

В.М. Шавкун

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

## МЕТОДИКА ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

Представлена методика розробки алгоритмів та програм розрахунку, оптимальної періодичності діагностування структурних одиниць об'єкта діагностування. Доведено, що рішення щодо ефективної експлуатації повинно завжди прийматися на основі вибору, який може бути критеріальним (як в розглянутому випадку), вольовим (усвідомленим) і випадковим (інтуїтивним). Створення бази даних показників надійності дозволить прогнозувати настання відмов, корегувати міжремонтні пробіги, планувати обсяги запасних частин.

Отримані результати можуть бути використані в якості вихідних даних для постановки і вирішення низки завдань управління експлуатаційною надійністю та діагностики транспортних засобів міського електричного транспорту.

**Ключові слова:** система діагностики, параметр діагностування, періодичність контролю, об'єкт діагностування, алгоритм контролю, інтенсивність відмов, транспортний засіб, ефективна експлуатація.

### Постановка проблеми

Експлуатація різних транспортних засобів в галузі міського електричного транспорту (МЕТ) супроводжується високими витратами на підтримку їх працездатного стану протягом усього терміну експлуатації. Збереження працездатності транспортних засобів забезпечується виконанням планово-запобіжних робіт з технічного обслуговування (ТО) і ремонту, а також позапланових ремонтів, що проводяться для усунення відмов, які виникають в міжпрофілактичні періоди, і несправностей.

В даний час велика увага приділяється необхідності впровадження технічного діагностування в галузі міського електричного транспорту, що послужить основою для поступового переходу від планово-попереджувальної системи ремонту до системи ремонту рухомого складу по фактичному стану. Крім того, після виконання поточних ремонтів необхідно перевірити роботу вузлів рухомого складу міського електричного транспорту, що ставить перед технічною діагностикою задачу «вихідного контролю», перевірки правильності виконання електричного монтажу. Під час руху електричного транспорту виникають відмови схем управління і силових схем, пошук яких вимагає значних витрат часу і досконального знання схем електричного транспорту. У зв'язку з цим перед системою діагностування електричного устаткування ставляться задачі виявлення несправностей і попередження виникнення раптових відмов.

Під час розробки діагностичного забезпечення технічних систем, у яких процес зміни

контрольованих параметрів є безперервним, однією з розв'язуваних задач є задача вибору раціональної періодичності контролю працездатності об'єкта діагностування [1].

У якості вихідних даних для рішення задачі визначення періодичності контролю працездатності використовуються результати рішення задач вибору набору діагностичних параметрів і вибору раціонального алгоритму контролю працездатності об'єкта діагностування. Результати рішення цієї задачі визначають вимоги до комплексу технічних засобів діагностування, а також витрати на діагностування [1, 2].

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботах [3–5] пропонується розрахувати оптимальний період діагностування не резервованих об'єктів безперервного використання за допомогою виразу:

$$T_{opt} = \frac{1}{V_0} = \sqrt{\frac{2 \cdot \tau_0}{\lambda}}, \quad (1)$$

де  $\tau_0$  – середній час діагностування ОД, у якому відсутній дефект;

$\lambda$  – інтенсивність виникнення дефектів в ОД;

$V_0$  – інтенсивність діагностування при  $T_{opt}$ .

Визначення  $T_{opt}$  з урахуванням витрат на діагностування може бути виконано виходячи з умови:

$$T_{opt} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\tau_0 + \beta)}{\lambda}}, \quad (2)$$

$$\beta = \frac{C_0}{(C_u + C_y)}, \quad (3)$$

де  $C_0$  – середні витрати на одне діагностування, грн;  
 $C_u$  – продуктивність ОД, грн/год.;  $C_y$  – середній збиток в одиницю часу, обумовлений дефектами в ОД і режимами діагностування, грн./год.

### Формулювання мети

Метою роботи є розробка методики вибору параметрів діагностування елементів транспортних засобів міського електротранспорту, оптимальної періодичності діагностування структурних одиниць об'єкта діагностування.

Для досягнення мети поставлено задачі:

- вибрати раціональну періодичність контролю працездатності об'єкта діагностування;
- вибрати набір діагностичних параметрів і раціональний алгоритм контролю працездатності об'єкта діагностування.

