Збірник наукових праць. Вип. 27. 2024 р.

УДК 629.423

Д. С. БІЛУХІН[1]*, В. Є. ВАСИЛЬЄВ[2]*

[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

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ КІЛ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мета. Метою даної роботи є аналіз можливих напрямків підвищення експлуатаційних показників електрорухомого складу залізниць постійного струму. Саме робота присвячена вдосконаленню систем автоматичного регулювання напруги низьковольтних кіл де джерелом живлення є генератор постійного струму. Кількість електровозів та електропоїздів залізниць та його вузлів, які вичерпали термін експлуатації, але ще тривалий термін будуть знаходитися в експлуатації, зберігає актуальність досліджень можливих напрямків модернізації та специфіки роботи систем. **Методи.** В роботі застосовано аналіз та узагальнення раніше виконаних досліджень. Методологічною основою дослідження є математичні апарати теорії автоматичного керування та теорії надійності. Об'єктом дослідження є процес функціонування низьковольтних кіл управління електрорухомого складу залізниць постійного струму з генераторами постійного струму у якості джерела енергії. Предметом дослідження є регулятор напруги власних потреб на основі сучасної елементної бази. **Результати.** Пропонується варіант системи автоматичного регулювання напруги низьковольтних кіл з генераторними джерелами живлення для електрорухомого складу постійного струму. Основою системи є вузол регулювання напруги, який у існуючого складу виконано на основі вугільного вібраційного регулятора напруги. Як альтернатива пропонується система на основі операційних підсилювачів та використанням пропорційних або пропорційне-інтегральних законів регулятора у структурі. Моделювання динамічних процесів вказує на структурну стійкість системи та якісні перехідні процеси. Порівняння показників безвідмовності вузлів вказує на можливе збільшення термінів між обслуговуваннями та економію коштів. Порівняння виконано для систем які довготривало знаходяться в експлуатації та тих, що пропонуються. **Наукова новизна.** Пропонується впровадження вузла системи автоматичного регулювання напруги на сучасній елементній базі, що дозволяє покращити показники надійності системи та впровадити малу, економну, модернізацію рухомого складу залізниць з вичерпаним терміном експлуатації. **Практична значимість.** Одержані результати можуть бути використані підприємствами, які виконують капітальний ремонт електропоїздів та електровозів постійного струму з продовженням термінів експлуатації. Впровадження блоків, що пропонується, дає можливість виконати заміну діючих, основаних на контактних релейних системах із швидким зносом контактів, частим обслуговуванням та налагодженням. В результаті нові блоки можна перевести на обслуговування під час поточних ремонтів за рахунок впровадження безконтактних систем та збільшення вірогідності безвідмовної роботи та задіяти персонал, який завжди є в локомотивних депо. Це знижує собівартість обслуговування за рахунок впровадження сучасної елементної бази та виключення з технологічного процесу технічних обслуговувань існуючих блоків.

Ключові слова: електровоз, електропоїзд, регулятор, стійкість, надійність.

Вступ

Для споживачів послуг залізничного транспорту та фахівців, які задіяно в наданні цих послуг, завжди цікаво знати перспективи оновлення локомотивного та моторвагонного парку, який забезпечує перевезення вантажів та пасажирів. Для Укрзалізниці це є дуже актуальною задачею, яка поступово вирішується та має, на жаль, тривалий термін.

Розглянемо стан кількості електровозів та електропоїздів, які знаходяться в експлуатації залізниць, що електрифіковано постійним струмом. Дійсно, якщо аналізувати надходження нових електровозів постійного струму до Придніпровської залізниці з 1993 по 2017 рік – 89 одиниць [1], що складає надходження 3,7 електровозів на рік. Загальний баланс – 468 вантажних електровозів. Якщо не збільшити темпи придбання нових електровозів то не важко здогадатися, що заміна може тривати ще не одне десятиріччя. Такий самий стан і з електропоїздами постійного струму [2]. На 2016 рік в експлуатації залізниць знаходилося 193 електропоїзди постійного струму. Надходження 1991-2016 роки –

doi: 10.15802/tstt2024/307378
© Білухін Д. С., Васильєв В. Є., 2024

51, тобто 3,2 електропоїзда на рік. Крім того, випуск таких електровозів як ДЕ1, 2ЕЛ4 та електропоїздів ЕПЛ2Т призупинено давно і нових альтернатив не передбачається. Надходження ВЛ11М6 поки призупинено. Зрозуміло, що різні проекти є, але вони ще не надходять до залізниць, а у зв'язку з тяжким економічним станом держави відбудуться не швидко. Тому єдиним напрямком продовження експлуатації електровозів та електропоїздів є якісний ремонт та модернізація.

