

Кандидати техн. наук БОНДАРЕНКО В.В., ВІЗНЯК Р.І., СКУРІХІН Д.І.,
Д-Р ТЕХН. НАУК РАВЛЮК В.Г.,
СТУД. БОНДАРЕНКО С.В.
(Український державний університет залізничного транспорту)



Теоретичні основи оцінювання проєктної надійності електронної апаратури пасажирських вагонів

Анотація. Авторами статті розроблено методику оцінювання проєктної надійності електронної апаратури пасажирських вагонів. За її допомогою проведено дослідження проєктної надійності найбільш важливих електронних блоків пасажирського вагона – регулятора напруги генератора, блока реле частоти, блока регулювання заряду акумуляторної батареї та блока захисту. Ця методика є універсальною, ураховує експлуатаційні коефіцієнти електронного обладнання та може бути використана для оцінювання надійності електронної апаратури не тільки вагонів локомотивної тяги, але й іншого рухомого складу залізниць. Запропоновано технологію діагностування електрообладнання вагона, що враховує отримані розрахунком показники надійності електронних блоків вагона та визначає послідовність діагностування електронної апаратури.

Ключові слова: пасажирський вагон, електричне та електронне обладнання, електронні блоки, надійність електронних блоків, показники надійності, інтенсивність відмов, діагностика.

Вступ

Сучасний суцільнометалевий пасажирський вагон є складною інженерною конструкцією, що містить комплекс механічних, електричних та електронних систем. Безвідмовна робота електричного та електронного обладнання пасажирських вагонів залежить від ефективності конструкції комплексу електрообладнання і системи його технічного обслуговування та ремонту. Постійне удосконалення електрообладнання пасажирських вагонів, пов'язане з підвищенням безпеки руху та комфортних умов пасажирів, призвело до створення складних електронних пристроїв автоматичного керування, контролю та захисту. У зв'язку з цим виникає необхідність оцінювання показників надійності електронної апаратури, що дає змогу розробляти заходи, спрямовані на її підвищення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Як відомо, останнім часом на залізничному транспорті України однією з важливих є проблема надійності пасажирських вагонів. Ураховуючи дію воєнного стану та складну економічну ситуацію у країні, фінансування на придбання нових пасажирських вагонів для залізниць України значно зменшилося.

У результаті цього, за даними останніх досліджень, знос пасажирських вагонів інвентарного парку АТ «Укрзалізниця» становить 93,1 %. Його старіння триває швидкісними темпами і не компенсується надходженням нових вагонів. Найбільше відпрацювали нормативний строк служби вагони відкритого типу (плацкартні) – їх близько 32,96 % [1]. Ураховуючи незадовільний стан парку пасажирських вагонів, у роботі наведено результати досліджень, спрямованих саме на підвищення їхньої надійності. Основна частка досліджень присвячена дослідженню проєктної надійності електронної апаратури (електронних блоків) комплексу електрообладнання пасажирського вагона та використанню результатів розрахунку для удосконалення технології діагностування електрообладнання вагонів. Використання результатів досліджень, за нашими оцінками, дасть змогу підвищити надійність і готовність вагонів в експлуатації.

Проблемам забезпечення надійності рухомого складу залізниць були присвячені роботи П. В. Шевченка, Е. Д. Тартаковського, В. Ф. Головка, І. Е. Мартинова, А. Б. Бабаніна, М. М. Соколова, В. В. Дурова та ін.

У роботі [2] розглянуто зв'язок між надійністю і безпечністю спеціалізованих комп'ютерних систем залізничної автоматики з

ретьним аналізом апаратних і програмних заходів підвищення безпеки компонентів і систем. Основну увагу приділено аналізу методів і засобів досягнення заданого рівня безпеки сучасних систем залізничної автоматики з електронними компонентами. Основний акцент зроблено на оцінювання надійності і безпеки наземної електронної апаратури. У свою чергу проблеми випробувань комплексів технічних засобів керування та регулювання руху поїздів на прикладі електронних реле розглянуті в роботі [3]. Проблемам підвищення надійності вагонів конструктивними методами присвячені роботи [4-7]. Водночас у цих роботах завдання надійності електронної апаратури пасажирських вагонів не розглядали.

