачі		Динаміка зміни критеріїв			
		$\Phi_1(P)$, $\times 10^3$грн/год	$\Phi_2(P)$, $\times 10^3$грн/год	$\Phi_3(P)$, $\times 10^3$грн/год	$F(P)$, $\times 10^3$грн/год
З урахуванням імовірнісного характеру навантаження	початкове значення	7.457	1.708	2.714	11.879
	оптимальне значення	7.092	1.440	2.091	10.623
Без урахування імовірнісного характеру навантаження	початкове значення	7.626	1.810	2.830	12.266
	оптимальне значення	7.340	1.550	2.430	11.320
Зміна значень критеріїв при врахуванні імовірнісного характеру навантаження		0.169	0.102	0.126	0.397
Зниження значень критеріїв	з урахуванням імовірнісного характеру навантаження	0.365	0.267	0.723	1.356
	без урахування імовірнісного характеру навантаження	0.286	0.260	0.400	0.946

Висновки та напрямок подальших досліджень. Врахування імовірнісного характеру навантажень ЕЕС призводить до уточнення чисельних значень критеріїв оцінки режимів і дозволяє отримати більш глибокий мінімум цільової функції керування за рахунок виявлення реальних значень навантажень системи і відповідного перерозподілу потужностей між генеруючими джерелами ЕЕС.

В роботі проведено планування і проведення масового факторного розрахункового експерименту. На основі отриманих результатів розраховані параметри регресій впливу управляючих впливів на параметри сенсорних точок. Побудовані компоненти матриці чутливості параметрів режиму електричної мережі до керуючих впливів диспетчерських корекцій аварійного режиму. Проведена формалізація і інкорпорація коефіцієнтів матриці чутливості в загальну базу знань разом з диспетчерськими інструктивними матеріалами. Зроблено оцінку ефекту від використання в інтелектуальній системі знань про керування аварійним режимом енергосистеми з урахуванням імовірнісного характеру навантаження вузлів споживачів. На основі отриманих результатів можна зробити висновок про достатню ефективність отримання коефіцієнтів чутливості і використання їх в якості знань диспетчерського керування по коригуванню аварійного режиму.

Змістом подальших досліджень є розширення методів отримання знань про режими роботи об'єкта керування в умовах імовірнісного характеру контрольованих параметрів.

Список літератури

1. **Егоров А.В., Ершов М.С., Синицына Н.В.** Определение вероятностных характеристик электрических нагрузок на основе нормативных коэффициентов и ограничений технологических режимов потребителя // А.В. Егоров, М.С. Ершов, Н.В. Синицына – Энергетика – №11 – 2015 – С. 154–158

2. **Сулейманов В.Н., Саидов У.О., Котов И.А.** Многокритериальный анализ электроэнергетических систем с учетом вероятностного характера нагрузки узлов // В.Н. Сулейманов, У.О. Саидов, И.А. Котов – Энергетика и электрификация – № 3 – 1987 – С. 35–38.

3. **Довгалюк О.Н. У**чет влияния вероятностного характера нагрузок электрических сетей на величину показателей качества электроэнергии // О.Н. Довгалюк – Світлотехніка та електроенергетика– №8 – 2006 – С. 54–64

4. **Morkun V.S., Kotov I.A.** Knowledge base formation for automation of dispatch control over power systems of the mining and metallurgical complex / V.S. Morkun, I.A. Kotov // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu – №4 – 2021 – P. 103–109

5. **Morkun V.S., Kotov I.A.** Intellectualization of Emergency Control of Power Systems on the Basis of Incorporated Ontologies of Knowledge-Bases / V.S. Morkun, I.A. Kotov // Acta Mechanica Et Automatica – *N13*(2) – 2019 – P. 86–94.

6. **Thareja R., Sharma Ch., Gupta R., Goel P., Singhal K.** Review Techniques of Knowledge mining / R. Thareja, Ch. Sharma, R. Gupta, P. Goel, Singhal // International Journal of Computer Science and Information Technologies – Vol.8(1) – 2017 – P. 105-108

7. **Sandkuhl K., Smirnov A.** Knowledge Management in Production Networks: Classification of Knowledge Reuse Techniques. SPIIRAS Proceedings / K. Sandkuhl, A. Smirnov – 1(56) – 2018 – 5 p.

8. **Гаврилова Т.А., Кудрявцев Д.В., Кузнецова А.В.** Выбор инструментов управления знаниями с учетом специфики предметной области // Т.А. Гаврилова, Д.В. Кудрявцев, А.В. Кузнецова – Инновации – 8(250) – 2019 – С. 44-52.

9. **Chirapurath J.** Knowledge mining. The Next Wave of Artificial Intelligence-Led Transformation (1st ed.) – Harvard Business Publishing – 2019 – 16 p.

10. **Cheng Y., Chen K., Sun H., Zhang Y., Tao F.** Data and knowledge mining with big data towards smart production – Journal Of Industrial Information Integration – V.9 – 2018 – p. 1-13.

