

Economic Matters (ICSF 2021), – E3S Web of Conferences 280 , 07016. – 2021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128007016>.

4. **Morkun V.S.** Development of a method for studying traffic of multiservice networks / **Morkun V.S., Hryshchenko S. M., Nizhehorodtsev V.O., Filonenko M.M., Lagovsky V.V.** // Radio Electronics, Computer Science, Control, – 2023. – №2. – P.125-133. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2023-2-13>

5. **Loriia, M.** /Principles and stages of creation of automatic control systems with a model of complex technological processes / **Loriia, M., Tselishchev, O., Eliseyev, P., Porkuian, O., Hurin, O., Abramova, A., & Boichenko, S.** // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, - 2022, - 6(6 (120), 20–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.270519>

6. **Porkuian, O.V.** The influence of the characteristics variations of the concentrating plant control object on the identification results using the hammerstein model / **Porkuian, O.V. Morkun, V.S., Morkun, N.V., Gaponenko, I.A.** // Sustainable Development of Mountain Territories This link is disabled, - (2021). - 13(1), - pp. 94–102 DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-94-102

7. NuMicro™ Family NUC140 32-bit microcontroller – - <https://www.nuvoton.com/resource-files/DA00-NUC140ENF1.pdf>

8. LM7824 datasheet- <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/33411/UTC/LM7824.html>

9. AMS1117 datasheet- <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/49118/ADMOS/AMS1117.html>

10. LED datasheet - <https://learn.adafruit.com/all-about-leds/the-led-datasheet>

11. Technical data sheet of the EEPROM chip 24LC256 - <https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/21203r.pdf>

12. Technical data sheet LM258 - <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/17966/PHILIPS/LM258.html>

13. Technical data sheet of the MAX5204 DAC chip - <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/max5204-max5207.pdf>

14. Data sheet of the MAX5204 DAC chip - <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/73074/MAXIM/MAX232.html>

Рукопис подано до редакції 15.03.24

УДК 621.312

О.М.СІНЧУК, д-р техн. наук, проф., М.М. ОМЕЛЬЧУК, аспірант
Криворізький національний університет

ВАРІАТИВНІСТЬ ПРЕВЕНТИВНОГО ВИБОРУ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ В СТРУКТУРАХ СУЧАСНИХ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ РУДНИКОВИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

Мета. Метою даного дослідження є аналіз потенційних можливостей та оцінювання варіативності їхньої реалізації шляхом залучення нових нетрадиційних видів електричних двигунів в структурах комплексів енергоефективного формату тягових електроприводів рудникових контактних електровозів. Мета пошуку являє собою усучаснення новітніх спрямувань у розробці та втіленні в практику роботи гірничих підприємств електровозів з енергоефективними та надійними електромеханічними системами. Для досягнення поставленої мети, в роботі проведено аналіз як реальних параметрів функціонування експлуатуємих типів електричних двигунів, так і їхніх опонентів - перспективних зразків. Аргументовано перспективи конкретних варіантів з урахуванням усіх супутніх чинників і умов експлуатації.

Методи дослідження. Для знаходження адекватного рішення в досягненні поставленої мети досліджень в роботі використано методи математичного аналізу для вибору технологічних параметрів різних типів електродвигунів з рейтинговим оцінюванням стану та можливостей виконання ними функціональних задач при функціонуванні в складі тягових електромеханічних систем рудникових контактних електровозів.

Наукова новизна. Вперше запропоновано підхід до оцінювання рівня ефективності структурування конкретних типів електродвигунів у варіанті рейтингового оцінювання комплексу їхніх технічних та енергетичних можливостей в сучасних тягових електромеханічних системах рудникових контактних електровозів.

Практичне значення. Запропонований підхід до аналізу та оцінювання статусу електричних двигунів як тягових в складі відповідних електромеханічних систем рекомендується до вивчення і практичної реалізації відповідними розробниками нових варіантів тягових систем рудникових контактних електровозів.