Аналіз методик, використовуваних останнім часом для розрахунку надійності систем залізничної автоматики з електронними компонентами, наведений у роботі [8]. Зазначено, що випробування електронних виробів залізничної автоматики передбачає оцінювання показників їхньої функційної безпеки та надійності розрахунковим методом. Для цього застосовують галузеву «Методику доказу функційної безпеки мікроелектронних комплексів систем керування та регулювання руху поїздів». При цьому вказано, що не всі дані з методики можуть бути коректно застосовані в розрахунках вітчизняних розробників і дослідників, особливо в різних галузях. Був проведений порівняльний аналіз розрахункових формул і сформульовані висновки щодо адаптації співвідношень із

методики до вітчизняних вимог. Основні загальні поняття надійності визначені державними стандартами України [11-13].

Однак у наукових роботах і методиках, що наведені вище, не розглянуто розрахунок проектної надійності електронних блоків вагонів та особливості їхньої роботи з урахуванням експлуатаційних факторів. Експлуатаційні фактори, які впливають на надійність електронної апаратури вагонів, відрізняються від факторів, що впливають на стаціонарну шляхову наземну апаратуру керування, це потрібно також урахувати в розрахунках.

Мета дослідження.

Метою дослідження є розроблення методики розрахунку проектної надійності електронних блоків пасажирського вагона та перевірка її адекватності, застосування цієї методики та розрахованих показників надійності для діагностування електрообладнання пасажирського вагона.

Основна частина дослідження.

Електрообладнання сучасного пасажирського вагона є різноманітним і складним за своєю будовою. Існує багато різних комплексів електрообладнання вітчизняного та закордонного виробництва. На рис. 1 наведений пульт та електронні блоки одного з відомих комплексів електрообладнання ЭВ.10.02, що встановлені на багатьох пасажирських вагонах відкритого типу.

