

Альона Ловська¹, Олексій Фомін^{2*}, Дмитро Скуріхін³, В'ячеслав Бондаренко⁴

¹ Кафедра інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна, 61050. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8604-1764>

² Кафедра Вагони та вагонне господарство, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, Україна, 04071. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

³ Кафедра інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна, 61050. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3746-5157>

⁴ Кафедра інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна, 61050. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4019-4017>

* Автор, відповідальний за листування: fomin1985@ukr.net

КОМБІНАТОРНИЙ ПІДХІД ДО ПОШУКУ ВІДМОВ У СИСТЕМІ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ВАГОНІВ

Підтримка високого рівня обслуговування систем електрообладнання пасажирських вагонів вимагає проведення досліджень у галузі удосконалення методів і засобів технічного діагностування. Електронні пристрої автоматичного регулювання та захисту, які розміщуються у розподільному щиті вагона є одними з найвідповідальніших елементів у системі електрообладнання, що забезпечують її надійну, ефективну та безпечну експлуатацію. При розрегулюванні у процесі експлуатації пристроїв автоматичного регулювання та захисту, напруга та струм у мережі електрообладнання може перевищувати допустимий рівень, що приводить до виходу з ладу споживачів електроенергії, акумуляторної батареї та генератора. Крім того, самі напівпровідникові прилади є дуже чутливими до короточасних перевантажень, в яких навіть при незначних перевантаженнях виникає пробій або обрив струмопровідного шару. Сучасні тенденції розвитку вітчизняного та зарубіжного парку пасажирських вагонів свідчать про різке ускладнення елементної бази вагонів. Більшою мірою це стосується систем електрообладнання вагонів, де всі функції управління, контролю і діагностики виконує електроніка. Підтримка високого рівня обслуговування таких систем вимагає проведення досліджень в області вдосконалення методів і засобів технічного діагностування. З цією метою авторами розроблений метод побудови оптимальних контрольних і діагностичних тестів, в основі якого лежить комбінаторний підхід. Метод легко реалізується на ЕОМ.

Ключові слова: вагони, електрообладнання, відмова, контроль технічного стану, оптимізація, тести, комбінаторний підхід

Вступ. Електрообладнання пасажирського вагона складне і працює в важких умовах експлуатації, на нього діють значні динамічні зусилля та атмосферні впливи, тому для гарантування надійності роботи до нього висувують високі вимоги.

Електронні пристрої автоматичного регулювання та захисту, які розміщуються у розподільному щиті вагона є одними з найвідповідальніших елементів у системі електрообладнання, що забезпечують її надійну, ефективну та безпечну експлуатацію. Так, наприклад, у разі несправності апаратури регулювання заряду акумуляторної батареї, можливий вихід її з ладу внаслідок постійного недозарядження або перезарядження. При розрегулюванні у процесі експлуатації пристроїв автоматичного регулювання та захисту, напруга та струм у мережі електрообладнання може перевищувати допустимий рівень, що приводить до виходу з ладу споживачів електроенергії, акумуляторної батареї та генератора. Крім того, самі напівпровідникові прилади є дуже чутливими

до короткочасних перевантажень, в яких навіть при незначних перевантаженнях виникає пробій або обрив струмопровідного шару.

Сучасні тенденції розвитку вітчизняного та зарубіжного парку пасажирських вагонів свідчать про різке ускладнення елементної бази вагонів. Більшою мірою це стосується систем електрообладнання вагонів, де всі функції управління, контролю і діагностики виконує електроніка. Підтримка високого рівня обслуговування таких систем вимагає проведення досліджень в області вдосконалення методів і засобів технічного діагностування.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Для забезпечення безпеки руху на залізниці науковці всього світу працюють над вдосконаленням методів і засобів технічного діагностування та контролю технічного стану рухомого складу та його частин. Шляхи забезпечення безпеки руху та вдосконалення контролю технічного стану колісних пар розглядаються у роботах [1 - 4], гальмівних систем рухомого складу у [5, 6], гасників коливань ходових частин у праці [7]. Цікаві також дослідження присвячені моніторингу роботи виконавчих пристроїв систем нахилу кузовів вагонів [8] та системі контролю цілісності поїзда [9]. В роботах [10, 11] досліджені надійність та акустичні параметри роботи кліматичних систем пасажирських вагонів. Сучасний стан та виклики у питаннях енергозабезпечення пасажирських вагонів викладені у праці [12].

