

УДК 629.423

Д. С. БЛУХІН^{1*}, В. Є. ВАСИЛЬЄВ^{2*}, А. М. АФАНАСОВ^{3*}

^{1*} Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 233 32 99, ел. пошта: comandor04b@gmail.com, ORCID 0000-0002-2791-617X

^{2*} Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +380 (056) 373-15-31, ел. пошта: wasiljew@ukr.net, ORCID 0000-0001-7551-2332

^{3*} Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта: afanasof@ukr.net, ORCID 0000-0003-4609-2361

СИЛОВИЙ СТАТИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ ЗМІННОГО СТРУМУ

Мета. Підвищення експлуатаційних показників приміських перевезень на залізницях, що електрифіковано змінним струмом за рахунок модернізації тягових статичних перетворювачів електропоїздів ЕР9М. **Методи.** Методологічною основою дослідження є загальні теоретичні положення і принципи системного підходу теоретичної електротехніки, теорії силових перетворювачів. Використано основні принципи побудови тягових статичних перетворювачів електрорухомого складу залізниць. **Результати.** Виконано аналіз базових схем випрямлення електропоїздів змінного струму. У якості альтернативної схеми запропоновано впровадження керованої схеми випрямлення на базі чотирьох зонної схеми випрямлення, яка є аналогічною для електровозів, що дозволяє використати більшість з відомих переваг безконтактних систем управління тяговим електроприводом. Обчислені деякі енергетичні показники для схеми з повним керуванням та пів керованої. У результаті порівняння вибрано варіант модернізації на основі пів керованої схеми випрямлення. Визначені необхідні значення пускової потужності трансформатора та коефіцієнти потужності для схем з некеруванням, повністю керованим та пів керованим випрямлячами. Пропонується вибір сучасних напівпровідникових елементів для комплектації перетворювачів. Показано, що у разі модернізації схеми випрямляча відсутня необхідність значних капітальних вкладень завдяки збереженню основного тягового трансформатора та тягових двигунів електропоїзда. **Практична значимість.** Одержані результати можуть бути використані підприємствами, які виконують капітальний ремонт електропоїздів змінного струму.

Ключові слова: електропоїзд, тяговий трансформатор, випрямляч, коефіцієнт потужності.

Вступ

Однією з умов успішного розвитку економіки України є наявність ефективної та надійної транспортної системи. Ефективна робота залізничного транспорту не можлива без надійної роботи рухомого складу. Сучасний стан електрифікованого рухомого складу залізниць залишає бажати кращого, як у частині електровозів так і у частині електропоїздів. Зрозуміло, що робляться деякі спроби оновити рухомий склад, але замінити сотні одиниць в одночасно не можливо. Така ситуація склалася на залізницях електрифікованих постійним і змінним струмом. Оновлення парку електровозів проводиться не значними темпами. Деякий час до залізниць надходили електровози власної розробки та виготовлення: ДСЗ – вантаж-пасажи́рський електровоз змінного струму, ДЕ1 – вантажний електровоз постійного струму. Продовжує закупатися електровоз постійного струму ВЛ11М6. Випускався електровоз змінного струму 2ЕЛ5 та постійного струму 2ЕЛ4. Тобто у напрямку заміни

парку електровозів є деякий рух. У напрямку заміни електропоїздів постійного та змінного струму, які забезпечують приміські перевезення і є соціальним видом транспорту вже тривалий час зміни відсутні. Електропоїзди власного виробництва ЕПЛ2Т постійного струму та ЕПЛ9Т змінного струму більш 10 років не випускаються. Тому швидка заміна застарілого парку електропоїздів не можлива і задача з модернізації є актуальною.

На залізницях України, які електрифіковано однофазним змінним струмом промислової частоти з номінальною напругою 25000 В тривалий час знаходяться в експлуатації електропоїзди серії ЕР9. Електропоїзди мають декілька модифікацій. Розпочато з електропоїзда ЕР9, а далі ЕР9П, М, Е, Т. ЕР9 вже давно виведені з експлуатації, ЕР9П залишились у малій кількості і подальше їх покращення не доцільне. Основні приміські перевезення виконуються електропоїздами ЕР9М, доля якого складає близько 50% парку приміських електропоїздів однофазного змінного струму [1].