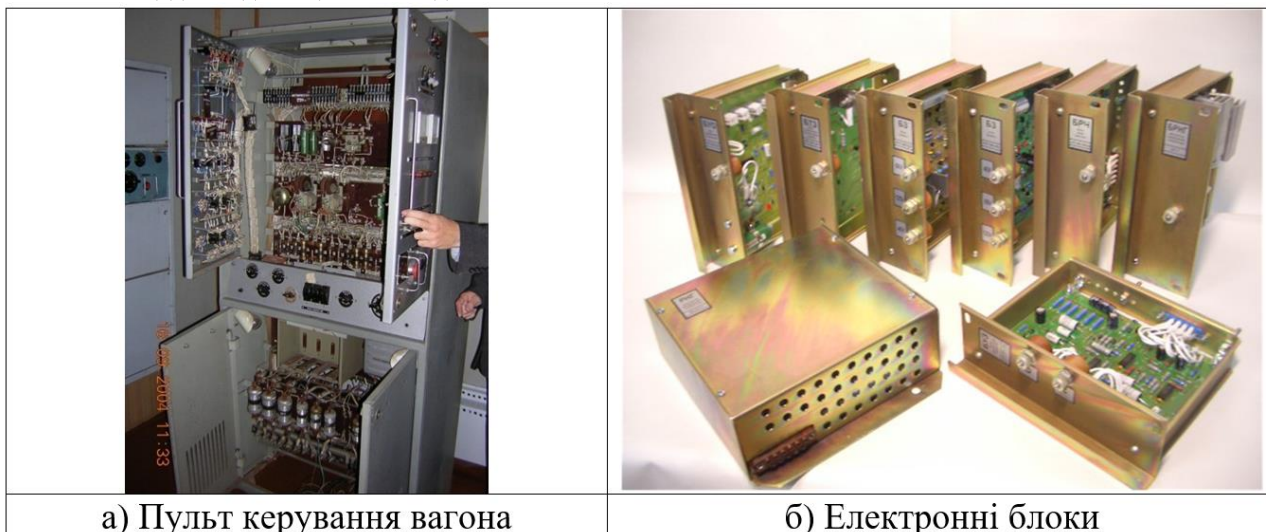


Рис. 1. Пульт керування (а) та електронні блоки (б) пасажирського вагона

Комплекси електрообладнання постійно оновлюють і вдосконалюють. На вітчизняних пасажирських вагонах прискореного руху використовують більш сучасні розподільні щити систем автоматизованого керування, контролю і діагностики (ШР САУКД), побудовані в

НПП «Хартрон-Експрес». Також проходять модернізацію комплекси ЭВ.10.02 і замінюються на ЭВН 10.003 для використання у складі некупеїного пасажирського залізничного вагона, які проходять капітальні види ремонту. Усі

системи електрообладнання, які використовують на залізницях України, подано на рис. 2 [9].

Система енергозабезпечення сучасних вагонів	Низьковольтні джерела електроенергії		Високовольтні джерела електроенергії
	Основне	Резервне	
Автономна (змішана) без кліматичної установки (U=50 В)	Генератор 8-12 кВт, 240-270 кг	Акумуляторна батарея 15 кВт*год, 650 кг	Високовольтна магістраль поїзда (для живлення комбінованого котла опалення)
Автономна (змішана) з кліматичною установкою (U=110 В)	Генератор 30-35 кВт, 700-900кг	Акумуляторна батарея 33-38 кВт*год, 1450 кг	
Централізована з кліматичною установкою	Статичний перетворювач 45 кВт, 1200 кг		Високовольтна магістраль поїзда (для живлення статичного перетворювача)

Рис. 2. Типові системи енергозабезпечення пасажирських вагонів

Тепер на залізницях України найбільш широко експлуатують пасажирські вагони без кондиціонування повітря з генератором змінного струму і номінальною напругою мережі $U = 50$ В, що мають комплекс електрообладнання ЭВ.10.02. Таких вагонів близько 62 %. За даними прес-служби АТ «Укрзалізниця», із 3100 вагонів, які використовують для пасажирських перевезень на залізницях України, лише 1168 обладнані кондиціонерами [10]. Тому далі розглянемо розрахунок надійності електронної апаратури такого комплексу електрообладнання.

Уся електронна апаратура вагона виконана за блоковим принципом і залежно від функціонального призначення поділена на такі основні блоки: блок захисту (БЗ), блок регулятора напруги генератора (БРНГ), блок реле частоти (БРЧ) і блок реле температури (БРТ). Інші електронні блоки мають другорядне значення в системі електрообладнання вагона. Тому оцінювали надійність вищевказаних чотирьох блоків.

З визначенням надійності електронних блоків необхідно розрізнити проектну надійність, тобто розраховану теоретично за даними інтенсивності відмов елементів, та експлуатаційну надійність для умов експлуатації вагона з урахуванням реальних режимів навантаження.

Дослідження експлуатаційної надійності електронної апаратури вагона пов'язані з великими труднощами, оскільки апаратура має порівняно невеликий відсоток відмов в експлуатації. У зв'язку з цим для оцінювання надійності потрібне проведення тривалих спостережень за сукупністю

вагонів в експлуатації. З огляду на вищевикладене, на першому етапі вважаємо за необхідне теоретично оцінити надійність електронних блоків, а надалі, за наявності статистики відмов блоків в експлуатації, порівняти проектну (розраховану теоретично) і експлуатаційну надійності. Це дасть змогу розробити рекомендації щодо її підвищення.

Електрообладнання пасажирського вагона являє собою постійно діючу апаратуру, яка відновлюється за результатами перевірок. У технічних умовах на комплекс електрообладнання ЭВ.10.02 вимоги до надійності такі:

- середній наробіток до відмови – не менше 610000 км;
- коефіцієнт готовності – не менше 0,99;
- термін служби – не менше 20 років;
- встановлений безвідмовний наробіток протягом шести місяців з початку експлуатації – не менше 400000 км.