### Викладення основного матеріалу

В останні роки процес діагностування піддався більш глибокому дослідженню. При рішенні задач організації системи діагностування стали враховувати вплив на ефективність діагностування СД показників, що характеризують безвідмовність, контролепридатність і ремонтпридатність як об'єкта так, і технічних засобів діагностування (ТЗД), що у свою чергу, зв'язані з показниками, що характеризують організацію діагностування, використання й експлуатації ОД. Разом з тим аналіз процесу взаємодії ОД і ТЗД при діагностуванні дозволяє обґрунтовано, виходячи з обраного критерію організації системи діагностування, сформулювати вимоги до об'єкта і технічних засобів з урахуванням специфіки використання й експлуатації ОД [4–6].

У загальному випадку, у ході аналізу процесу взаємодії елементів СД можна визначити максимальне значення обраного критерію (прямі задачі організації СД чи значення показників, що характеризують ОД і ТЗД, що забезпечують досягнення заданого критерію (зворотні задачі організації СД).

Розгляд процесу взаємодії елементів СД показує, що в ході аналізу необхідно враховувати різноманітні фактори, які істотно впливають на її організацію.

Рішення задачі організації починається з вибору критерію якості організації процесу взаємодії елементів СД. Оскільки СД призначена для підвищення ефективності ОД, то як критерій може

бути обраний один з показників, що характеризують ефективність ОД, з іншої сторони діагностування зв'язане з додатковими витратами, що дозволяє як критерій організації СД використовувати вартісні оцінки.

Після вибору критерію здійснюється аналіз можливих режимів використання об'єкта. Потім визначають режими діагностування ОД, закон розподілу, якому підкоряються показники, що характеризують взаємодію елементів СД. Вид закону розподілу впливає на вибір математичного апарату і методів рішення задач організації.

При організації процесу взаємодії елементів СД необхідно враховувати і вид технічних засобів діагностування, що можуть бути вбудованими і зовнішніми.

При розробці бортової системи діагностування як критерії вибираються показники, що характеризують надійність і безвідмовність основних вузлів рухомого складу і електричного транспорту в цілому.

По режиму використання бортову СД рухомого складу електричного транспорту можна віднести до систем безупинного використання, тому що час безупинного використання електричного транспорту значно більше часу появи дефекту.

Режим діагностування – регулярний-періодичний. Рухомий склад міського електричного транспорту розбивається на  $N$  груп вузлів (структурні одиниці) періодичність діагностування кожної групи  $\tau_i$ ,  $i \in \{1, N\}$ , повинна вибиратися з урахуванням показників надійності цих вузлів. Так як, для розрахунку показників надійності вузлів і деталей електричного транспорту може бути використана методика, заснована на використанні залежності середньої кількості відмов від наробітку (Н-характеристика) [6–8], то немає необхідності визначати закон розподілу, якому підкоряються показники що характеризують надійність вузлів електричного транспорту.

Як задача організації взаємодії елементів СД обрана задача визначення працездатності, пошуку дефектів і прогнозування зміни стану ОД.

У процесі розвитку діагностичних систем рухомого складу питанням вибору періодичності діагностичних перевірок приділялася значна увага. Серед робіт, присвячених питанням визначення періодичності постановки діагнозу тягового рухомого складу слід зазначити роботу [6–8].

При наявності математичного опису випадкового процесу зміни параметра  $x(t)$ , та якщо відомі значення його докритичного  $x_{кр}$  і граничного  $x_2$  рівнів у міжремонтний період  $T_p$ ,

можна визначити момент діагностування  $T_0$  при заданому рівні безвідмовності. Для цього необхідно знайти зв'язок попереджувального діагностування  $\tau = T_p - T_0$  із допуском  $\Delta x = x_c - x_{кр}$ .

Перевірка технічного стану структурної одиниці виконує роль своєрідного екрану: прозорого при  $x(T) < x_{кр}$  і поглинаючого при  $x(T) > x_{кр}$ .

Корегування міжремонтного (діагностичного) терміну здійснюється за допомогою теореми екранів

$$\int_{T_2}^{T_1} f(t, x_{сп}) dt = \int_{x_{кр}}^{x_c} \varphi(x, T_2) dx, \quad (4)$$

тобто визначається період  $T_2$ , що у даному випадку дорівнює міжремонтному періоду  $T_p$ .

Розглянутий метод може бути використаний для визначення термінів діагностування всіх структурних одиниць і агрегатів електричного транспорту. Однак для його реалізації необхідно мати залежність зміни параметра  $x(t)$ , отриману при статистичному дослідженні.

У роботі розроблені наукові основи потокової технології діагностування і технічного огляду транспортних засобів електротранспорту, що базується на математичних моделях теорій розкладів і масового обслуговування з пріоритетами.