Як показали досліди, що проведено у роботі [3, с. 4-5], підвищення експлуатаційних показників шляхом модернізації крупних вузлів зі значними капітальними витратами для залізниць може бути не прийнятна. Але незначні витрати з модернізацією для одиниць яким залишилось знаходитися в експлуатації два, три ремонтні цикли, все ж таки можлива. Можна це назвати малою модернізацією, яка може бути порівняна за вкладенням з ремонтом або заміною типових блоків, але давати подальшу економію коштів під час експлуатації шляхом підвищення показників надійності [4, с. 79].

Постановка завдання дослідження

Декілька років тому розглядалася достатньо цікава пропозиція щодо заміни вуглецевих регуляторів напруги для електрорухомого складу залізниць постійного струму, де джерелом енергії низьковольтних кіл є генератори постійного струму [4, с. 76; 5, с. 63; 6, с. 214; 7, с. 59; 8, с. 8; 9, с. 6]. На той момент ще знаходилися в експлуатації більш 500 електровозів ВЛ8 та більш 200 електропоїздів ЭР1 та ЭР2. На даний час їх залишилося удвічі менше, але виходячи з темпів оновлення ця ідея ще може бути задіяна саме у напрямку малих модернізацій. Ця низка статей доказує доцільність впровадження сучасної системи регулювання напруги низьковольтних кіл на основі напівпровідникових елементів. За основу вибрана система на основі мікроконтролера та біполярного транзистора з ізольованим затвором.

Застосування мікроконтролерів є дійсно суттєвою новацією, але має деякі сумніви. В роботі [5, с. 64-65] детально складено структурна схема системи автоматичного регулювання напруги, що дозволяє оцінити динамічні процеси джерел живлення електрорухомого складу залізниць з генераторами постійного струму, використовуючи математичний апарат теорії автоматичного управління при зміні постійної часу навантаження. Показано знаходження параметрів навантаження в широких межах не лише з боку струму, а і індуктивної складової. Подальшим розвитком є роботи [6, с. 215-216; 7, с. 61; 8, с. 69-71], де з використанням складеної моделі виконується детальний аналіз режиму автоколивань у системі при різних характеристиках регулятора – ідеальна релейна, релейна з гістерезисом. Показано, що режим автоколивань є робочим у даній системі, тобто система має типовий спосіб регулювання за ковзанням. Аналіз використання різних типів регуляторів призначено з метою обмеження амплітуд автоколивань в припустимих межах та частоти. Причиною є суттєва зміна параметрів навантаження. В роботі [8, с. 71] запропоновано введення в структуру системи регулювання аперіодичної ланки першого порядку, що дозволяє суттєво розширити межі стійкої роботи системи, зменшити амплітуди автоколивань та мати прийнятні частоти роботи вихідного вузла.

При впровадженні такої системи показана можливість її роботи протягом двох ремонтних циклів, що суттєво знижує експлуатаційні витрати у порівнянні з існуючими, вуглецевими регуляторами напруги [4, с. 78-79].

Однак на цей час є деякі обмеження у впровадженні такої системи. Насамперед, це експлуатація таких електровозів та електропоїздів не більш двох-трьох ремонтних циклів. Впровадження систем на мікроконтролерах вимагає до залучення в депо спеціалістів з обслуговування такої техніки і відповідно їх підготовки. Причому виправдане це буде у разі значної заміни блоків та наявності обсягу робіт для фахівців тривалий час. Тому доцільно розглянути питання про заміну блоків не на основі схем з мікроконтролерами, а на звичайних напівпровідникових елементах, які працюють з використанням типових лінійних законів регулювання. В такому випадку переваги статичних перетворювачів буде збережено. Схеми можна виконувати на основі звичайних транзисторів та операційних підсилювачів. В будь якому локомотивному депо є завжди фахівці з обслуговування аналогічних пристроїв, оскільки бортові радіостанції виконано саме на такій основі. Залишається лише визначити структуру схеми, умови її стійкої роботи, порівняти показники надійності систем. Останнє дає можливість виключити з програми технічних обслуговувань заміни вуглецевих контактів та налагодження вузлів керування напругою.