Як основний показник, що характеризує безвідмовність електрообладнання вагона, задано показник – середній наробіток до відмови, нормований за елементами, що входять до складу вагона.

Для оцінювання показників надійності електронних блоків доцільно виділити два основних етапи:

1. Нормування надійності;
2. Розрахунок надійності.

Нормування надійності дає змогу визначити кількісне значення середнього наробітку до відмови, що припадає на блоки сумарно, із загального значення показника, заданого на все електрообладнання вагона, тобто

провести нормування надійності. Як вихідні дані для нормування і розрахунку проектної надійності електронних блоків були використані:

- структурні схеми надійності блоків БЗ, БРНГ, БРЧ і БРТ;
- переліки ЕРВ (електро-радіо виробів), що входять до складу блоків;
- переліки інтенсивності відмов використаних ЕРВ;
- режими й умови роботи блоків.

Інтенсивності відмов ЕРВ визначені з урахуванням коефіцієнтів впливу на інтенсивність відмов різних конструктивно-технологічних і експлуатаційних факторів, що впливають на електронні блоки вагона.

За призначенням та умовами експлуатації електронні блоки належать до категорії 1.2 (наземна рухома апаратура). Інтенсивність відмов комплектуючих ЕРВ для цієї категорії визначають за формулою

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \prod_{K=1}^n K_k, \tag{1}$$

де λ_0 – базова інтенсивність відмов ЕРВ за $t = + 25 \text{ }^\circ\text{C}$;

K_k – коефіцієнти, що враховують вплив на інтенсивність відмов ЕРВ різних конструктивно-технологічних та експлуатаційних факторів.

З метою забезпечення системного підходу до вибору, розрахунку й аналізу коефіцієнтів і значень інтенсивності відмов комплектування ЕРВ для кожного з чотирьох блоків складають відповідну таблицю. Повністю всі таблиці не наводимо через їхній великий обсяг. Фрагмент однієї з таблиць для блоку захисту наведений у табл. 1.

Таблиця 1
Значення інтенсивності відмов комплектування ЕРВ для блока БЗ

Номер з/п	Тип ЕРВ	Кількість N	$\lambda_0 \cdot 10^6, 1/\text{год}$	Коефіцієнти K_k						$\lambda \cdot K \cdot 10^6, 1/\text{год}$	$\lambda \cdot N \cdot 10^6, 1/\text{год}$
				5	6	7	8	9	10		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	Діоди										
	D2 23 А	2	0,1	0,1 5 1	0,6	0,6	0,7	2,5	0,09 51	0,019 02	
...	
5	Транзистори										
	КТ 315 Г	5	0,3	0,2 7 1	0,5	0,7	0,5	2,5	0,035 60	0,178 00	
...	
42	Конденсатор										
	K5 0- 12- 160 - 50 Мк ф	1	0,05	0,02 6	1,0	-	-	2,5	0,032 5	0,032 5	
Інтенсивність відмов блока захисту (БЗ)										1,393	

Результати розрахунку інтенсивності відмов електронних блоків подані на рис. 3. У розрахунках використовували програмні пакети Statistica та Microsoft Office (Excel).