Питання обґрунтування стратегії технічного обслуговування рейкового рухомого складу, зокрема пасажирських вагонів висвітлені у роботах [13 - 15].

Одним із прикладів реалізації комп'ютерної системи контролю технічного стану системи електрообладнання пасажирських вагонів є Поїзна автоматизована інформаційно-діагностична система «ВИД» (ПАІДС «ВИД») [16]. Дана система контролює аналогові та дискретні сигнали електрообладнання вагонів, а при виході їх за допустимі межі інформує начальника поїзда про несправність або відмову. На рис. 1 зображені дискретні сигнали всіх пасажирських вагонів поїзда, що згруповані за підсистемами, колір сигналу відповідає стану системи.

Електроснабжение										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Режим управления "Автоматический"	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Режим управления "Ручной"	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Нормальный режим н/в магистрали	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Питание в магистраль	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Питание от магистрали	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
1 ступень	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
2 ступень	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
3 ступень	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Сеть 380 В, 50 Гц	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Авария	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Авария генератора	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Замыкание фазы генератора на корпус	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Обрыв фазы генератора	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Отказ ограничителя	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Защита ограничителя	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
R изоляции н/в магистрали (шина "+") < 20 кОм	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
R изоляции н/в магистрали (шина "-") < 20 кОм	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

↑
Предыдущая группа

↓
Следующая группа

Esc
Закреть окно

Рис. 1. Вікно ПАІДС «ВИД» для контролю технічного стану системи електрообладнання вагона

Питання побудови оптимальних контрольних та діагностичних тестів для систем більш ранніх комплексів електрообладнання розглянуті в дисертаційному дослідженні [17].

Експлуатація пасажирських вагонів показала, що визначальним видом відмов електронних блоків є параметричні відмови, які пов'язані з порушенням налаштування блоків у процесі експлуатації внаслідок вібрації, старіння елементів, температурних перевантажень і ін. Враховуючи даний факт, основний акцент дослідження спрямований саме на оптимізацію методів контролю та діагностування електронних блоків.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є розробка методу побудови оптимальних контрольних і діагностичних тестів для систем електрообладнання пасажирських вагонів, який можна легко реалізувати на ЕОМ, за рахунок чого скоротиться час на тестування та підвищиться експлуатаційна готовність рухомого складу.

Матеріали та методи дослідження. Аналіз відомих методів побудови оптимальних тестів показав, що їх можна розбити на дві групи: точні і наближені. Перша група методів ефективна для відносно невеликої кількості перевірок і несправностей, друга - має більш широкі можливості по кількості перевірок і несправностей, але має ряд обмежень і якість рішення виходить значно гірше оптимального.

Одним із шляхів вирішення даної задачі є підвищення ефективності точних методів. Для цього пропонується новий підхід до побудови контрольних і діагностичних тестів, в основі якого лежить зведення задачі побудови тестів до класу комбінаторних задач.

У загальному випадку задача побудови оптимальних контрольних і діагностичних тестів зводиться до розв'язання задачі мінімального покриття матриці станів. Згадані вище методи засновані на побудові і наступному перетворенні до диз'юнктивної нормальної форми (ДНФ) логічної функції виду

$$F(G) = D_1(G) \wedge \dots \wedge D_k(G) \quad (1)$$

де $D_i(G)$ – диз'юнкція перевірок, що виявляють i -й стан системи;

k – число технічних станів контрольованої системи.

З ростом числа технічних станів контрольованої системи і числа допустимих елементарних перевірок дана задача стає трудомісткою. Наприклад, при побудові мінімального діагностичного тесту за допомогою точного алгоритму при $k = 20$ логічна функція має 190 множників. У зв'язку з цим виникає завдання розробки більш ефективного методу побудови оптимальних тестів, який добре формалізується і зручний для реалізації на ЕОМ.