Матеріал і результати досліджень

Структурна схема регулятора напруги.
Частково система з лінійними законами

регулювання розглядалась у роботі [9, с. 8]. Було доказано стійкість системи з пропорційним регулятором без аналізу можливих показників надійності такої системи. Крім того, загальне відомо, що системи з пропорційним регулятором мають статичну помилку під час регулювання [10, с. 162-168; 11, с. 281-289]. Тому більш цікава лінійна система з пропорційне-інтегральним (ПІ) регулятором, яка саме виключає цей недолік.

Оскільки математична модель системи, що розглядається є відомою [7, с. 60], то виконуємо заміну динамічної ланки, що представляє регулятор у вигляді релейного елемента [5, с. 65; 6, с. 214; 7, с. 61; 8, с. 68] або лінійний елемент з пропорційним регулятором [9, с. 8] на динамічну ланку, характерну пропорційне-інтегральному регулятору. Структурна схема системи автоматичного регулювання напруги (САРН) для такого випадку показана на рисунку 1.

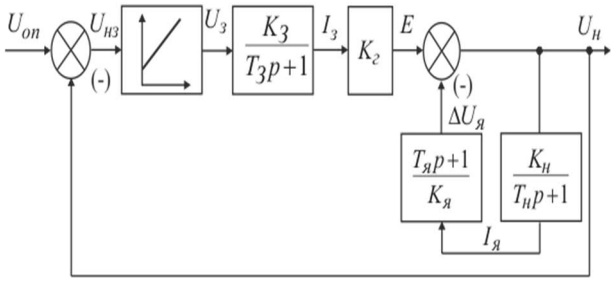

Рис. 1 Структурна схема САРН з ПІ-регулятором

У структурі, що подано на рисунку 1 прийнято такі позначення: $K_з$ – коефіцієнт передачі обмотки збудження; $K_я$ – коефіцієнт передачі обмотки якоря; $K_н$ – коефіцієнт передачі кола навантаження; $T_я$ – постійна часу кола обмотки якоря; $T_з$ – постійна часу кола обмотки збудження; $T_н$ – постійна часу кола навантаження; $U_{оп}$ – опорна напруга; $U_{нз}$ – напруга неузгодженості; $U_з$ – напруга збудження; $I_з$ – струм збудження; E – електрорухома сила генератора; напруга на навантаженні; $I_я$ – струм якоря; $\Delta U_я$ – втрати напруги в колах якоря.

Розімкнена передатна функція САРН з ПІ-регулятором [9, с. 11]

$$W_{\text{р}}^{\text{ПІ}}(p)=\frac{b_{01}p+b_{11}}{a_{01}p^3+a_{11}p^2+a_{21}p} \qquad (1)$$

де прийнято коефіцієнти

$$\begin{aligned} b_{01} &= K_г K_я K_з (T_н T_{\text{І}} K_{\text{П}} + T_{\text{І}} K_{\text{П}} + T_н), \\ b_{11} &= K_г K_я K_з, \\ a_{01} &= T_{\text{І}} T_з (K_я T_н + K_н T_я), \\ a_{11} &= T_{\text{І}} (K_я T_н + K_н T_я + T_з (K_я + K_н)), \\ a_{21} &= T_{\text{І}} (K_я + K_н). \end{aligned} \qquad (2)$$

Комплексний коефіцієнт передачі системи з ПІ-регулятором

$$W_{\text{р}}^{\text{ПІ}}(j\omega)=\frac{b_{11}+j\omega b_{01}}{-a_{11}\omega^2+j\left(a_{21}\omega-a_{01}\omega^3\right)}, \qquad (3)$$