Постановка завдання дослідження

Приватне акціонерне товариство «Київський електровагоноремонтний завод» [2] вже давно виконує капітальне-відновлювальні ремонти з продовженням терміну експлуатації електропоїздів до програми яких входить і модернізація. Основний обсяг робіт, які замовлені дорогами, включає модернізацію механічної частини та підвищення комфортності пасажирів. Відсутні відомості про те, що замовники передбачають модернізацію силових та допоміжних кіл, а лише їх ремонт згідно існуючих правил капітального ремонту електропоїздів і секцій. У пропозиціях заводу така можливість пропонується: заміна тягового трансформатора ОЦР-1000/25 на ОДЦЕР-1600/25, встановлення багатоканальних перетворювачів частоти М-О2Т2ПП-У3 для електропоїздів змінного струму взамін агрегатів розщеплення фаз [2, 3]. Це дозволяє знизити експлуатаційні витрати залізницям у напрямку споживання електричної енергії та обслуговування оберткових машин.

Достатньо цікавою є пропозиція заводу щодо заміни випрямної установки. Однак не вказується тип випрямної установки та її характеристики. Модернізація випрямлячів є перспективним напрямком для електропоїздів серії ЭР9.

Відповідно до джерел [4–6], в яких доскопало описано базові випрямні установки, які у різні часи встановлювалися на електропоїздах серії ЭР9 можна виділити:

УВП-3, яка у базовому варіанті укомплектована 84 вентилями типу ВЛ-200. Зараз діоди ВЛ-200 можуть бути замінені більш сучасні діодами типу ДЛ161-200, що виготовлені за дифузійною технологією. Конструктивне за способом монтажу та габаритами вони однакові, тому придатні для модернізації в умовах депо у разі відсутності базового діоду ВЛ-200.

Починаючи з електропоїзда ЭР9Е встановлювалася випрямна установка УВП-5А. Основою є діоди ВЛ7-320 таблеткової конструкції у кількості 60 штук. Охолодження не примусове, а природне, потоком повітря під час руху.

Подальший розвиток у напрямку впровадження сучасних діодів до кіл електропоїздів серії ЭР9 здійснено для електропоїздів ЭР9Т на якому використано випрямну установку типу В-ОПЕД-400-1,65К-У1 з 16 діодами таблеткової конструкції ДЛ153-1250.

Таким чином, випрямні перетворювачі для електропоїздів постійно вдосконалюють. Зрозуміло, що є і перетворювачі, які не входять до базових, але відповідають технічним умовам та встановлюються в електропоїзди заводами з

ремонту та депо.

Всі вказані перетворювачі, за своєю основою, використовують однофазну мостову схему випрямлення, точніше сказати, її розвиток – схема з несиметричним навантаженням трансформатора. У виробництві її звать схема з вентильними пробками. В основі схеми знаходиться відомий принцип регулювання напруги, який полягає у переключенні секцій вторинних обмоток трансформатора [7]. Вентильні пробки дозволяють збільшити кількість ступенів регулювання вдвічі. Схема використовується усіма електропоїздами серії ЭР9 та електропоїздом українського виробництва ЕПЛ9Т [8]. Дає перевагу в отриманні необхідної кількості позицій регулювання напруги без збільшення виводів вторинної обмотки трансформатора але має деякі недоліки. Перший недолік – пульсації вихідного струму, оскільки вихідна напруга містить додаткову складову пульсацій з низькою частотою джерела живлення. Другий недолік – не однакова сила намагнічування осердя трансформатора при роботі під час живлення різними рівнями напруги у пів періодах. Обидва недоліки ведуть до необхідності збільшення габаритів реактора згладжування та трансформатора, що розробниками було враховано.