В основі розробленого методу лежать такі положення:

- розглядається множина перевірок $G = \{g_1, \dots, g_n\}$ як множина логічних змінних, де n – число допустимих елементарних перевірок;

- послідовність значень змінних g_1, g_2, \dots, g_n є комбінацією перевірок;
- значення змінних комбінації перевірок вказують на її склад: якщо i -а перевірка входить в комбінацію, то $g_i=1$ і $g_i=0$ в іншому випадку. Наприклад, якщо для $g=6$ комбінація перевірок має вигляд 001011 , це означає, що розглядаються перевірки з номерами 3, 5 і 6;

- рангом комбінації перевірок (r) є кількість вхідних в неї перевірок. Наприклад, комбінація виду 1100101 має ранг $r = 4$;

- вартістю комбінації перевірок є сумарна вартість входять в комбінацію перевірок;
- залежно від виду комбінації перевірок, диз'юнкції перевірок D приймають значення "0" або «1», причому $D_i = 1$, якщо хоча б одна з перевірок, що входять в комбінацію, входить в диз'юнкцію D_i , і $D_i = 0$ - в іншому випадку. Наприклад, для комбінації перевірок ($n=6$) 001100 диз'юнкція виду $g_1 \vee g_3 \vee g_6$ дорівнює «1». В результаті тотожних перетворень функція $F(G)$ перетворюється в ДНФ;

- кон'юнкції, що входять до ДНФ, розглядаються як комбінації перевірок, які є рішеннями рівняння виду $F(G) = 1$.

Таким чином, завдання пошуку оптимальних тестів може бути сформульовано таким чином: знайти таку комбінацію перевірок G , що $F(G) = 1$ і вартість (C) комбінації перевірок мінімальна ($C < C_{min}$).

Для вибору оптимального тесту необхідно сформувати варіанти комбінацій перевірок і вибрати з них варіант, що задовольняє зазначеним вище умовам. Проілюструємо процес пошуку оптимального тесту на прикладі. Нехай необхідно сформувати варіанти комбінацій

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

перевірок для системи електрообладнання пасажирського вагона і вибрати оптимальний варіант за вартістю. Матриця технічних станів системи наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Матриця технічних станів системи електрообладнання вагона

G\A	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	C _i
g ₁	0	1	1	0	0	3
g ₂	1	0	0	1	1	2
g ₃	0	0	1	1	0	4
g ₄	1	1	0	1	0	1

У стовпчиках таблиці 1 розташовується множина непрацездатних технічних станів системи електрообладнання a_k (приймаємо $k = 5$), в рядках - множина елементарних перевірок g_n (приймаємо $n = 4$). Кожна з перевірок дозволяє контролювати певний технічний стан системи. Прийнято наступні позначення непрацездатних технічних станів: a_1 - несправні джерела електрообладнання, a_2 - несправні електронні блоки, a_3 - несправні споживачі, a_4 - несправна мережа освітлення і a_5 - несправне опалення. C_i - умовні вартості перевірок g_1 і g_4 .

У таблиці 2 наведені варіанти комбінацій перевірок, значення вартості варіанта, значення функції $F(G)$ і значення C_{min} , отримані на відповідному етапі. Оптимальним є тест під номером 12. Його вартість дорівнює 5. Тобто для контролю системи електрообладнання вагона необхідно виконати першу (g_1) і другу (g_2) перевірки.

Таблиця 2. Побудова оптимального тесту для системи електрообладнання вагона за допомогою розробленого методу

№	G	F(G)	C	C _{min}
1	0001	0		
2	0010	0		
3	0011	0		
4	0100	0		
5	0101	0		
6	0110	0		
7	0111	1	7	7
8	1000	0		
9	1001	0		
10	1010	0		
11	1011	0		
12	<u>1100</u>	1	5	5
13	1101	1	6	5
14	1110	1	9	5
15	1111	1	10	5

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

У наведеному прикладі комбінації перевірок формуються послідовно відповідно до номеру. Бінарний код, відповідний до комбінації перевірок, є бінарним еквівалентом десяткового номера комбінації. Наведений спосіб генерації комбінацій перевірок є найбільш простим, але малоефективним. Пояснимо на прикладі.

Загальна кількість комбінацій перевірок довжиною g дорівнює $2^g - 1$ і може бути розбита на групи, в залежності від рангу комбінації. Для розглянутого вище прикладу підмножини комбінацій перевірок, що мають однаковий ранг, мають вигляд:

$$\begin{aligned} r=1: & \{1000, 0100, 0010, 0001\} \\ r=2: & \{1100, 1010, 1001, 0110, 0101, 0011\} \\ r=3: & \{1110, 1101, 1011, 0111\} \\ r=4: & \{1111\} \end{aligned}$$

Якщо генерацію здійснювати в порядку збільшення рангу (табл. 3), то оптимальний результат буде отримано на 5 кроці. Отже, вибір способу генерації комбінацій перевірок впливає на час пошуку оптимального варіанта.