Результати. У статті запропоновано метод аналізу, оцінювання і вибору ефективних типів електричних двигунів в складі сучасних енергоефективних електромеханічних системи рудникових електровозів, проведено порівняння технічних характеристик досліджуваних двигунів. Було окреслено потенційні напрямки розвитку у галузі застосування тягових електроприводів змінного струму з підвищеними значеннями напруги живлення і номінальних обертів двигуна.

Ключові слова: електричний двигун, електровоз, електромеханічна система, рудник, шахта.

doi: 10.31721/2306-5451-2024-1-58-30-36

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Основним видом транспорту сучасних вітчизняних вугільних та рудних шахт є електровозний [1]. Експлуатуємі в шахтах та рудниках електровози по виду класифікують як рудникові. При цьому лінійка типів та видів електровозів включає в себе контактні, акумуляторні, контактньо-акумуляторні та безконтактні-високочастотні [1-3]. Згідно зчіпних мас то, в основному, це 8-14 тонні види з можливістю збільшення при необхідності їхніх зчіпних мас шляхом керування по системі багатьох одиниць [3]. Як факт зазначимо, що конструкція вітчизняних рудникових електровозів за останні сторіччя не зазнала бажаних та очікуваних, зі сторони експлуатаційників, позитивних змін. Це твердження стосується і їхніх тягових електромеханічних систем - електроприводів (ТЕП). Експлуатуємі з резисторним (ступінчастим) керуванням частоти обертів тягових електродвигунів постійного струму з послідовним збудженням зразки ЕМС є застарілими з ряду показників, в тому числі: з показників енергоефективності, надійності, терміну експлуатації, технологічності, а також з неможливістю впровадження на їхній основі автоматизованого керування процесом ведення електровозів в умовах підземних горизонтів шахт. Необхідність заміни як ЕМС так і електровозів, вже більш ніж півстоліття являє собою не дискусію, щодо потреби цього дійства, а формат чіткого питання: чому це до сих пір не зроблено, або зроблено у недостатніх обсягах. Це твердження стосується в повній мірі і тягових електродвигунів, які в комплексі переліку своїх технічних недоліків є на даний час дорогавартісними зі значними масогабаритними показниками і водночас ненадійними з незначним терміном експлуатації [1-2]. Реальний міжремонтний термін експлуатації тягових електродвигунів в умовах роботи електровозів у вітчизняних залізничних шахтах за останні 10-15 років не перевищує 4-5 місяців. Окрім цих недоліків зазначимо значні додаткові витрати на регламентовану заводом-виробником логістику в процесі обслуговування цих двигунів, що в умовах шахт вкрай складна [2].

Між тим, як свідчить досвід інших електрифікованих видів транспорту, і особливо в закордонних варіантах, в сучасному арсеналі тягових видів і типів електродвигунів накопичено ряд нових енергоефективних зразків, котрі доцільно і необхідно розглядати як перспективні складові нових сучасних видів ТЕП рудникових електровозів.

Аналіз наукових досліджень і публікацій. Вплив типу тягового електродвигуна на загальний показник енергоефективності електроприводу рудникових електровозів постійно знаходив і продовжує знаходити відображення у ряді досліджень як вітчизняних, так і іноземних фахівців [1-4]. Практичні здобутки проведених досліджень призвели до початку активної стадії випробувань нових сучасних видів електроприводів рудникових електровозів, і перш за все — з асинхронними двигунами (АД). Проте виявлені певні проблеми з енергетичними показниками АД, а також останні технологічні здобутки у галузі конструювання і виробництва нових типів електродвигунів, висвітлюють залучення саме цих зразків до досліджень і впровадження їх в структури ТЕП аналізуємих видів електровозів. В переліку таких двигунів є:

- безколекторні двигуни постійного струму (BLDC);
- вентильні реактивні двигуни (SRM);
- синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM).

Аналізуючи спрямованість досліджень, то тут визначається перш за все енергоефективна складова їхнього функціонування. Електрична ефективність є одним з основних показників, на які орієнтуються при виборі двигуна [5, 7]. У табл. 1 наведені порівняльні характеристики для зазначених типів двигунів при мінімальному і максимальному навантаженнях на валу.