У роботах [3–5], розроблені теоретичні основи розрахунку раціональної організації роботи систем діагностування. Методика розрахунку організації системи діагностування з максимальною вірогідністю одержуваної інформації, що дозволяє визначити характеристики СД на початковому етапі їхньої розробки (задача А). Методика розрахунку організації СД при наявності пріоритетних елементів, що дозволяє визначити характеристики СД при виділенні елементів, відмовлення яких може вплинути на безпеку руху, або мати важкі наслідки (задача Р). Методика розрахунку організації СД із мінімізацією невизначеності технічного стану електричного транспорту, що дозволяє визначити характеристики СД при відсутності економічних, або інших критеріїв, а також при заданій ентропії, одержати характеристики надійності без обліку умов експлуатації і системи утримання (задача Н). Методика розрахунку СД із мінімізацією збитків від несвоєчасного одержання інформації, що дозволяє визначити характеристики СД з урахуванням економічних критеріїв (задача С).

Розглянуті методики розроблялися для стаціонарних діагностичних комплексів електричного транспорту. Аналіз методик показує, що більшість з них можуть бути використані при розробці

бортових систем діагностування електричного транспорту, однак необхідно переглядати критерії організації систем діагностування. У першу чергу, для бортових систем зменшуються витрати зв'язані з витратами часу на діагностування, тому що системи працюють у режимі функціонального діагностування.

До бортових систем пред'являються вимоги забезпечення максимальної інформативності про стан контрольованого об'єкта, тому для бортових систем можна виділити два типи періодів діагностування:

– «діагностичні» періоди – інтервали часу між опитуваннями датчиків інформаційно-діагностичним комплексом (ІДК);

– «прогнозуєчі» періоди – інтервали часу через який повинний проводитися запис інформації про значення контрольованого параметра до постійного запам'ятовуючого пристрою з метою подальшого аналізу процесу зміни значень діагностичних параметрів та прогнозування настання відмови.

Для визначення періодів опитування датчиків бортових систем діагностування необхідно вирішити задачу вибору періодів діагностування які забезпечують максимальну вірогідність одержуваної інформації (задача А).

**Формулювання задачі А:** Визначити періоди опитування елементів  $\tau_i$ , так щоб вірогідність одержуваної інформації була б максимальною, а завантаження діагностичного комплексу не перевершували б наперед заданої величини  $\rho$  і при цьому виконувалася б умова запуску ІДК.

$$\begin{aligned} \sum \tau_i &\rightarrow \min, \\ D &\rightarrow \max, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $\sum \tau_i$  – сумарний час на опитування всіх датчиків;

$D$  – вірогідність інформації про стан електричного транспорту.

Вірогідність одержуваної інформації будемо вимірювати імовірністю того, що між діагностичними перевірками зміни в технічному стані елементів не буде.

$$D = \prod_{i=1}^m e^{-\lambda_i \tau_i}, \quad (6)$$

де  $\lambda_i$  – інтенсивність виникнення дефектів в  $i$ -тій структурній одиниці;

Завантаження пункту діагностування

$$\rho = \sum_{i=1}^m \frac{t_i}{\tau_i}, \quad (7)$$

де  $t_i$  – час роботи ІДК із  $i$ -тим елементом.

Умову запуску системи діагностування сформулюємо у виді: мінімальний період між проведенням перевірок повинний бути не менш сумарного часу роботи ІДК з елементами.

$$\sum_{i=1}^m t_i < \min(\tau_i). \quad (8)$$

Для визначення періодів часу відновлення інформації про значення контрольованого параметра необхідно вирішити задачу Р.

**Формулювання задачі Р:** Визначити періоди опитування елементів  $\{\tau_i > 0\}$ ,  $i=1, m$  так, щоб вірогідність інформації про інші елементи  $i=1, r$ , ( $r < m$ ) була б не нижче заданого рівня  $\alpha$ , а вірогідність інформації про інші елементи була б максимальною і при цьому виконувалися умови по завантаженню СД.

*Математична постановка задачі:* Необхідно знайти такі  $\tau_i$ ,  $i=1, m$  щоб

$$I = \sum_{i=r+1}^m \lambda_i \tau_i \rightarrow \min \quad (9)$$

$$I = \sum_{i=1}^K \lambda_i \tau_i < \alpha,$$

$$\alpha = -\ln(P_0)$$

і при цьому виконувалися умови (7) та (8), де  $P_0$  – заданий рівень вірогідності інформації про пріоритетні елементи [9–11].