Таким чином, можна зробити висновок про можливість скорочення часу побудови оптимального тесту для системи електрообладнання вагона шляхом: зменшення кількості розглянутих варіантів (відкидаючи комбінації перевірок, які не є рішенням) і вибору оптимальної стратегії пошуку.

Таблиця 3. Залежність кроку пошуку оптимального тесту від рангу

№	r	G	$F(G)$	C	C_{\min}
1	1	1000	0		
2		0100	0		
3	1	0010	0		
4		0001	0		
5	2	<u>1100</u>	1	5	5
6		1010	0		
7		1001	0		
8		0110	0		
9		0101	0		
10		0011	0		
11	3	1110	1	9	5
12		1101	1	6	5
13		1011	0		
14		0111	1	7	5
15	4	1111	1	10	5

Експериментальне дослідження розробленої стратегії пошуку оптимального тесту

Метою експериментального дослідження є оцінка ефективності доопрацьованого методу побудови оптимальних тестів засобів діагностування електронних блоків пасажирських вагонів.

У загальному випадку, задача побудови оптимальних контрольних та діагностичних тестів для системи електрообладнання пасажирських вагонів зводиться до рішення задачі мінімального покриття матриці. Тому надалі не будемо виділяти «контрольний тест» чи «діагностичний тест», а будемо говорити «тест».

Для кожної обраної комбінаторної конфігурації тесту необхідно визначити чи є вона рішенням. Це виконується шляхом перевірки двох умов:

- а) реалізуєності, тобто $F(G)=1$;
- б) мінімізації вартості, тобто $B < B_{\min}$

Перевірка кожної з цих умов вимагає певного часу. Тому правильно обрана стратегія пошуку оптимального тесту, що полягає у визначенні послідовності перевірки вищевказаних двох умов, дозволяє скоротити час пошуку. Завдяки цьому можливо підвищити ефективність розробленого методу. Враховуючи вищевикладене, за критерій ефективності методу прийнято час пошуку оптимального тесту.

Аналіз факторів, що впливають на час перевірки вищезазначених умов показав, що час перевірки умови реалізуєності залежить від n та k і різко збільшується з ростом їх значень, а час перевірки умови мінімізації вартості залежить тільки від n .

У ході експерименту було встановлено, що час перевірки вартості комбінаторної конфігурації складає для $n = 5 \dots 20$ від 0,001 мкс до 0,012 мкс (рис. 2), що приблизно у два рази менше часу аналізу реалізуєності.

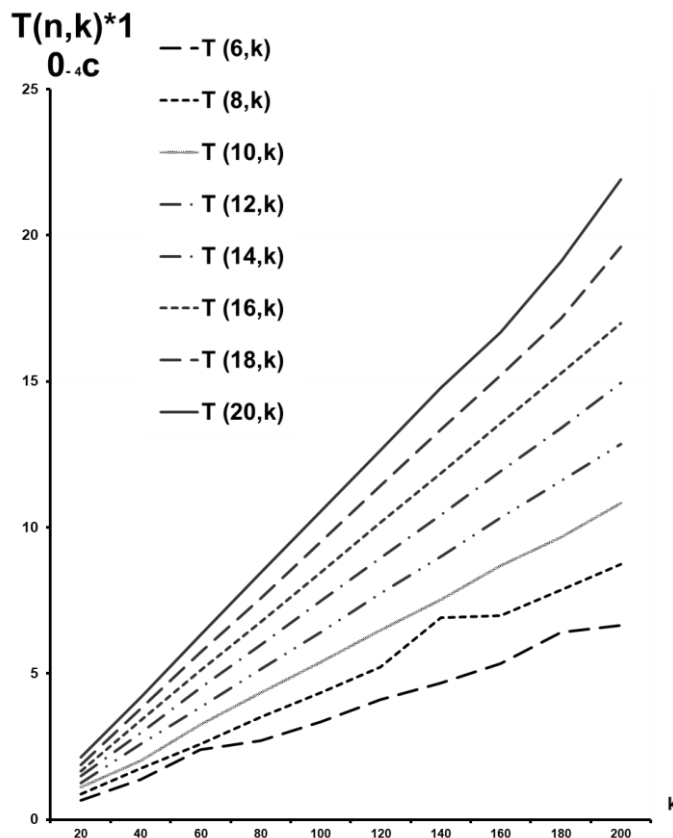


Рис. 2. Залежність часу перевірки умови $F(G)=1$ від кількості перевірок та несправностей системи

n – кількість перевірок ($n=5 \div 20$);
 k – кількість несправностей ($k=20 \div 200$).