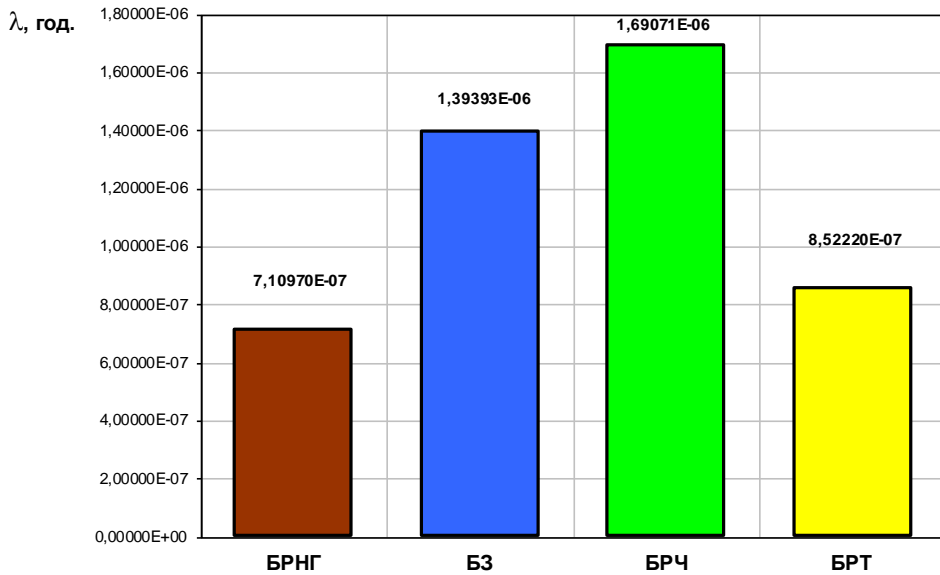


Рис. 3. Діаграма розподілу інтенсивності відмов електронних блоків

З діаграми видно, що найменш надійним є блок БРЧ, а найбільш надійним – БРНГ. Сумарна інтенсивність відмов усіх електронних блоків складає $4,64783 \cdot 10^{-6}$ 1/год. Задане в ТУ кількісне значення наробітку до відмови на все електрообладнання вагона складає 35040 год (на підставі того, що 300000 км приблизно відповідає двом рокам експлуатації вагона). Тоді з формули $\lambda = 1/T$ випливає, що задана інтенсивність відмов складає $\lambda = 28,538 \cdot 10^{-6}$ 1/год. На частку електронних блоків припадає приблизно 16 % комплектовання ЕРВ вагона (виходячи з інтенсивності відмов комплектовання ЕРВ).

На підставі вищевикладеного був визначений нормований показник надійності електронних блоків – середній наробіток до відмови. Результат подано в табл. 2.

Таблиця 2

Нормоване значення середнього наробітку до відмови електронних блоків

Задане значення T_c , год	Нормоване значення T_c , год	
	Електронні блоки	Інша апаратура
35040	200000	43000

Отже, відповідно до заданого кількісного значення показника надійності на все електрообладнання вагона нормоване значення середнього наробітку до відмови електронних блоків складає 200000 год.

В основу розрахунку показників надійності електронних блоків був покладений

імовірнісний метод кількісного оцінювання надійності. При цьому прийняте допущення, що час виникнення відмов підлягає експоненційному закону розподілу, для якого справедлива умова $\lambda(t) = \text{const}$, тобто інтенсивність відмов постійна в часі. Для нерезервованої апаратури, до якої належать електронні блоки, середній наробіток до відмови T_c визначають за формулою

$$T_c = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n N_{ji} \cdot \lambda_{ji}}, \quad (2)$$

де n – кількість типів ЕРВ, що входять у j -й блок;
 m – кількість блоків;

N_{ji} – кількість ЕРВ i -го типу, що належать

j -му блоку;

λ_{ji} – інтенсивність відмов ЕРВ i -го типу, що належать j -му блоку.

Розрахунок показника надійності T_c здійснюється відповідно до структурних схем надійності (ССН) кожного з електронних блоків. ССН компонентів електронних блоків вагона і кожного блока окремо подано на рис. 4-8.

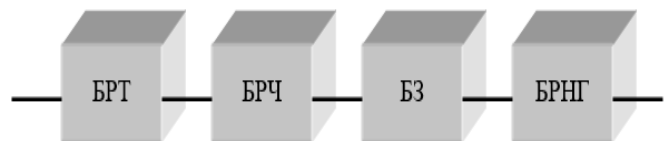


Рис. 4. Структурна схема надійності електронних блоків вагона



Рис. 5. Структурна схема надійності блока БРЧ



Рис. 6. Структурна схема надійності блока БРТ



Рис. 7. Структурна схема надійності блока БЗ



Рис. 8. Структурна схема надійності блока БРНГ

У розрахунках надійності електронних блоків ураховані:

- коефіцієнти теплових, механічних та електричних навантажень;
- кількість пайок у блоках (інтенсивність відмов пайки $\lambda = 10^{-10}$ 1/год).