Всі вдосконалення випрямних блоків вказаних електропоїздів пов'язані з впровадженням нових блоків на базі некерованої мостової схеми випрямлення. Однак для електровозів з колекторними тяговими двигунами постійно-пульсуючого струму давно використовуються керовані випрямлячі на основі тиристорів та багато зонних схем [7, 9].

Відома розробка перспективної схеми електропоїзда змінного струму з колекторними тяговими двигунами та випрямне-інверторним перетворювачем на базі IGBT-транзисторів, яка пропонується в [10]. Однак використання такої схеми вимагає суттєвого переоснащення електропоїзда, що у разі модернізації може бути не приємним.

Матеріал і результати досліджень

Вибір схеми випрямляча. Переваги впровадження схем плавного регулювання напруги достатньо відомі [9]. Проаналізуємо можливість впровадження базової чотирьох зонної схеми плавного регулювання, яка застосовувалася на електровозах ВЛ80Р, ВЛ85, 2ЕЛ5, в якості силового перетворювача для регулювання напругою тягових двигунів електропоїзда ЭР9М. Базова схема випрямне-інверторного перетворювача електровозів використовується в режимі

випрямляча з плавним регулюванням напруги, під час тяги та інвертора, під час рекуперативного гальмування. Однак, в електропоїздах ЭР9М режими електричного гальмування схемою не передбачені. Електричне гальмування запроваджено на електропоїздах ЭР9Т, ЕПЛ9Т [5, 8] лише у формі реостатного. Для обладнання електропоїздів ЭР9М реостатним або рекуперативним гальмуванням слід передбачити обладнання щодо перевodu двигунів з послідовного збудження до незалежного, систему живлення обмоток збудження, зміни у колах систем управління, а це суттєве збільшення капітальних вкладень. Найбільш економічним варіантом буде заміна випрямного блоку на основі некерованого випрямляча на керований. Елементи нового випрямляча та систему його управління можна розмістити замість існуючого блоку та автоматичного перемикача ступенів із збереженням з'єднання групи тягових двигунів базової схеми.

Якщо не передбачити електричне гальмування, то типова схема чотирьох зонного випрямляча може бути змінена. Відомо, що коефіцієнт потужності таких схем залишається не високим, особливо під час пуску, коли кут керування тиристорами великий [9]. Відомі розробки, де для підвищення коефіцієнта потужності електровозів з керованими випрямлячами, пропонується приєднання паралельно колу тягових двигунів зворотного діоду для скидання реактивної енергії тягових двигунів та швидкого зачинення основного тиристора плеча випрямляча [11, 12]. Розробка дещо збільшує коефіцієнт потужності, але додає кола діодів, які складаються не з одного діоду, а з групового з'єднання і вимагають габаритів з розміщення та подальшого забезпечення охолодження. Оскільки не передбачаємо використовувати електричне гальмування, то вихідною схемою можна використовувати несиметричний випрямляч, де плечі тиристорів, наприклад анодної групи, замінюємо на діоди. З одного боку це відразу збільшує коефіцієнт потужності, з іншого дає економію вкладень за відсутністю половини груп тиристорів та їх схем формування сигналу управління.

Розрахункова схема подана на рисунку 1. На схемі показано обмотки тягового трансформатора ОЦР-1000/25 (виводи А-Х – первинна, 1-2-3-4-5-0-5-6-7-8 – вторинна). Виводи обмотки власних потреб не показані. До виводів вторинної обмотки 1-2-0-6-8 приєднано несиметричний чотирьох зонний керований випрямляч. Тиристори катодної групи VS1, VS3, VS5, VS7 та діоди анодної групи VD2, VD4, VD6, VD8 утворюють кола випрямляча. До виводів

приєднується кола тягових двигунів за типовим для електропоїзда схемним з'єднанням. Для забезпечення типового алгоритму чотирьох зонної схеми випрямлення достатньо використання лише виводів трансформатора 1–3–0–8, що показано на схемі. Номінальна напруга холостого ходу між виводами трансформатора 1-8 складає 2208 В, тоді напруга секції – 276 В. Виходячи з цього, діюче значення вторинної напруги, що визначає живлення першої зони – 552 В (між виводами 0-3), далі додається друга зона – приєднання від виводів 0-3 повністю, та регульоване від виводів 1-3. Третя зона переключення на повну напругу від виводів 0-8 (1104 В) та регульоване від виводів 0-3. Четверта зона від повного приєднання напруги виводів 3-8 (1656 В) та регульована комутація від виводів 1-3. Алгоритм роботи цілком відповідає роботі базової симетричної схеми на основі тиристорів [9].