Отже, у процесі генерації варіантів тестів спочатку необхідно перевіряти виконання умови мінімізації вартості, а у випадку її виконання – перевіряти умову реалізуєміст. Ефективність такого відбору варіантів тестів росте зі збільшенням кількості n і k .

Висновки. Експериментально досліджена ефективність доопрацьованого методу діагностування. Критерієм ефективності методу є час пошуку оптимального тесту. Обрана стратегія, при котрій спочатку перевіряється вартість тесту, а потім реалізуємість логічної функції $F(G)$, дозволяє скоротити час проектування тесту приблизно у 2 рази. Отримано функціональні залежності часу пошуку оптимального тесту від кількості перевірок та несправностей електрообладнання.

Подяка

Дані дослідження проведені в рамках наукової теми молодих вчених “Інноваційні засади створення ресурсозберігаючих конструктивів вагонів шляхом урахування уточнених динамічних навантажень та функціонально-адаптивних флеш-концептів”, яка виконується за рахунок коштів державного бюджету України з 2020 р.

ЛІТЕРАТУРА

1. Domin, R., Domin, I., Cherniak, G., Mostovych, A., Konstantidi, V., & Gryndei, P. Investigation of the some problems of running safety of rolling stock on the ukrainian railways // Archives of Transport, 2016 №40(4), P.15-27. doi:10.5604/08669546.1225459
2. Yiwei, Z., Shaopu, Y., Yongqiang, L., Yingying, L., & Pengfei, L. A new semi-active control strategy and its application in railway vehicles // Advances in Applied Nonlinear Dynamics, Vibration and Control, 2021. doi:10.1007/978-981-16-5912-6_18 Retrieved from www.scopus.com
3. Bondarenko V. V., Skurikhin D. I., Vizniak R.I., Ravlyuk V. H., Skurikhin V. I. Experimental study of the method and device for wheel-sets acoustic monitoring of railway cars in motion // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2019, № 4 P. 30-36. doi: 10.29202/nvngu/2019-4/7)
4. Wang, H., Li, H., Li, Y., & Duan, Y. Railway wagon wheelset fault diagnosis method based on DBN // Global Reliability and Prognostics and Health Management, PHM-Shanghai 2020, doi:10.1109/PHM-Shanghai49105.2020.9280980
5. Aimar, M., & Somà, A. Study and results of an onboard brake monitoring system for freight wagons // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2018, №232(5), P.1277-1294. doi:10.1177/0954409717720348
6. Lipsett, M. G., Ying, C., & Hendry, M. T. Condition monitoring of rail car air brake systems using ultrasound. Paper presented at the Advances in Technology to Support End User Mission // Proceedings of the 2016 Joint Conference/Symposium of the Society for Machinery Failure Prevention Technology and the International Society of Automation, 2016 Retrieved from www.scopus.com
7. Kojima, T., & Sugahara, Y. (2013). Fault detection of vertical dampers of railway vehicle based on phase difference of vibrations // Quarterly Report of RTRI (Railway Technical Research Institute), 2013, №54(3), P. 139-144. doi:10.2219/trtrqr.54.139
8. De Martin, A., Dellacasa, A., Jacazio, G., & Sorli, M. Integrated health monitoring for the actuation system of high-speed tilting trains // International Journal of Prognostics and Health Management, 2017, №8 (Special Issue 7) Retrieved from www.scopus.com
9. Lazarescu, M. T., & Poolad, P. Asynchronous resilient wireless sensor network for train integrity monitoring // IEEE Internet of Things Journal, 2021, № 8(5), P. 3939-3954. doi:10.1109/IJOT.2020.3026243
10. Catelani, M., Ciani, L., Guidi, G., & Galar, D. (2020). A practical solution for HVAC life estimation using failure models // 17th IMEKO TC 10 and EUROLAB Virtual Conference "Global Trends in Testing, Diagnostics and Inspection for 2030", 2020, P. 85-91. Retrieved from www.scopus.com
11. Zvolenský, P., Leštinský, L., Dungal, J., & Grencík, J. (2021). Evaluation of acoustic parameters of air conditioning of railway passenger cars // Transportation Research Procedia, 2021, №55, P. 673-677. doi:10.1016/j.trpro.2021.07.034 Retrieved from www.scopus.com
12. Skurikhin D.I. The Application of Lithium-Ion Batteries for Power Supply of Railway Passenger Cars and Key Approaches for System Development /Bondarenko V., Skurikhin D., Wojciechowski J. // In: Sierpiński G. (eds) Smart and Green Solutions for Transport Systems. TSTP 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1091, pp 114-125 Springer, Cham. (DOI:10.1007/978-3-030-35543-2_10)
13. Kovalev, S. M., Tarassov, V. B., Dolgiy, A. I., Dolgiy, I. D., Koroleva, M. N., & Khatlamadzhyan, A. E. Towards intelligent measurement in railcar on-line monitoring: From measurement ontologies to hybrid information granulation system, 2018 doi:10.1007/978-3-319-68321-8_18 Retrieved from www.scopus.com