Таблиця 1
Енергетичні характеристики двигунів

Тип двигуна	ККД при мінімальному навантаженні (10%)	ККД при максимальному навантаженні (100%)
Колекторний двигун постійного струму (ДТРН-45/27)	80-85	85-90
Безколекторний двигун постійного струму (Compro REB60)	70-80	>95
Асинхронний двигун (4МТКМ2П225L6)	>90	>90
Вентильний реактивний двигун (ABB 3GBL222217-HSC)	90	90-95
Синхронний двигун з постійними магнітами (Remi HVH250)	85	92-95

До наведеної таблиці були додані значення ККД для колекторних двигунів постійного струму типу ДТРН, що наразі використовуються у тягових приводах електровозів. Можна побачити, що ці двигуни суттєво поступаються за ефективністю більш сучасним аналогам.

Крім того, важливим параметром для оцінки двигуна системи тягового приводу для промислового електротранспорту є співвідношення ваги установки до її потужності.

Співвідношення потужності до ваги для електродвигунів зазвичай розраховується з використанням пікової потужності двигуна. Використання двигуна з вищим співвідношенням потужності до ваги є пріоритетним при розробці нової системи тягового електроприводу електровозів.

На рис. 1 наведений графік, що відображає визначене співвідношення у відносних одиницях по шкалі від 1 до 5.

Окремим фактором, що впливає на вибір типу системи тягового приводу є вартість елементів системи керування і двигунів. Вартість приводу пропонується оцінювати у відносних одиницях по шкалі від 1 до 5. У вартість двигуна додані вартість елементів системи охолодження, кріплення та другорядних механізмів (напр. редукторів). Підсумкова вартість системи керування розглядається комплексно, тобто враховуються елементи блоку силової електроніки (напр. інвертор), контролери живлення і двигуна.

На рис. 2 *а, б* наведені графіки порівняння середньої вартості двигунів розглядаємих типів і системи керування до них відповідно

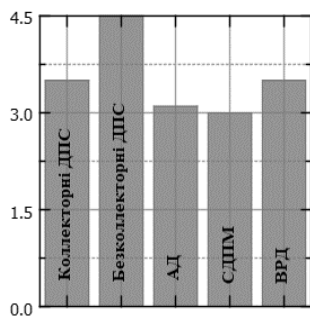


Рис. 1. Співвідношення ваги до потужності основних видів двигунів тягових електроприводів

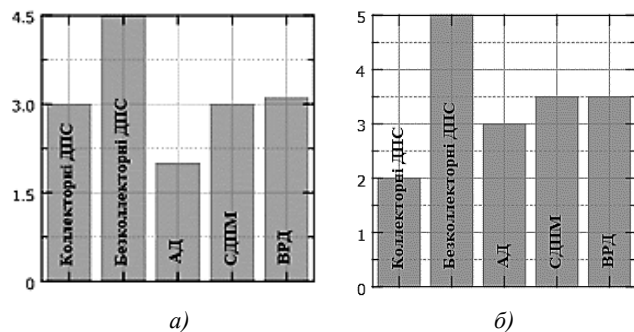


Рис. 2. Вартість елементів приводу: *а* – середня вартість двигуна у в.о; *б* – середня вартість системи керування у в.о

Беручи до уваги результати порівняння різних типів двигунів за основними техніко-економічними показниками, пропонується звужити їхній перелік і поглибити дослідження вибору оптимального двигуна для сучасної системи тягового електроприводу електровоза на прикладі синхронного двигуна з постійними магнітами [6].

Постановка задачі. Згідно мети задачі дослідження наступні: аналіз ефективності роботи різних типів та видів електродвигунів в складі тягових електромеханічних систем рудникових електровозів; розробка методу рейтингового оцінювання їхніх функціональних можливостей та розробка рекомендацій щодо вибору конкретного виду та типу електродвигуна; аналіз функціонування синхронних двигунів з постійними магнітами в структурі визначених енергоефективних систем.