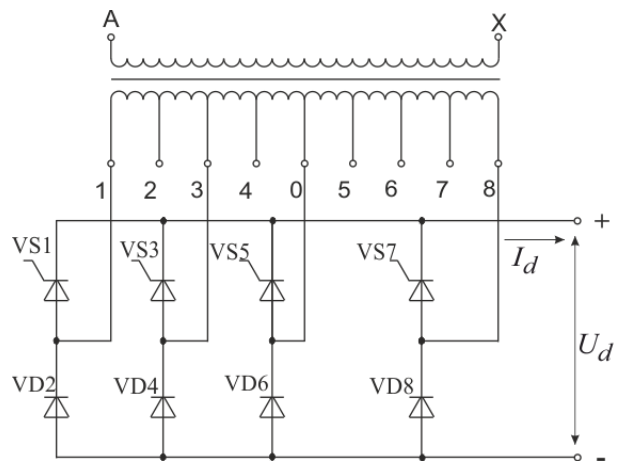


Рис. 1. Розрахункова схема випрямного перетворювача

Визначення необхідного класу приладів за напругою зараз не є дуже складною задачею. Так за типовими методиками, що викладені у [7, 13, 14] для групового тиристора приймаємо чотири послідовно з'єднані тиристори типу Т233-800-18. Для плеча з діодів три послідовно з'єднані діоди типу ДЛ243-800-24.

Відповідно до тенденції, що спостерігається у розвитку випрямних блоків для електропоїздів серії ЭР9, приймаємо одне коло напівпровідникових вентилів у плечі без паралельних з'єднань, як це і використовується в установці типу В-ОПЕД-400-1,65К-У1 [5]. Кінцеве значення прямого струму вентиляного плеча можна вибрати більш точно лише після розрахунку теплових параметрів для декілька різних напівпровідникових приладів.

Аналіз пускової потужності трансформатора. Вибір приладів за класом та струмом це не основна задача. Рішенню таких задач

присвячено багато літератури за якою можна виконати якісний вибір сучасної елементної бази з врахуванням режимів навантаження, виділення тепла та іншого [13–15]. Однією з суттєвих задач є забезпечення необхідної потужності тягових двигунів на фоні зниження коефіцієнта потужності схеми, оскільки перехід до випрямного режиму з керованими тиристорами знижує коефіцієнт потужності системи. У разі модернізації це може привести до необхідності збільшення габаритів трансформатора, тобто його заміни, що значно підвищує вартість модернізації та може бути не доцільним для електропоїздів цієї серії.

Розглянемо можливість забезпечити необхідною потужністю кола тягових двигунів під час пуску трансформатором ОЦР-1000/25, який встановлено на електропоїздах ЕР9М. Цілком зрозуміло, що схема з плавним регулюванням має менший коефіцієнт потужності у порівнянні з схемою з некерованим випрямленням, тому повної потужності трансформатора може не вистачати.