14. Daniyan, I. A., Mpfu, K., & Adeodu, A. O. Development of a diagnostic and prognostic tool for predictive maintenance in the railcar industry // *Procedia CIRP*, 2020, №90, P. 109-114. doi:10.1016/j.procir.2020.02.001 Retrieved from www.scopus.com

15. Bannikov, D. A., & Sirina, N. F. Service maintenance and repair of passenger cars in the concept of digital enterprise // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, №918(1) doi:10.1088/1757-899X/918/1/012168 Retrieved from www.scopus.com

16. Макаренко В. Н., Бондар С. І., Гамбарян Г. Р., Бандура І. М. Поездная автоматизированная информационно-диагностическая система "Вид" // *Залізничний транспорт України №6*, 2004. С.51-54.

17. Бондаренко В.В. Удосконалення технології технічного обслуговування та діагностування електрообладнання пасажирських вагонів : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.22.07 – Рухомий склад залізниць та тяга поїздів / В'ячеслав Володимирович Бондаренко ; Укр. держ. акад. залізн. трансп. Харків, 2002. 16 с.

REFERENCES

1. Domin, R., Domin, I., Cherniak, G., Mostovych, A., Konstantidi, V., & Gryndei, P. (2016). Investigation of the some problems of running safety of rolling stock on the ukrainian railways. *Archives of Transport*, 40(4), 15-27. doi:10.5604/08669546.1225459

2. Yiwei, Z., Shaopu, Y., Yongqiang, L., Yingying, L., & Pengfei, L. (2022). A new semi-active control strategy and its application in railway vehicles doi:10.1007/978-981-16-5912-6_18 Retrieved from www.scopus.com

3. Bondarenko V. V., Skurikhin D. I., Vizniak R.I., Ravlyuk V. H., Skurikhin V. I. (2019) Experimental study of the method and device for wheel-sets acoustic monitoring of railway cars in motion. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 4, 30-36. (DOI: 10.29202/nvngu/2019-4/7)

4. Wang, H., Li, H., Li, Y., & Duan, Y. (2020). Railway wagon wheelset fault diagnosis method based on DBN. Paper presented at the 2020 Global Reliability and Prognostics and Health Management, PHM-Shanghai 2020, doi:10.1109/PHM-Shanghai49105.2020.9280980

5. Aymar, M., & Somà, A. (2018). Study and results of an onboard brake monitoring system for freight wagons. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 232(5), 1277-1294. doi:10.1177/0954409717720348

6. Lipsett, M. G., Ying, C., & Hendry, M. T. (2016). Condition monitoring of rail car air brake systems using ultrasound. Paper presented at the Advances in Technology to Support End User Mission - Proceedings of the 2016 Joint Conference/Symposium of the Society for Machinery Failure Prevention Technology and the International Society of Automation, Retrieved from www.scopus.com

7. Kojima, T., & Sugahara, Y. (2013). Fault detection of vertical dampers of railway vehicle based on phase difference of vibrations. *Quarterly Report of RTRI (Railway Technical Research Institute)*, 54(3), 139-144. doi:10.2219/rtriqr.54.139

8. De Martin, A., Dellacasa, A., Jacazio, G., & Sorli, M. (2017). Integrated health monitoring for the actuation system of high-speed tilting trains. *International Journal of Prognostics and Health Management*, 8(Special Issue 7) Retrieved from www.scopus.com

9. Lazarescu, M. T., & Poolad, P. (2021). Asynchronous resilient wireless sensor network for train integrity monitoring. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(5), 3939-3954. doi:10.1109/JIOT.2020.3026243