Тягові електромеханічні системи на основі двигунів постійного струму з послідовним збудженням, попри свою загально високу працездатність та м'які механічні характеристики, наразі не відповідають в повній мірі сучасним вимогам і умовам експлуатації електровозів в рудниках і шахтах. В свою чергу реостатна (резисторна) система керування режимами роботи тягових двигунів постійного струму з силовим контролером хоч і є технологічно простою і ремонтоздатною, та вже ж морально застаріла і досить енергетично неефективною. Локальна модернізація існуючих ЕМС шляхом заміни окремих складових в їхніх структурах бажаного позитивного ефекту не дає. Створення нових і схем ТЕП електричних приводів контактних електровозів — один з пріоритетних напрямків розвитку шахтного підземного електротранспорту, який вимагає від відповідних розробників проектною відповідності ряду чинників :

- уніфікованість та технологічність всієї системи;
- оптимальні масо-габаритні показники;
- високі тягові характеристики, в тому числі і перш за все пускові;
- максимально досяжні енергетичні та техніко-економічні показники.

Поява на гірничо-рудних підприємствах України експериментальних зразків електровозів з сучасними ТЕП з енергоефективними IGBT-перетворювачами, керуючими роботою різних типів і видів двигунів, та позитивні результати їхнього функціонування створюють реальні умови до продовження активних досліджень щодо вибору в тому числі і відповідного електродвигуна [4-7].

Викладення матеріалу та результати. При виборі відповідної моделі синхронного двигуна з постійними магнітами, окрім аналізу вищезазначених показників, варто зазначити наступне - діапазон робочих обертів двигунів серії ДТРН та ДК, зокрема ДТРН-45/27АС та ДК-812, які на даний момент є основними на контактних електровозах зі зчіпною масою 14 т, лежить у діапазоні невеликих значень: від 1300 до 4000 об/хв. Сучасні технології виробництва деталей двигунів, а також поява доступних високовольтних напівпровідникових перетворювачів дають змогу збільшити робочий діапазон обертів тягових двигунів, при цьому уникнути значних втрат моменту і великих енергетичних втрат. Поточні моделі синхронних тягових двигунів досягають значень до 10000-12000 об/хв, експериментальні – понад 20000 об/хв. Критично важливою складовою систем тягового електроприводу з подібними зразками стає редуктор, який у сучасних агрегатах набуває виконання в одному корпусі з двигуном і контролером, і розрахований на тривалу роботу при високих обертах. Доцільність практичного застосування наведених двигунів у системах тягового приводу рудничного електротранспорту досі знаходиться під питанням через ряд проблем [8]. Враховуючи ці особливості, пропонується зупинити свій вибір на розгляді характеристик обраного типу двигуна тягового приводу у розширеному діапазоні обертів, але обмежитись максимальним значенням в 7000 об/хв.

Для огляду оберемо двигун серії NVH250 виробництва компанії Remi International, США. Модельний ряд даних двигунів був розроблений для використання в різноманітних транспортних засобах, у тому числі тих, що застосовуються у сфері важкої промисловості. Відповідно, двигуни NVH250 мають підвищені тягові характеристики, ступінь захисту, гнучкий діапазон робочих напруг. Обраний двигун має характеристики наведені в табл.2.

Таблиця 2

Технічні характеристики двигунів серії NVH250

Параметр	Одиниця вимірювання	060s	060D	090S	090D	115S	115D
Загальна вага	кг	37	37	50	50	57	57
Вага статора	кг	28	28	35	35	42	42
Охолодження	-	Рідинне					
Макс. напруга	В	700	700	700	700	700	700
Макс. струм	А	300	600	300	600	300	600
Режим короткотривалого пікового навантаження (до 30 секунд)							
Макс.швидкість	об/хв	3000	6200	2400	4100	1800	3500
Макс.момент	Н·м	210	210	310	320	400	400
Макс.потужність на валу	кВт	70	140	80	140	80	150
Тривалий режим							
Ном.швидкість	об/хв	4000	8400	2600	5700	2000	4400
Ном.момент	Н·м	110	110	210	160	270	210
Ном.потужність на валу	кВт	45	90	60	100	60	100

Складемо спрощену схему системи приводу електровоза з синхронним двигуном у структурі [9] (рис. 3).