Для розв'язання цих задач необхідно провести збір статистичних даних по відмовам вузлів електричного транспорту та визначити інтенсивність відмов електричного транспорту, крім того необхідно знати затрати часу на проведення опитування датчиків для кожної структурної одиниці.

## Висновки

Таким чином, рішення щодо ефективної експлуатації повинно завжди прийматися на основі вибору, який може бути критеріальним (як в розглянутому випадку), вольовим (усвідомленим) і випадковим (інтуїтивним).

Використовуючи вище викладені методики (задачі А і Р) можна розробити алгоритми та програми розрахунку, оптимальної періодичності діагностування структурних одиниць ОД.

Дана робота дозволяє обґрунтувати такі пропозиції:

- зниження числа позапланових зупинок (раптових відмов) обладнання при досягненні максимально тривалого терміну експлуатації коштовного устаткування;

- постійна наявність (надання) інформації про стан обладнання, що дозволяє судити про стан загальної продуктивності, а також прогнозування та планування потреби у необхідному обслуговуванні;

- зниження експлуатаційних витрат підприємства, збільшення прибутку, підвищення безпеки праці, якості обслуговування пасажирів та скорочення відмов.

Додатково необхідно відзначити, що для підвищення ефективності використання системи діагностування інформація про значення контрольованих параметрів електричного транспорту, отримана в процесі діагностування, повинна накопичуватися й аналізуватися в пунктах технічного обслуговування в загальній базі даних. Створення бази даних показників надійності дозволить прогнозувати настання відмов, корегувати міжремонтні пробіги, планувати обсяги запасних частин.

## Література

1. Шавкун В.М. Перспективні напрями розвитку методів і засобів технічної діагностики електричного транспорту / В.М. Шавкун // *Комунальне господарство міст. Сер.: Технічні науки та архітектура*. – 2018. – Вип. 1(142). – С. 58–63.
2. Яцун М.А. Експлуатація та діагностування електричних машин і апаратів / М.А. Яцун, А.М. Яцун. – Львів : «Львівська політехніка», 2010. – 228 с.
3. Шавкун В.М. Аналіз сучасних методів діагностики технічного стану асинхронних двигунів / В.М. Шавкун, В.В. Ліньков // *Комунальне господарство міст. Сер.: Технічні науки та архітектура*. – 2019. – Вип. 5(151). – С. 8-12.
4. Pavlenko T.P. Methodology of determining the parameters of traction electric motor failures when operating trolleybuses / T.P. Pavlenko, V. M. Shavkun, V.I. Scurihin, N.P. Lukashova // *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна*. – 2018. – № 4(76). – С. 47–59.
5. Pavlenko T. Ways to improve operation reliability of traction electric motors of the rolling stock of electric transport / T. Pavlenko, V. Shavkun, A. Petrenko // *Eastern-European Journal of Enterpraise Technologies*. – 2017. – Vol. 5. – Iss. 8(89). – P. 22–30. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.112109.
6. Далека В.Х. Технічна експлуатація міського електричного транспорту : навч. посіб. / В.Х. Далека, В.Б. Будніченко, Е.І. Карпушин. – Харків : ХНУМГ, 2014. – 235 с.



7. Бондаренко В.Г. Теорія імовірностей і математична статистика / В.Г. Бондаренко, І.Ю. Канівська, С.М. Парамонова. – К.: НТТУ «КПІ», 2006. – 125 с.

8. Ивоботенко Б.А. Планирование эксперимента в электромеханике / Б.А. Ивоботенко, Н.Ф. Ильинский. – М.: Энергия, 1975. – 240 с.

9. Шавкун В.М. Діагностування тягових електричних машин електротранспорту / В.М. Шавкун // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Вып. 1/7(67). – С. 48–52.

10. Kolcio K., Fesq L. Model-based off-nominal state isolation and detection system for autonomous fault management / K. Kolcio, L. Fesq // IEEE Aerospace Conference Proceedings. 2016, June. DOI: 10.1109/AERO.2016.7500793.

11. Krobot Z., Turo T., Neumann V. Using vehicle data in virtual model for maintenance system support / Z. Krobot, T. Turo, V. Neumann // ICMT 2017–6th International Conference on Military Technologies, P. 171–174. DOI: 10.1109/MILTECHS.2017.7988750

### References

1. Shavkun, V.M. (2018). Perspective directions of development of methods and means of technical diagnostics of electric transport. *Municipal economy of cities: Series: Technical sciences and architecture. Scientific and technical Sat, 1*, 58–63.