Найгірший режим під час пуску двигунів, які ще не мають проти електрорухомої сили, тому подається мале значення напруги, чому є характерним великий кут управління тиристорів. Навантаженням є чотири двигуни моторної секції РТ-51Д, які з'єднано у два паралельних кола з двох послідовно з'єднаних двигунів [4–6], тобто типове з'єднання двигунів для електропоїзда зберігаємо. Відповідно до технічних даних двигунів [6] загальний опір такого кола складатиме 0,2128 Ом, що при струмі випрямляча $I_d=532$ А, вимагає прикладення напруги від випрямляча 113 В. З іншого боку, під час проходження струму по загальному колу живлення, відповідно до зовнішньої характеристики випрямляча, виникають втрати напруги, які слід компенсувати подальшим зниженням кута управління тиристорами. Розрахунок за типовими методиками [9] параметрів зовнішньої характеристики для першої зони регулювання при живленні від трансформатора ОЦР-1000/25 (між виводами 0–3) та реактора СР-800, які використовуються на електропоїздах ЕР9М [4–6] показує, що втрата напруги на елементах кола струму, які впливають на нахил зовнішньої характеристики складає 72 В. Деталі типового розрахунку зовнішньої характеристики не приводимо. Загальна напруга, яку має забезпечити випрямляч з метою компенсації втрат та забезпечення режиму пуску складає 185 В.

З метою порівняння за необхідною потужністю тягового трансформатора розглянемо два

можливі варіанти перетворювача: класичний, в якому всі плечі виконано на основі тиристорів; пів керований, що показано на рисунку 1.

Повністю керований випрямляч, відповідно до базової теорії [7, 9, 11, 14, 16, 17], має середнє значення напруги на виході під час роботи на суттєве індуктивне навантаження

$$U_d \geq 0,9U_2 \cos \alpha. \quad (1)$$

Звідки необхідне значення кута управління тиристорами під час пуску

$$\alpha_{\text{пуск}} = \arccos \left(\frac{U_{d\text{пуск}}}{0,9U_2} \right), \quad (2)$$

де $U_{d\text{пуск}}$ – необхідне значення напруги пуску. Приймаємо необхідну напругу 185 В;

U_2 – діюче значення напруги вторинної обмотки трансформатора до якої приєднано випрямляч на першій зоні регулювання. Між виводами 0–3 це складає 552 В.

Коефіцієнт потужності випрямляча

$$\chi = v \cdot \cos \alpha_{\text{пуск}}, \quad (3)$$

v – коефіцієнт викривлень напруги. Для мостової схеми випрямлення 0,9.

Необхідна повна потужність трансформатора під час пуску

$$S_{\text{пуск}} = \frac{1,11P_{d\text{пуск}}}{\cos \alpha_{\text{пуск}}} = \frac{1,11U_{d\text{пуск}}I_d}{\cos \alpha_{\text{пуск}}}. \quad (4)$$

Необхідне значення кута управління складає 68 градусів електричних (1,189 рад), що приводить до коефіцієнту потужності 0,337 та необхідної потужності трансформатора під час пуску 291629 ВА.

Пів керований випрямляч дозволяє виразити для визначення регульовальної характеристики наблизити до виразу випрямляча з активним навантаженням [16, 17] та має середнє значення напруги на виході

$$U_d \geq 0,9U_2 \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right). \quad (5)$$

Звідки необхідне значення кута управління тиристорами під час пуску

$$\alpha_{\text{пуск}} = \arccos \left(\frac{2U_{d\text{пуск}}}{0,9U_2} - 1 \right). \quad (6)$$

Коефіцієнт потужності випрямляча

$$\chi = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi(\pi - \alpha)}} \cdot \frac{U_d}{U_d \alpha_0}, \quad (7)$$

$U_d \alpha_0$ – середнє значення напруги на виході випрямляча з мінімальним кутом управління зони регулювання. Приймаємо 9 градусів електричних.

Необхідна повна потужність трансформатора під час пуску

$$S_{\text{пуск}} = U_2 I_d \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}. \quad (8)$$

Необхідне значення кута управління у випадку пів керованої схеми випрямлення збільшується та складає 105 градусів електричних (1,83 рад), значення коефіцієнта потужності 0,52 та необхідна потужність трансформатора під час пуску 189680 ВА.

Зрозуміло, що останні визначення необхідної потужності під час пуску дещо більші у порівнянні з некерованим випрямлячем для якого ця величина складає 109246 ВА при коефіцієнті потужності $\approx 0,9$ однак дозволяє зробити деякий вибір у напрямку модернізації.