Результати розрахунку інтенсивності відмов електронних блоків і середнього наробітку до відмови наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Результати розрахунку інтенсивності відмов і середнього наробітку до відмови електронних блоків вагона

№	Блок	Інтенсивність відмов $\lambda_{\text{бл}}$, 1/год	Середній наробіток до відмови T_c , год
1	Реле частоти (БРЧ)	$1,69071 \cdot 10^{-6}$	591467
2	Реле температури (БРТ)	$0,85222 \cdot 10^{-6}$	1173396
3	Захисту (БЗ)	$1,39393 \cdot 10^{-6}$	717411

4	Регулятора напруги генератора (БРНГ)	$0,71097 \cdot 10^{-6}$	1406529
Разом		$4,6956 \cdot 10^{-6}$	212965

Сумарне чисельне значення інтенсивності відмов блоків наведено з урахуванням інтенсивності відмов пайок.

Отже, відповідно до отриманих характеристик задана вимога з надійності виконана, тобто розраховане значення середнього наробітку до відмови $T_c = 212965$ год і нормоване значення $T_c = 200000$ год практично рівні (з довірчою імовірністю 0,9).

Проведені розрахунки доводять коректність запропонованої методики розрахунку. Наступним кроком проведення подальших досліджень буде порівняння проектної надійності електронних блоків вагона з експлуатаційною надійністю, розрахованою за результатом аналізу статистичних даних про відмови, і надання рекомендацій з підвищення надійності електронної апаратури вагона. Одним з ефективних заходів із підвищення експлуатаційної надійності електрообладнання пасажирських вагонів є впровадження сучасних технологій, методів і засобів технічного діагностування.

Практичне значення роботи.

Проведене оцінювання надійності електронної апаратури вагонів дасть змогу в подальшому оцінити їхній залишковий ресурс і, за необхідності, впливати на надійність конструктивними або експлуатаційними методами. За результатом проведеного розрахунку інтенсивності відмов і середнього наробітку до відмови електронних блоків можна надати рекомендації щодо послідовності діагностування та контролю технічного стану електронних блоків для технічного обслуговування та ремонту електрообладнання вагонів. Діагностування та контроль має відбуватись у порядку збільшення надійності електронних блоків: БРЧ, БЗ, БРТ, БРНГ (від менш надійного блока до більш надійного) (рис. 9).

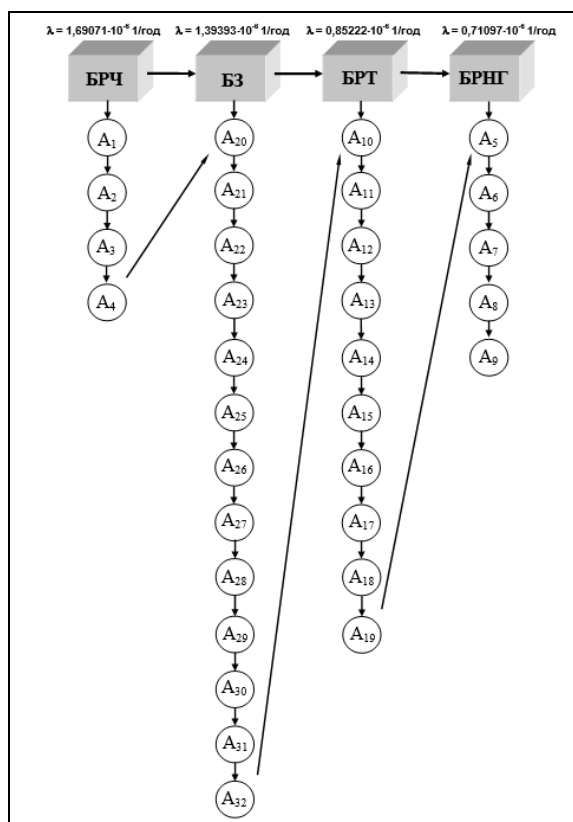


Рис. 9. Технологія діагностування електронних блоків, що враховує їхню надійність