10. Catelani, M., Ciani, L., Guidi, G., & Galar, D. (2020). A practical solution for HVAC life estimation using failure models. Paper presented at the 17th IMEKO TC 10 and EUROLAB Virtual Conference "Global Trends in Testing, Diagnostics and Inspection for 2030", 85-91. Retrieved from www.scopus.com

11. Zvolenský, P., Leštinský, L., Dungal, J., & Grecík, J. (2021). Evaluation of acoustic parameters of air conditioning of railway passenger cars. Paper presented at the Transportation Research Procedia, , 55 673-677. doi:10.1016/j.tpro.2021.07.034 Retrieved from www.scopus.com

12. Bondarenko V., Skurikhin D., Wojciechowski J. (2019) The Application of Lithium-Ion Batteries for Power Supply of Railway Passenger Cars and Key Approaches for System Development // In: Sierpiński G. (eds) Smart and Green Solutions for Transport Systems. TSTP 2019. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 1091, pp 114-125 Springer, Cham. (DOI:10.1007/978-3-030-35543-2_10)

13. Kovalev, S. M., Tarassov, V. B., Dolgiy, A. I., Dolgiy, I. D., Koroleva, M. N., & Khatlamadzhyan, A. E. (2018). Towards intelligent measurement in railcar on-line monitoring: From measurement ontologies to hybrid information granulation system doi:10.1007/978-3-319-68321-8_18 Retrieved from www.scopus.com

14. Daniyan, I. A., Mpfu, K., & Adeodu, A. O. (2020). Development of a diagnostic and prognostic tool for predictive maintenance in the railcar industry. Paper presented at the *Procedia CIRP*, , 90 109-114. doi:10.1016/j.procir.2020.02.001 Retrieved from www.scopus.com

15. Bannikov, D. A., & Sirina, N. F. (2020). Service maintenance and repair of passenger cars in the concept of digital enterprise. Paper presented at the *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, , 918(1) doi:10.1088/1757-899X/918/1/012168 Retrieved from www.scopus.com

16. Makarenko V. N., Bondar S. I., Hambaryan H. R., Bandura I. M. (2004) Pоездная avtomatyzyrovannaya ynformatsyonno-dyahnostycheskaya sistema "Vyd" [Train informational and diagnostic system VYD]. *Zalізnychnyy transport Ukrainy [Railway transport of Ukraine]* 6, 51-54.

17. Bondarenko V.V. (2002) Udoskonalennya tekhnolohiyi tekhnichnoho obsluhovuvannya ta diahnostuvannya elektroobladnannya pasazhyr'skykh vahoniv [Improvement of maintenance and diagnostics technology for passenger car electrical equipment] PhD thesis. Kharkiv: UkrSURT [in Ukrainian]

Alyona Lovska¹, Oleksiy Fomin^{2}, Dmytro Skurikhin³, Viacheslav Bondarenko⁴*

^{1,3,4} Department of Railway car Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, Sq. Feuerbach, 7, Kharkiv, Ukraine, 61050

² Department of Railway cars and car facilities, State University of Infrastructure and Technologies, vul. Kyrylivska, 9, Kyiv, Ukraine, 04071

COMBINATORY APPROACH TO FAILURE FINDING IN PASSENGER CAR ELECTRICAL EQUIPMENT SYSTEM

Maintaining a high level of maintenance of electrical equipment in passenger cars requires research in the field of improving methods and means of technical diagnostics. Electronic devices for automatic control and protection, which are located in the switchboard of the car, are one of the most critical elements in the electrical equipment system, ensuring its reliable, efficient and safe operation. If the automatic adjustment and protection devices are out of regulation during operation, the voltage and current in the electrical equipment network may exceed the permissible level, which leads to the failure of electricity consumers, a battery and a generator. In addition, the semiconductor devices themselves are very sensitive to short-term overloads, in which, even with minor overloads, a breakdown or breakage of the conductive layer occurs. Modern trends in the development of passenger car fleet indicate a sharp increase in the complexity of the element base of cars. This mainly concerns the electrical systems of cars, where all the functions of control, monitoring and diagnostics are performed by electronics. Maintaining a high level of service for such systems requires research in the field of improving methods and means of technical diagnostics. For these purposes, the authors have developed a method for constructing optimal control and diagnostic tests, which is based on a combinatorial approach. The method is easily implemented on a computer.

Keywords: cars, electrical equipment, failure, technical condition control, optimization, tests, combinatorial approach.