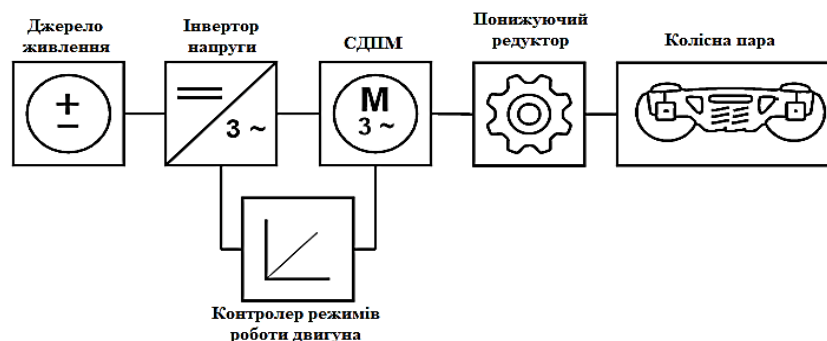


Рис.3. Структурна схема системи приводу одного блоку колісної пари рудничного електровоза з синхронним двигуном з постійними магнітами

На рис. 4 наведена типова механічна характеристика двигуна приводу електровоза [10].

На рис. 5 наведені механічна і швидкісна характеристики СДПМ HVH250 при двох різних режимах навантаження – піковому і номінальному.

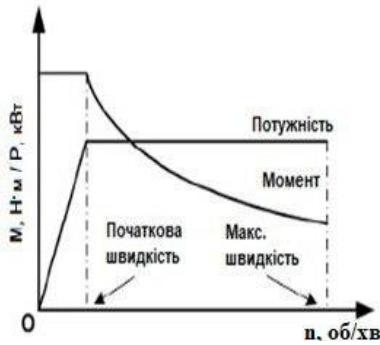


Рис. 4. Механічна характеристика тягового електродвигуна

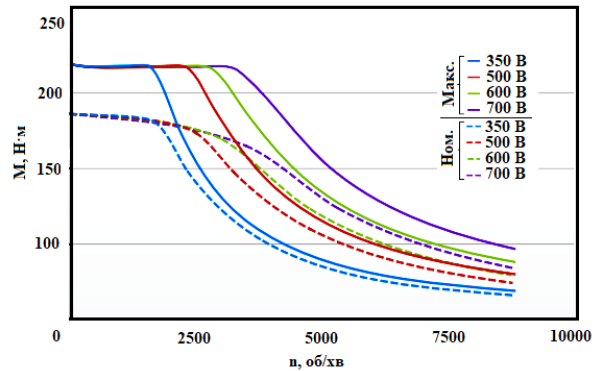


Рис. 5. Механічні характеристики двигуна HVH250-060D

Окрім того, на даному рисунку наведені характеристики синхронного двигуна HVH250-060D при різних значеннях $U_{вх}$ автономного інвертора напруги.

Карта ефективності для механічних характеристик зображена на рис. 6.

Беручи до уваги значення моменту, що розвивається електроприводом електровоза при пуско-гальмівних режимах, який складає 410-450 Нм, та при режимі роботи з максимальним навантаженням, який складає 320 Нм, можна проаналізувати наведену карту ефективності. Відповідні характеристики обраного для розгляду двигуна, навіть за умови відсутності внесення змін до механічної структури приводу і за стандартного для електровозів серії K14 діапазону обертів валу двигуна, відповідають роботі заявленим умовам, крім того мають запас потужності [11].

Графіки співвідношення потужності до швидкості при різних значеннях напруги живлення контактної мережі для двигуна HVH250-060D наведені на рис. 7.