2. Yatsun, M.A., & Yatsun, A.M. (2010). Operation and diagnostics of electric machines and devices. *Lviv Polytechnic University*, 228.

3. Shavkun, V.M., & Linkov, V.V. (2019). Analysis of modern methods of diagnostics of technical condition of induction motors. *Municipal Economy of Cities: Series: Technical Sciences and Architecture. Scientific and technical Sat, Kharkiv*, 5, 8–12.

4. Pavlenko, T.P., Shavkun, V.M., Scurihin, V.I., Lukashova, N.P. (2018). Methodology of determining the parameters of traction electric motor failures when operating trolleybuses. *Science and progress of transport. Bulletin of*

*Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. Academician V. Lazaryan*, 4, 47–59.

5. Pavlenko, T., Shavkun, V., Petrenko, A. (2017). Ways to improve operation reliability of traction electric motors of the rolling stock of electric transport. *Eastern-European Journal of Enterpraise Technologies*, 5, 22–30.

6. Daleka, V.H., Budnichenko, V.B., Karpushin, E.I. (2014). Technical operation of urban electric transport: textbook. Manual. *Kh.*; *KhNUMG*, 235.

7. Bondarenko, V.G., Kanivska, I.Y., Paramonova, S.M. (2006). Theory of probabilities and mathematical statistics. *K.*: *NTTU "KPI"*, 125.

8. Ivabotenko, B.A., & Ilyinsky N.F. (1975). Planning an experiment in electromechanics. *M.*: *Energy*, 240.

9. Shavkun, V.M. (2014). Diagnosis of traction electric machines of electric transport. *East European Journal of Advanced Technologies*, 1/7, 48–52.

10. Kolcio, K., & Fesq, L. (2016). Model-based off-nominal state isolation and detection system for autonomous fault management. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*.

11. Krobot, Z., Turo, T., Neumann, V. (2017). Using vehicle data in virtual model for maintenance system support. *6th International Conference on Military Technologies*, 171–174.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. каф. систем електропостачання та електроспоживання міст В.Ф. Харченко, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна.

**Автор:** ШАВКУН Вячеслав Михайлович  
кандидат технічних наук, доцент  
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова  
E-mail – [vm.shavkun@gmail.com](mailto:vm.shavkun@gmail.com)  
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3253-1282>

## METHODOLOGY OF CHOOSING PARAMETERS FOR DIAGNOSING ELEMENTS OF URBAN ELECTRIC VEHICLES

V. Shavkun

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

*The operation of various vehicles in the field of urban electric transport is accompanied by high costs to maintain their working condition throughout the service life. Preservation of serviceability of vehicles is provided by performance of planned and preventive works on maintenance (MOT) and repair, and also the unscheduled repairs which are carried out for elimination of failures which arise in the interprophylactic periods, and malfunctions.*

*As already noted, in the planned preventive maintenance and repair system, the vehicle after a certain mileage (time) is forcibly subjected to preventive actions in the prescribed amount. At the same time, despite the adjustment of maintenance and repair modes depending on a number of factors, there is no individual approach to each rolling stock.*

*However, there is a need for such an approach, because even when rolling stock under the same conditions, the technical condition of each of them at the same time due to a number of reasons (individual characteristics of rolling stock, driving quality, maintenance, etc.) can differ significantly. Not every rolling stock requires all the operations provided by the "hard" volume of a particular type of maintenance. Execution of these "unnecessary" operations leads, on the one hand, to incomplete realization of individual properties of a rolling stock, increase in*

*expenses for MOT, on the other, at all does not promote improvement of its technical condition. On the contrary, more frequent interventions in the work of joints of units and mechanisms contribute to increased wear of bonded surfaces, the appearance of damage to joints, violation of the tightness of joints. Significant losses of labor and material resources are also associated with a large amount of repair work due to late detection of failures.*

*The fullest use of individual capabilities of rolling stock and ensuring on this basis the high efficiency of rolling stock during operation can be done through the widespread introduction into the technological process of maintenance and repair of diagnosing the technical condition of rolling stock.*

*To increase the efficiency of the vehicle, use, methods and diagnostic tools have been developed, which are used both during maintenance and repairs, and as an independent technological process. Diagnosis allows to increase the coefficient of readiness and probability of trouble-free operation of vehicles, to reduce the complexity and cost of operation, to increase the maintainability and controllability of vehicles.*

**Keywords:** *diagnostic system, diagnostic parameter, frequency of control, object of diagnosis, control algorithm, failure rate, vehicle, efficient operation.*