На рисунку 2 представлено годограф САРН з ПІ-регулятором. Годограф побудовано для параметрів кіл управління електровоза ВЛ8 з генератором ДК-405К [5, с. 67–68; 6, с. 214, 216]. Коефіцієнт підсилення пропорційної ланки прийнято рівним 200, що співпадає з коефіцієнтом підсилення пропорційної ланки з роботи [9, с. 10], а стала часу прийнята 0,01 с. Оскільки амплітудне-фазова характеристика не охоплює точку координатної площини (-1; j0), що є умовою стійкості за критерієм Найквиста [10, с. 285], то систему можна вважати стійкою.

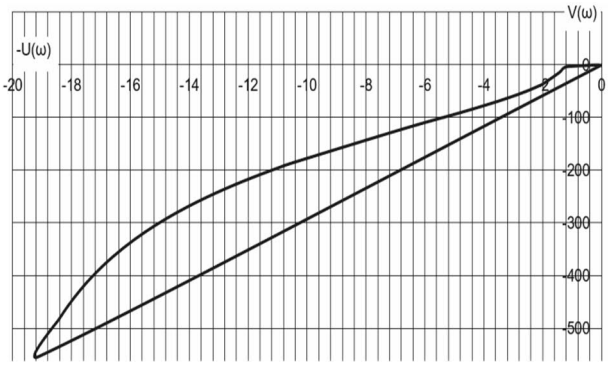

Рис. 2 Годограф САРН з ПІ-регулятором

Крім виконання умов стійкості слід переконатися ще й і виконанні якісних показників перехідного процесу. А під час роботи системи управління електровоза, чи електропоїзда параметри кіл управління суттєво змінюються [5, с. 68]. Тому на рисунку 3 представлено результати моделювання перехідних процесів у разі одиничного впливу. Для порівняння попередніх результатів [9, с. 10] на рисунку показано крива перехідного процесу у разі використання П-регулятора (крива 1) та ПІ-регулятора (крива 2). Моделювання здійснено у програмі Simulink.

Порівняння перехідних процесів (рис. 3) для систем з пропорційним та пропорційне-інтегральними регуляторами вказує на прийнятну якість систем. Відсутнє будь-яке пере регулювання та наявність коливального процесу. У разі ПІ-регулятора процес встановлення заданого параметру більш довготривалий (майже у 4 рази). Однак відсутність статизму дає перевагу використанню ПІ-регулятора.

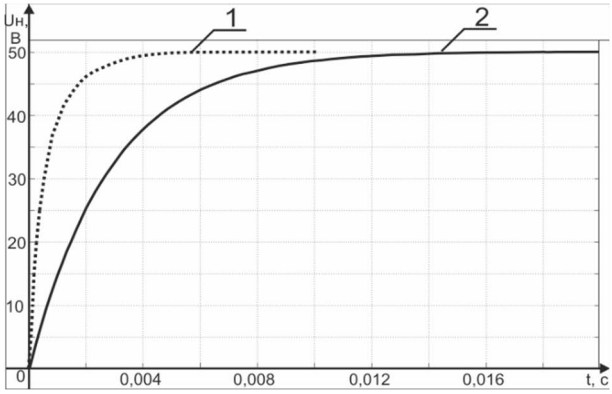

Рис. 3 Перехідний процес з П- та ПІ-регулятором

Аналіз надійності системи.

Аналіз динамічний властивостей системи автоматичного регулювання напруги генераторних джерел живлення електрорухомого складу залізниць постійного струму з лінійними регуляторами показав можливість використання такої системи. Рішення приймати потенційним замовникам, тобто експлуатантам вказаного рухомого складу. При зацікавленості можна проводити більш розширений аналіз системи. Але одним з суттєвих факторів залишається вірогідність безвідмовної роботи нової системи у порівнянні з тими, що знаходяться в експлуатації. Це суттєво впливає на подальшу експлуатації нової системи та кошти на її утримання.