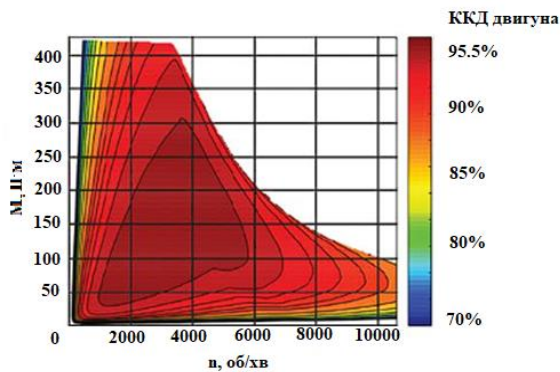


Рис. 6. Карта ефективності тягового двигуна HVH250-060D

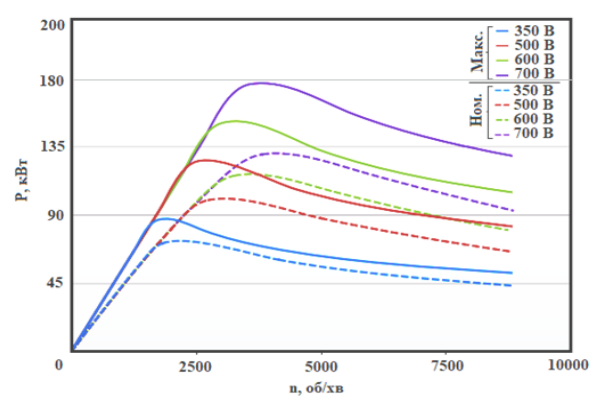


Рис. 7. Співвідношення вихідної потужності двигуна HVH250-060D до числа обертів валу

Висновки та напрямок подальших досліджень. У підсумку можна прийти до висновків, що в сучасній системі тягового електроприводу рудникових електровозів рішення переформатування типу ТЕП з ТЕД постійного струму на синхронні з постійними магнітами є економічно і технічно обґрунтованим. Енергоефективні пускові параметри, а також стабільно високі енергетичні показники при роботі у номінальному режимі створюють перевагу перед іншими типами ТЕД з переліку розглянутих у роботі в варіанті тягових видів. Використання у системі керування ТЕП напівпровідникових перетворювачів і датчиків положення ротора збільшать ефективність роботи електричного приводу електровоза навіть при підвищенні обертів двигуна. Як видно з наведених графіків, при використанні сучасних двигунів, такі як розглянуті СДПМ серії HVH250 можна змістити діапазон обертів з 1000-4000 об/хв, як на поточних тягових двигунах електровозів, до 3000-6000 об/хв без втрат моменту навіть при установці зі штатними редукторами колісних пар.

Обмеження ж обертів на раніше встановленому рівні, як видно з карти ефективності, не вийде за межі енергетично доцільних змін і підвищить тягові характеристики двигуна, особливо у пусковому режимі, що є позитивною зміною для усієї системи особливо у контексті розгляду її динаміки. Окремий інтерес складає питання значення напруги контактної мережі живлення електровозів. З графіків видно, що досліджуваний двигун має високі показники при роботі від стандартної напруги контактної мережі 250 В, але при підвищенні напруги до значень 300-500 В механічні і швидкісні характеристики покращуються, особливо на високих обертах. Такі недоліки обраного двигуна як вразливість до високих температур та ударних навантажень можуть бути повністю або частково скомпенсовані внесенням незначних змін у конструкцію електровозу, а відносно висока ціна агрегату і деталей до нього виправдовуються одними з кращих на ринку електричних двигунів показниками надійності і ремонтоздатності [12, 13].