11. **Массель Л.В., Ворожцова Т.Н., Пяткова Н.И.** Онтологический инжиниринг для поддержки принятия стратегических решений в энергетике // Л.В. Массель, Т.Н. Ворожцова, Н.И. Пяткова – Онтология проектирования – 7(1) – 2017 – С. 66-76.

12. **Загорулько Г.Б.** Разработка онтологии для интернет-ресурса поддержки принятия решений в слабо формализованных областях // Г.Б. Загорулько – Онтология проектирования – 22(4) – 2016 – С. 485-500.

13. **Массель Л.В.** Фрактальный подход к структурированию знаний и примеры его применения // Л.В. Массель – Онтология проектирования – 6(2) – 2016 – С. 149-161

14. **Ахмадеева И.** Использование онтологии для автоматизации поиска научной информации в сети Интернет // И. Ахмадеева – Информационные и математические технологии в науке и управлении – 4(12) – 2018 – С. 42-49.

15. **Зінов'єва І.С., Артемчук В.О., Яцишин А.В.** Використання відкритих геоінформаційних систем у підготовці фахівців з комп'ютерних наук // І.С. Зінов'єва, В.О. Артемчук, А.В. Яцишин – Інформаційні технології і засоби навчання – 68(6) – 2018 – С. 87–99

16. **Шулима О.В., Шендрик В.В., Шестак М.О.** Побудова сховища даних системи підтримки прийняття рішень для проектування розподілених енергетичних систем // О.В. Шулима, В.В. Шендрик, М.О. Шестак – Lviv Polytechnic National University Institutional Repository – 2016 – С. 291–297

17. **Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Morkun N., Hryshchenko S.** Energy Saving in Mining Production. Science And Innovation – 14(3) – 2018 – P. 29-39.

18. **Madrigal M., Uluski R., Mensan G.** Practical Guidance for Defining a Smart Grid Modernization Strategy: The Case of Distribution. World Bank Studies;. Washington DC (Revised Edition) – 2017 – 179 p.

19. **Любарский Ю., Хренников А.** Компьютерная поддержка диспетчерских решений в электрических сетях. / Библиотечка Электротехника – 8(248) – 2019 – С. 1–92

20. **Кожихова О.** Оценка чувствительности перетоков мощности к параметрам модели установившегося режима. / VIII Международная молодёжная научно-техническая конференция "Электроэнергетика глазами молодежи – 2017", Самара; Самар. гос. техн. ун-т. – 2017 – С. 137-140.

УДК 622.25

О.А. ГУЛІВЕЦЬ*, канд. техн. наук, доц., С.О. ПОПОВ, д-р техн. наук, проф.,
А.О. БОНДАРЕЦЬ, ст. викл., С.Ю. ОЛІЙНИК, асист.
Криворізький національний університет

ДЕЯКІ ПИТАННЯ КОРИГУВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ШАХТНОГО ПІДЙОМУ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ОБСТЕЖЕННЯ І МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ АРМУВАННЯ ВЕРТИКАЛЬНИХ СТВОЛІВ ШАХТ

Мета. Мета дослідження – установити залежності для коригування експлуатаційних параметрів шахтного підйому за результатами обстеження технічного стану армування вертикальних стволів шахт.

Метод дослідження. Метод дослідження – аналітичний.

Наукова новизна. Установлені залежності для коригування експлуатаційних параметрів шахтного підйому за результатами обстеження технічного стану армування вертикальних стволів шахт.

Практична значимість. Застосування одержаних залежностей дозволяє визначити раціональні значення швидкості підйому скіпів та їх вантажності на основі даних обстеження технічного стану армування вертикальних стволів шахт.

Результати. На основі аналізу конструкцій армування вертикальних стволів шахт та робочого процесу системи «армування – під'ємна посудина» установлено, що при русі по стволу під'ємних посудин виникає комплекс навантажень на елемент армування, які виникають внаслідок відхилень провідників від лінійної форми, наявності ексцентриситету завантажених скіпів, кручення підйомних посудин, дії коріолісової сили.

В процесі експлуатації відхилення провідників від проектного положення може збільшуватись в декілька разів. Крім цього внаслідок агресивного впливу шахтних вод і атмосфери ствола елементи його армування в певній мірі піддаються корозії. У зв'язку з цим виникає необхідність коригувати експлуатаційні параметри шахтного підйому відповідно фактичному значенню несучої здатності елементів армування вертикальних стволів шахт.

На основі аналізу конструктивних рішень армування ствола і робочого процесу системи «армування – під'ємна посудина» та застосувавши принцип сумісності деформацій провідника та розстрільної балки під дією горизонтального навантаження установлені залежності розподілу прикладеної сили між ними залежно від їх довжини і фактичних значень геометричних характеристик їх поперечних перерізів та механічних характеристик їх матеріалів.

На основі виконання умов міцності провідника та розстрільної балки визначаються раціональні значення швидкості підйому та маси завантаженого скіпа.

* © Гулівець О.А., Попов С.О., Бондарець А.О., Олійник С.Ю., 2021