На рис. 9 БРЧ, БЗ, БРТ, БРНГ – електронні блоки, що підлягають діагностуванню; $A_1 \div A_{32}$ – перелік параметрів електронних блоків, що підлягають контролю за прийнятою методикою випробувань заводу-виробника. Запропонована технологія діагностування дасть змогу зменшити час на пошук несправностей і відмов електронних блоків, відновлення комплексу електрообладнання вагона та підвищити експлуатаційну готовність вагона.

Висновки.

Розроблено та апробовано методику розрахунку проектної надійності електронної апаратури пасажирських вагонів, у рамках якої проведено нормування надійності електронних блоків і розраховано параметри надійності з урахуванням експлуатаційних коефіцієнтів. Отримані результати розрахунку проектної надійності електронних блоків дадуть змогу в подальшому провести порівняльний аналіз її з експлуатаційною надійністю з надходженням достатнього статистичного матеріалу та розробити заходи (конструктивні або експлуатаційні) щодо її підвищення. Запропоновано технологію діагностування електрообладнання вагона, що враховує отримані розрахунком показники надійності електронних блоків вагона і визначає

послідовність діагностування електронної апаратури.

Список використаних джерел

1. Лупітько Н. В., Сладких І. В. Дослідження сучасного стану інвентарного парку пасажирських вагонів АТ «Укрзалізниця». *Збірник наукових праць. Рейковий рухомий склад*. Кременчук: ДП «УкрНДІВ», 2020. Вип. 21. С. 28-43.
2. Мойсеєнко В. І., Бутенко В. М. Безпечність спеціалізованих комп'ютерних систем: навч. посіб. Харків: УкрДУЗТ, 2021. 112 с.
3. Проблеми випробувань комплексів технічних засобів керування та регулювання руху поїздів / В. І. Мойсеєнко, В. М. Бутенко, О. В. Головка, С. Г. Чуб. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2020. Т. 25, № 3. С. 31 – 38. ISSN: 2413-3833.
4. Panchenko S., Gerlici J., Lovska A., Ravlyuk V. The service life prediction for brake pads of freight wagons. *Communications. Scientific Letters of the University of Zilina*. 2024. Vol. 26 (2). P. B80 – B89. <https://doi.org/10.26552/com.C.2024.017>.
5. Development of a Procedure for Determining the Pre-Failure Condition of the Axle Boxes of Railway Rolling Stock / I. Martynov, J. Gerlici, A. Trufanova, V. Petuhov, V. Shovkun, K. Kravchenko. *Komunikácie - vedecké listy Žilinskej univerzity v Žiline*. 2022. 24(1). P. B87-B93. DOI: 10.26552/com.C.2022.1.B87-B93.
6. Пасажирські вагони. Діагностування. Залишковий ресурс. Надійність: монографія / Ю. Я. Водяніков, А. О. Сулим, П. О. Хозя та ін. Кременчук: ДП «УкрНДІВ», 2023. 69 с.
7. Influence of structural solutions of an improved brake cylinder of a freight car of railway transport on its load in operation / S. Panchenko, G. Vatulia, A. Lovska, V. Ravlyuk, I. Elyazov, I. Huseynov. *EUREKA Phys. Eng.* 2022, 6, 45–55. DOI: 10.21303/2461-4262.2022.002638.
8. Бутенко В. М., Головка О. В., Чуб С. Г. Аналіз методик розрахунку надійності систем залізничної автоматики з електронними компонентами. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2023. Вип. 204. С. 115-124.
9. Bondarenko V. V., Skurikhin D., Wojciechowski J. The Application of Lithium-Ion Batteries for Power Supply of Railway Passenger Cars and Key Approaches for System Development. *Smart and Green Solutions for Transport Systems: 16th Scientific and Technical Conference «Transport Systems. Theory and Practice 2019» Selected Papers.- Katowice: Springer International Publishing*. 2020. P. 114-125. DOI: 10.1007/978-3-030-35543-2_10.