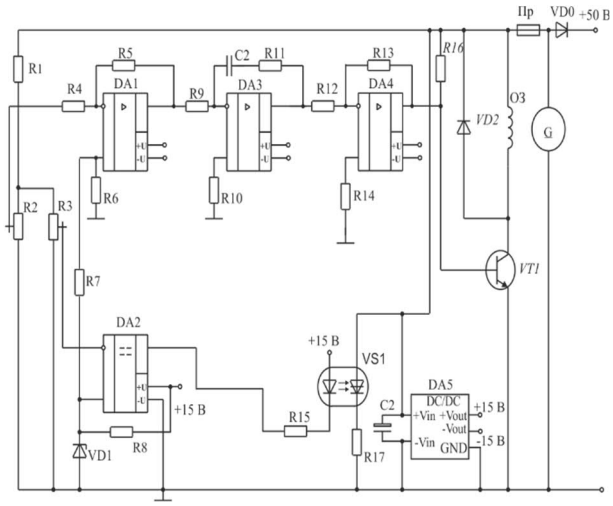

Рис. 4 Варіант принципової схеми

Один з можливих варіантів принципової схеми на основі ПІ-регулятора представлено на рисунку 4. Як вказувалося раніш, у локомотивних депо завжди є фахівці з обслуговування апаратури на основі операційних підсилювачів, тому за базову основу прийнято саме ці елементи. Крім операційних підсилювачів DA1, DA3, DA4, які виконують основну функцію системи управління з метою плавної зміни струму через біполярний транзистор VT1 до схеми додано ще елементи захисту DA2, VS1, мікросхема формування біполярної напруги для живлення операційних підсилювачів від бортової мережі DA5.

З метою порівняння досліджень, які проводилися раніш [4, с. 79], визначаємо показники надійності методом середньо групової інтенсивності відмов. За цим методом є дані для вугільного регулятора напруги типу СРН-8 та розрахункові для системи регулювання на основі мікроконтролера.

Інтенсивність відмови системи, яка складається з m елементів визначаємо [4, с. 75–77]

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{m} \lambda_i \cdot k_i \,, \qquad (4)$$

де λ_i – інтенсивність відмов i-го елемента;

k_i – коефіцієнт, що враховує умови роботи i-го елемента системи.

Таблиця 1

Розрахунок інтенсивності відмов вузла управління

Позиційне позначення	Кількість n	$k_i \cdot 10^{-3}$	λ_i, 10^{-6} год$^{-1}$	$k_i \cdot \lambda_i \cdot n$, 10^{-9} год$^{-1}$
VD1	1	80	0,2	16
VD2	1	80	0,2	16
DA1-DA5	5	300	0,1	150
VS1	1	800	0,4	320
C1, C2	2	500	0,13	130
R1	1	10	0,04	4
R2, R3	2	500	0,1	100
R4-R15	12	100	0,04	48
R16	1	400	0,04	16
R17	1	50	0,04	2
VT1	1	300	0.5	150
Паяних з’єднань	133	500	0,1	6650
Сумарна інтенсивність відмов без урахування паяних з’єднань				952
Сумарна інтенсивність відмов з урахуванням паяних з’єднань				7602

Напрацювання до відмови системи, яка складається з m елементів

$$T_{\text{відм}} = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}}, \qquad (5)$$

У таблиці 1 подано результати розрахунку показників надійності схеми, що пропонується з врахуванням середніх значень інтенсивності відмов типових елементів електронних схем [12, с. 328–336].

З метою порівняння показників, на рисунку 5 будуємо графік розподілу вірогідності безвідмовної роботи вузлів управління напругою

відповідно до експоненціального закону розподілу безвідмовної роботи

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (6)$$

На рисунку 5 крім розподілу вірогідності безвідмовної роботи вузла управління з ПІ-регулятором (крива 1) подано ще відомі [4, с. 78] розподіли для вузла типу СРН-8 (крива 2) та на основі мікроконтролера (крива 3).