Таким чином у порівнянні з некерованим випрямлячем необхідна потужність під час пуску для пів керованого більша у 1,73 рази, а керованого у 2,66 рази. Для обох випадків потужності вторинної обмотки, що виділена для забезпечення режиму тяги 773 кВА [5, 6] цілком достатньо. Резерв потужності трансформатора пояснюється специфікою основної схеми випрямляча електропоїзда, де використовується схема амплітудного регулювання напруги з несиметричним навантаженням трансформатора під час роботи на непарних позиціях регулювання [4, 7].

На думку авторів все ж таки слід віддати перевагу до схеми пів керованої. Більш проста схема керування з не складним алгоритмом управління тиристорами у порівнянні з класичною схемою з чотирьох зон, що використовуються на електровозах [11, 12, 16]. Для електропоїзда, якому залишилось працювати 10–15 років це за сіб деякої економії коштів під час експлуатації за рахунок використання майже всіх переваг безконтактних систем керування електрорухомого складу крім рекуперативного гальмування.

Висновки

1. Актуальна проблема залізниць України у напрямку забезпечення приміських пасажирських перевезень на залізницях, що електрифіковано змінним струмом може бути частково

вирішена за рахунок модернізації електропоїздів виробництва Ризького вагонобудівного заводу, які ще в значній кількості знаходяться в експлуатації.

2. Проведений аналіз тягових статичних перетворювачів електропоїздів змінного струму показує, що в різні роки в електропоїздах серії ЭР9 впроваджувалися декілька типів випрямних блоків на основі мостової некерованої схеми. На даному етапі розвитку напівпровідникової техніки доцільно впровадження керованих випрямлячів з метою підвищення експлуатаційних показників електропоїздів серії.

3. Результати аналізу сучасної елементної бази та умов експлуатації електропоїздів вказує на можливість впровадження пів керованої чотирьох зонної схеми випрямлення та наявність необхідних напівпровідникових елементів для забезпечення струму та напруги плеч з малою кількістю елементів при збереженні існуючої схеми з'єднання тягових двигунів.

4. Порівняння схем випрямлячів за умовою забезпечення потужності під час пуску з низьким коефіцієнтом пускової потужності дає перевагу також до пів керованої схеми випрямлення у якої необхідна пускова потужність складає 0,65 від потужності пуску повністю керованої схеми та більший коефіцієнт потужності у 1,54 рази. Останнє дозволяє мати більший запас потужності у разі перевантажень.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Белухин, Д. С. Модернизация выпрямительных преобразователей электропоездов серии ЭР9 [Текст] / Д. С. Белухин // Электрификация транспорта «ТРАНСЕЛЕКТРО – 2018»: Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції. (Дніпро, 06–07.12.2018 р.). Збірник тез доповідей. – Д.: ДНУЗТ, 2018. – С. 5-6.
2. Модернізація моторвагонного рухомого складу. Приватне акціонерне товариство «Київський електровагоноремонтний завод» [Електрон. ресурс] Режим доступу: <http://kevrz.com.ua/index.php/ua/prozavod/produkcija/modernizaciya-motorvagonnogo-ruhomogo-skladu>.
3. Набока, О. В. Повышение энергоэффективности питания вспомогательных электроприводов электропоездов ЭД9М [Текст] / О. В. Набока, П. Д. Андриенко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. : Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика: зб. наук. пр. – Харків : НТУ «ХПІ», 2019. – № 16. – С. 80-84.
4. Авдеев, М. М. Электропоезда переменного тока [Текст] / М. М. Авдеев, В. А. Гут, В. И. Томчук, В. А. Хряев. – М.: Транспорт, 1985. – 368 с.
5. Гут, В. А. Преобразовательные устройства электропоездов переменного тока [Текст] / В. А. Гут. –

М.: Маршрут, 2006. – 54 с.

6. Электропоезд ЭР9М. Руководство по эксплуатации. Книга 1 [Текст] / отв. за выпуск Рожкова В. Г. – Р.: РВЗ, 1977. – 476 с.