10. Прес-служба «Укрзалізниці». 62 % пасажирських вагонів України не обладнані кондиціонерами. URL: https://www.uz.gov.ua/press_center (дата звернення 01.11.2024).

11. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. Київ : Держстандарт України, 1994.

12. ДСТУ 2861-94. Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення. Київ : Держстандарт України, 1994. 16 с.

13. ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. Київ : Держстандарт України, 1994. 16 с.

V. V. Bondarenko, R. I. Vizniak, V. G. Ravlyuk, D. I. Skurikhin, S. V. Bondarenko

Abstract. *The article is devoted to one of the important problems in railway transport - increasing the reliability of railway rolling stock. The process of trouble-free operation of electrical and electronic equipment of passenger cars depends on the efficiency of the design of the electrical equipment and its maintenance and repair system. The constant improvement of the electrical equipment of passenger cars, which is related to the improvement of traffic safety and comfortable conditions for passengers, has led to the creation of complex electronic devices for automatic control, control and protection. In this regard, there is a need to assess the reliability of electronic equipment, which allows for the development of measures aimed at its improvement.*

The authors of the article have developed a methodology for assessing the project reliability of electronic equipment of passenger cars. With its help, a study of the design reliability of the most important electronic units of the passenger car was carried out - the generator voltage regulator, the frequency relay unit, the battery charge control unit and the protection unit. This technique is universal, takes into account the operational coefficients of electronic equipment and can be used to assess the reliability of electronic equipment not only of locomotive traction cars, but also of other rolling stock of railways. The obtained results of calculating the design reliability of electronic units will allow to conduct a comparative analysis with operational reliability in the future and to propose measures to increase it if necessary. A technology for diagnosing the electrical equipment of a car is proposed, which takes into account the reliability indicators of the car's electronic units obtained by calculation.

Keywords: *passenger car, electrical and electronic equipment, electronic blocks, reliability of electronic blocks, reliability indicators, failure rate, diagnostics.*

Бондаренко В'ячеслав Володимирович, канд. техн. наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0003-4019-4017. Тел.: +38 (057) 730-10-35. E-mail: bondarenko@kart.edu.ua.

Візняк Руслан Іванович, канд. техн. наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-6179-4981.

E-mail: viznyakruslan@kart.edu.ua

Равлюк Василь Григорович, д-р техн. наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-4818-9482.

E-mail: ravg@kart.edu.ua

Скуріхін Дмитро Ігорович, канд. техн. наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-3746-5157.

E-mail: skurikhin@kart.edu.ua

Бондаренко Сергій В'ячеславович, студент Технологічно-гуманітарного університету ім. К. Пулавського у Радомі (Польща). ORCID iD: 0009-0004-6938-4046.

E-mail: serbon2007@gmail.com

Bondarenko Viacheslav, PhD (Tech), Associate Professor, department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-4019-4017.

Tel. +38 (057) 730-10-35. E-mail: bondarenko@kart.edu.ua

Viznyak Ruslan, PhD (Tech), Associate Professor, department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-6179-4981.

E-mail: viznyakruslan@kart.edu.ua

Ravlyuk Vasyl, Dr. Sc. (Tech.), Associate Professor, department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-4818-9482.

E-mail: ravg@kart.edu.ua

Skurikhin Dmytro, PhD (Tech), Associate Professor, department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-3746-5157.

E-mail: skurikhin@kart.edu.ua

Bondarenko Serhii, student, Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Poland. ORCID iD: 0009-0004-6938-4046. E-mail: serbon2007@gmail.com