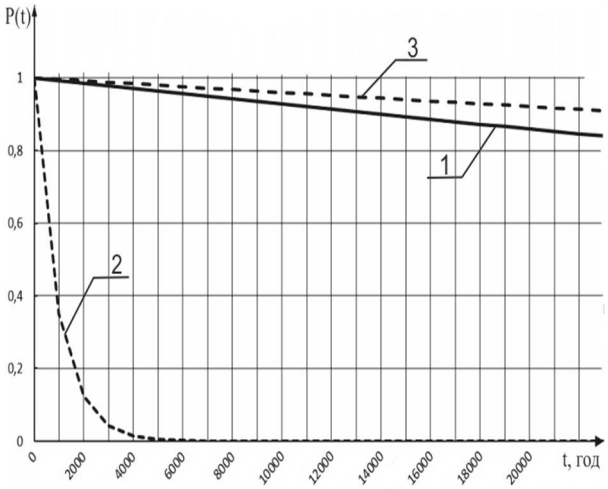

Рис. 5 Графіки розподілу вірогідності безвідмовної роботи вузлів керування САРН

Таблиця 2

Порівняння показників безвідмовності вузлів керування напруги низьковольтних кіл

Тип вузла	λ_i, 10^{-6} год$^{-1}$	$T_{відм}$, год.	P(t), через 22995 год.	Термін для ТО-3, год.
СРН–8	1050	952	$3{,}26 \cdot 10^{-11}$	45
Мікроконтролер	4,136	241779	0,909	11424
ПІ-регулятор	7,602	131544	0,839	6194

Графіки розподілу вірогідності безвідмовної показують, що регулятор напруги на основі звичайних операційних підсилювачів з використанням лінійних законів регулювання знаходиться достатньо близько до системи на основі мікроконтролера. У таблиці 2 подано порівняння показників безвідмовності САРН для яких було проведено дослідження [4, с. 78] та для лінійного ПІ-регулятора через 7 років експлуатації (22995 годин), тобто між капітальними ремонтами.

У таблиці 2 термін можливого технічного обслуговування обсягом ТО-3 визначено виходячи з того, що вугільні вузли проходять ТО-3 через 45 годин [4, с. 79], досягаючи вірогідності безвідмовної роботи 0,954. Відповідного рівня вузли з ПІ-регулятором досягають через 6194 години, що за термінами близько до поточних ремонтів за обсягом ПР-3. Останнє дає економію коштів на утримання рухомого складу у частині обслуговування вузлів систем автоматичного регулювання напруги.

Висновки

1. Значна кількість електровозів та електропоїздів, які відпрацювали ресурс будуть ще декілька ремонтних циклів знаходитися в експлуатації залізниць постійного струму. Єдиний шлях зберігання їх у справному стані це якісний ремонт і модернізація.

2. У напрямку модернізації доцільними залишаються досліди з заміни електромеханічних вузлів регулювання напруги низьковольтних кіл на системи регулювання напруги безконтактні, з меншими експлуатаційними витратами.

3. Досліди структурної схеми системи автоматичного регулювання напруги з ПІ-регулятором підтвердили можливість забезпечення цією системою динамічної стійкості при можливих обуреннях та її побудову.

4. Порівняння показників безвідмовності вузлів керування напруги низьковольтних кіл вказує на можливість виключення системи на сучасній елементній базі з програми технічних обслуговувань ТО-3 та виконання таких робіт під час деповських ремонтів обсягу ПР2. Причому таке обслуговування полягає у простих технологічних операціях без замін деталей, що зношуються.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. День железнодорожника: сколько локомотивов у "Укрзализныци" и каких (инфографика) | Пасажирський Транспорт. *Пассажирский Транспорт.* URL: https://traffic.od.ua/news/railua/1197849 (дата звернення: 22.04.2024).

2. Сколько в Украине электричек, дизель-поездов и рельсобусов (ФОТО, инфографика) | Одеський Кур'єр. *Одесский Курьер.* URL: https://uc.od.ua/790/1184009?PHPSESSID=vf680i805ebets9g1rni5fl690 (дата звернення: 22.04.2024).

3. Білухін Д. С., Васильєв В. Є., Афанасов А. М. Силовий статичний перетворювач тягового електроприводу електропоїздів змінного струму. *Транспортні системи та технології перевезень.* 2023. № 25. С. 4–9.

4. Белухин Д. С. Повышение надежности систем автоматического регулирования напряжения электроподвижного состава. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.* 2012. № 41.

С. 75–80.