Список літератури

1. Шахтный подземный транспорт / [Ю. Ф. Бутт, В. Б. Грядущий, В. Л. Дебелий та ін.]. – Донецьк: НДІГМ ім.М.М.Федорова, 2013. – 480 с. – (Видання третє, перероблене і доповнене).
2. Шахтный электровозный транспорт. Теория, конструкции, электрообладания: підручник / О. М.Сінчук, Е. С. Гузов, В. Л. Дебелий, Л. Л. Дебелий. – Кривий Ріг: ЧП Щербатых А.В, 2015. – 428 с.
3. Вирівнювання навантаження двохдвигунного тягового електропривода рудникового електровоза при параметричній несиметрії асинхронних двигунів / [О. П. Чорний, І. О. Сінчук, О. А. Зерній та ін.]. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. Михайла Остроградського. – 2008. – №3. – С. 79–83.
4. Шокарев Д. А. Тяговый электропривод рудничного контактно-аккумуляторного электровоза / Д. А. Шокарев. // Вісник Національного технічного університету "ХПІ": сб. наук. тр. темат. вып. : Проблемы автоматизованого електроприводу. – 2013. – №36. – С. 222–223.
5. Madichetty, S New trends in electric motors and selection for electric vehicle propulsion systems [Електронний ресурс] / Madichetty, S., Mishra, S., Basu, M // IET Electrical Systems in Transportation. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.1049/els2.12018>
6. Swaraj R. J. Comparison of electric motors for electric vehicle application // IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology. – 2017. – №6. – С. 12–17.
7. Torrent M. Permanent Magnet Synchronous Motor with Different Rotor Structures for Traction Motor in High Speed Trains [Електронний ресурс] / M. Torrent, J.I. Perat, J.A. Jimenez // Energies. – 2018, 11, 1549 – Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.3390/en11061549>.
8. Aiso K. Performance Comparison of High-Speed Motors for Electric Vehicle [Електронний ресурс] / K. Aiso, K. Akatsu // World Electric Vehicle Journal. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.3390/wevj13040057>.
9. Design of a 45 kW Permanent Magnet Synchronous Motor for a Hybrid Electric Vehicle [Електронний ресурс] / S.Henneberger, S. Van Haute, K. Hameyer, R. Belmans // Katholieke Universiteit Leuven. – 1996. – Режим доступу до ресурсу: http://bib.iem.rwth-aachen.de/IEMpublications/AltesBib/pub_427.pdf.
10. Making the Case for Electrified Transportation / P.Magne, Y. Yang, M. Preindl, V. Pantelic // IEEE Transactions on Transportation Electrification. – 2015. – №1. – С. 4–17.
11. Huynh T. -A. Analysis and Comparison of Operational Characteristics of Electric Vehicle Traction Units Combining Two Different Types of Motors / T. -A. Huynh, P. -H. Chen and M. -F. Hsieh// IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2022. – №6. – С. 5727–5742.
12. Design and Analysis of the 45kW-Class Magnetic Geared Permanent Magnet Synchronous Motor for Traction of Tram Vehicles [Електронний ресурс] / [L. Jae-Hyeon, G. Jeong, L. Hyung-Woo та ін.] // Applied sciences journal. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.3390/app11146360>.
13. A Multi-Criteria Analysis and Trends of Electric Motors for Electric Vehicles [Електронний ресурс] / [H. El Hadraoui, M. Zegrari, A. Chebak та ін.] // World electric vehicle journal. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.3390/wevj13040065>

Рукопис подано до редакції 13.03.24

УДК 658.511: 629.113

Ю. А. МОНАСТИРСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., І. С. МАКСИМЕНКО, аспірант
Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ЗМІНИ ПРОДУКТИВНОСТІ ДИЗЕЛЬ-ТРОЛЕЙВОЗІВ У ЗАЛІЗОРУДНИХ КАР'ЄРАХ КРИВОРІЗЬКОГО БАСЕЙНУ

Мета. Підвищення ефективності роботи кар'єрного автомобільного транспорту на основі застосування сучасних розробок модернізації машин шляхом встановлення дизель троллейвозного обладнання.

Методи дослідження. Положення теорії транспортних процесів і систем, методи теорії планування експериментів, а також, аналіз літературних джерел, наукове узагальнення раніше виконаних досліджень.

Наукова новизна. На підставі дослідження процесу транспортування вантажів кар'єрними автосамоскидами та