7. Статичні перетворювачі тягового рухомого складу. Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко та ін. – Х.: НТУ «ХП», 2007. – 192 с.

8. Басов, Г. Г. Развитие электричного моторвагонного рухомого складу [Текст] / Г. Г. Басов, С. І. Яцько. – Харків: Аспект, 2005. – 248 с.

9. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги [Текст]: монография: в 2 т. / Г. К. Гетьман – Дн-вск: Изд-во Маковецкий, 2011. Т. 1. – 456 с.

10. Мельниченко, О. В. Анализ применения преобразователей в силовых схемах отечественного моторвагонного подвижного состава переменного тока [Текст] / О. В. Мельниченко, В. С. Иванов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22. № 4. С. 231–242.

11. Власьевский, С. В. Повышение эффективности работы электровоза переменного тока с плавным регулированием напряжения в режимах тяги и рекуперативного торможения [Текст] / С. В. Власьевский, В. Г. Скорик, Е. В. Буяева, Д. С. Фокин // Электрификация транспорта. Научный журнал. – 2011. – № 1. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2011. – С. 30–34.

12. Богинский, С. А. Повышение коэффициента мощности электровозов переменного тока за счет

новой организации сетевой коммутации плеч выпрямительно-инверторного преобразователя [Текст] / С. А. Богинский, О. В. Мельниченко, А. О. Линьков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 166–177.

13. Абрамович, М. И. Диоды и тиристоры в преобразовательных установках [Текст] / М. И. Абрамович, В. М. Бабайлов, В. Е. Либбер и др. – М.: Энергоатомиздат, 1992. —432 с.

14. Уильямс Б. Силовая электроника: приборы, применение, управление [Текст]: Справ. пособие: пер. с англ. / Б. Уильямс М.: Энергоатомиздат, 1993. – 240 с.

15. Воронин, П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение [Текст] / П. А. Воронин – М.: Издательский дом Додэка-XXI, 2005. – 384 с.

16. Кулинич, Ю. М. Электронная и преобразовательная техника [Текст]: учеб. пособие для вузов / Ю. М. Кулинич. – Хабаровск: ДВГУПС, 2008. – 175 с.

17. Засорин, С. Н. Электроника и преобразовательная техника [Текст] / С. Н. Засорин, В. А. Мицкевич, К. Г. Кучма. – Москва : Транспорт, 1981. – 319 с.

Надійшла до редколегії 08.05.2023.

Прийнята до друку 12.05.2023.

D. BELUKHIN, V. VASYLYEV, A. AFANASOV

POWER STATIC CONVERTER OF TRACTION ELECTRIC DRIVE OF AC ELECTRIC TRAINS

Purpose. Increasing the operational indicators of suburban transportation on railways electrified by alternating current due to the modernization of traction static converters of ER9M electric trains. **Methodology.** The methodological basis of the study is the general theoretical provisions and principles of the system approach of theoretical electrical engineering, the theory of power converters. The main principles of construction of traction static converters of electric rolling stock of railways are used. **Findings.** The analysis of the basic rectification schemes of alternating current electric trains was performed. As an alternative scheme, it is proposed to introduce a controlled rectification scheme based on a four-zone rectification scheme, which is similar to electric locomotives, which allows using most of the known advantages of non-contact traction electric drive control systems. Some energy figures are calculated for the fully controlled and semi-controlled circuit. As a result of the comparison, the modernization option based on a semi-controlled rectification scheme was selected. The required values of starting power of the transformer and power factors for schemes with uncontrolled, fully controlled and semi-controlled rectifiers are determined. A selection of modern semiconductor elements is offered for the configuration of converters. It was shown that in the case of modernization of the rectifier scheme, there is no need for significant capital investments due to the preservation of the main traction transformer and traction motors of the electric train. **Practical value.** The obtained results can be used by enterprises that carry out major repairs of alternating current electric trains.

Keywords: electric train, traction transformer, rectifier, power factor.