5. Білухін Д. С. Структурна схема системи автоматичного регулювання напруги електрорухомого складу заліз-ниць з генераторами постійного струму. *Науково-технічний збірник Гірнича електромеханіка та автоматика*. 2007. № 78. С. 63–68.

6. Білухін Д. С. Динамічні властивості джерел живлення електрорухомого складу з генераторами постійного струму. *Збірник наукових праць дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). тематичний випуск «проблеми автоматизованого електропривода. теорія й практика»*. 2007. С. 214–216.

7. Білухін Д. С. Математична модель системи автоматичного регулювання напруги низьковольтних кіл електровоза. *Вісник дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.* 2011. № 37. С. 59–62.

8. Білухін Д. С. Отримання стійких автоколивань в системі автоматичного регулювання напруги низьковольтних кіл електровоза ВЛ8. *Вісник дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.* 2011. № 38. С. 68–72.

9. Білухін Д. С. Аналіз системи автоматичного регулювання на-пруги низьковольтних кіл електровоза ВЛ8 з лінійним регулятором. *Збірник наукових праць державного економіко-технологічного університету транспорту міністерства освіти і науки, молоді та спорту України: серія «транспортні системи і технології»*. 2012. № 20. С. 6–13.

10. Филлипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. Москва : Лаборатория Базовых знан., 2001. 616 с.

11. Топчеев Ю. И., Цыпляков А. П. Задачник по теории автоматического регулирова-ния. Москва : Машиностроение, 1977. 592 с.

12. Сборник задач по теории надежности / ред.: А. М. Половко, И. М. Маликов. Москва : Советское радио, 1972. 408 с.

Стаття рекомендована до публікації

Надійшла до редколегії 21.03.2024
Прийнята до друку 25.05.2024

D. BELUKHIN, V. VASYLYEV

INCREASING THE RELIABILITY OF THE SYSTEM OF AUTOMATIC VOLTAGE REGULATION OF LOW-VOLTAGE CIRCUITS OF ELECTRICAL DIRECT CURRENT MOVEMENT COMPONENTS

Purpose. The purpose of this work is the analysis of possible directions for improving the performance indicators of electric rolling stock of direct current railways. The work is devoted to the improvement of systems of automatic voltage regulation of low-voltage circuits where the power source is a direct current generator. The number of electric locomotives and electric trains of railways and their units, which have exhausted their service life, but will be in service for a long time, preserves the relevance of research into possible directions of modernization and the specifics of system operation. **Methodology.** The work uses the analysis and generalization of previously performed research. The methodological basis of the research is the mathematical apparatus of the theory of automatic control and the theory of reliability. The object of research is the process of functioning of low-voltage control circuits of electric rolling stock of direct current railways with direct current generators as an energy source. The subject of the study is a voltage regulator for own needs based on a modern element base. **Findings.** A variant of the system of automatic voltage regulation of low-voltage circuits with generator power sources for electric rolling stock of direct current is offered. The basis of the system is the voltage regulation node, which in the existing structure is made on the basis of a carbon vibration regulator on a strip. As an alternative, a system based on operational amplifiers and the use of proportional or proportional-integral laws of the regulator in the structure is proposed. Modeling of dynamic processes indicates the structural stability of the system and qualitative transition processes. A comparison of the no-failure indicators of the nodes indicates a possible increase in terms between services and cost savings. The comparison is made for systems that are in operation for a long time and those that are offered. **Originality.** It is proposed to implement the node of the system of automatic voltage regulation on a modern elemental basis, which allows to improve the reliability of the system and implement a small, economical, modernization of rolling stock of railways with an exhausted service life. **Practical value.** The obtained results can be used by enterprises that carry out major repairs of electric trains and direct current electric locomotives with extended service life. The implementation of the proposed units makes it possible to replace existing contact-based relay systems with fast contact wear, frequent maintenance and debugging. As a result, new units can be transferred to service during current repairs due to the introduction of non-contact systems and increase the probability of trouble-free operation and use the personnel who are always present in locomotive depots. This reduces the cost of maintenance due to the introduction of a modern element base and exclusion from the technological process of maintenance of existing units.

Keywords: electric locomotive, electric train, regulator, stability, reliability.