

УДК 629.3.07

## ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

**В.М. Шавкун, доцент, к.т.н., О.В. Мізяк, магістр, ХНУМГ ім. О. М. Бекетова**

***Анотація.** Розглядаються питання розробки науково обґрунтованих методів організації і режимів діагностування з метою забезпечення експлуатаційної надійності транспортних засобів.*

***Ключові слова:** діагностування, електротранспорт, експлуатація, надійність, відмова, статистичний аналіз, обслуговування.*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

**В.М. Шавкун, доцент, к.т.н., О. В. Мизяк, магістр, ХНУГХ им. А.Н. Бекетова**

***Аннотация.** Рассматриваются вопросы разработки научно обоснованных методов организации и режимов диагностирования с целью обеспечения эксплуатационной надежности транспортных средств.*

***Ключевые слова:** диагностирование, электротранспорт, эксплуатация, надежность, отказ, статистический анализ, обслуживание.*

## DETERMINATION OF OPTIMAL MODES OF DIAGNOSTICS OF VEHICLES

**V. Shavkun, assistant professor, cand. eng. sc., O. Miziak, post graduate student,  
National University of Urban Economy in Kharkiv**

***Abstract.** The issues of the development of scientifically based methods of organization and diagnostics modes with the purpose of ensuring the operational reliability of vehicles are considered.*

***Key words:** diagnostics, electric transport, operation, reliability, failure, statistical analysis, maintenance.*

### Вступ

Для забезпечення експлуатаційної надійності та зниження витрат особливо важливе теоретичне та практичне значення набуває проблема розробки науково обґрунтованих методів організації та режимів профілактичного обслуговування та ремонту рухомого складу.

### Аналіз публікацій

Проблемі конкурентоспроможності рухомого складу міського електротранспорту за рахунок підвищення рівня надійної експлуатації та енергозбереження присвячені роботи ві-

чизняних вчених. Зокрема, питанню створення методології моніторингу електромеханічних систем з урахування зміни параметрів в процесі експлуатації присвячені роботи [1,2]. Техніко-експлуатаційних властивостей трамвайних вагонів і тролейбусів присвячена робота [3].

### Мета роботи

Розробка науково обґрунтованих методів організації і режимів діагностування з метою забезпечення експлуатаційної надійності транспортних засобів та визначення оптимальних режимів діагностування.

## Виклад основного матеріалу

Відомо, що виникнення окремих несправностей (відмов) в механізмах рухомого складу часто носить випадковий характер. Тому ніякі норми не можуть відобразити істинні потреби рухомого складу в технічному обслуговуванні. Для кожного рухомого складу немає гарантії, що він відпрацює певний заздалегідь запланований період.

Поняття «відмова» безпосередньо пов'язане з поняттям «надійність». До основних причин виникнення відмов належать конструктивні помилки і недопрацювання, виробничі недоліки, порушення правил експлуатації та технічного обслуговування, неякісний ремонт або пошкодження деталей під час роботи, природний знос, зниження утомленої міцності та природне старіння.

Статистичний аналіз різних несправностей в агрегатах рухомого складу показує, що майже завжди вони підкоряються певним законам розподілу. Так, фактична потреба в ТО-2 тролейбусів одного типу змінюється в межах 5 – 20 тис. км та підкоряється нормальному закону розподілу. Потреба в ТО – 1 змінюється від 2 до 5 тис. км.

Як видно з рис. 1, середній пробіг тролейбусів до ТО-2 складає 16 тис. км і цьому пробігу відповідає найбільша кількість тролейбусів. Якщо середній пробіг  $l$  за періодичність ТО-2, приблизно для 67 % тролейбусів ця періодичність буде більшою, а для 33 % – меншою.

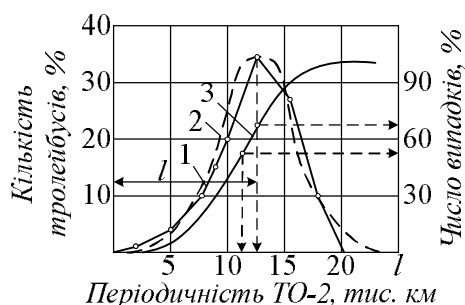


Рис. 1 – Криві розподілення пробігу тролейбусів до ТО-2: 1 – експериментальна; 2 – теоретична; 3 – кумулятивна.

Під час роботи тролейбусів в різних умовах експлуатації та при різній кваліфікації водіїв потреба в технічному обслуговуванні та характер розподілення робіт за поточним ремонтом неоднакові. Фактично, за даними пі-

дприємств, об'єми робіт і затрати на обслуговування та ремонт за окремими агрегатами відрізняються у два – три рази.

Періодичність обслуговування та об'єм робіт у більшій мірі залежить від типу, технічного стану тролейбуса, інтенсивності відмов у роботі окремих вузлів та механізмів. Наприклад, в залежності від технічного стану тролейбуса об'єм робіт з кріплення може відрізнятися більш ніж у 1,5 рази.

Примусове обслуговування та ремонт економічно доцільно виконувати в тому випадку, коли спостерігається невелике розсіювання строків появи тих або інших відмов в агрегатах тролейбусів. Для ЩО та ТО-1 з достатньою для практичних цілей точністю можна установити середні періодичності обслуговування [1-3].

Для ТО-2 періодичність обслуговування коливається в значних межах і встановити будь-яку середню норму пробігу важко. У зв'язку з цим більшість робіт з ТО-2, як і поточний ремонт, необхідно виконувати по мірі виявлення граничних станів, близьких до відмовних.

Отже, діючі режими та методи організації технічного обслуговування та поточного ремонту потребують подальших досліджень та уточнень.

Задача визначення оптимальних моделей профілактики може розглядатися як знаходження оптимального керування випадковим процесом.

Математичні методи теорії надійності машин дозволяють отримати статистичні дані по законам розподілу відмов на різних стадіях зносу рухомого складу, передбачати потребу у технічних обслуговуваннях, ремонтах, запасних частинах і т.п. Але в силу статистичного характеру таких даних вони не можуть бути застосовані до кожного тролейбуса по одинці, що дуже знижує їх практичну цінність. Результати розрахунків, що базуються на теорії імовірностей, стосовно до окремого тролейбуса носять невизначений характер.

Для того щоб зняти цю невизначеність у оцінці технічного стану кожного тролейбуса, необхідна індивідуальна перевірка (діагностика). Практично інструментальні методи

діагностики технічного стану є якби продовженням аналітичних методів теорії надійності машин. Щоб суттєво повисити якість технічного обслуговування і ремонту тролейбусів, слід правильно визначати (розпізнавати) технічний стан його агрегатів, ставити технічний діагноз.

Стосовно до великих підприємств міського електротранспорту може бути розглянуто три основні методи технічної експлуатації тролейбусів:

1. Рухомий склад експлуатується протягом максимально можливого строку при виконанні мінімальних об'ємів робіт з технічного обслуговування та ремонту. При різкому погіршенні технічного стану він направляється на капітальний ремонт. Цей метод економічно неоправданий та цілковито не бажаний з точки зору безпеки тролейбусів;

2. Встановлюються конкретні пробіги тролейбусів, по закінченню яких виконуються певні об'єми робіт з технічного обслуговування. Цей метод в даний час широко застосовується;

3. Після певного пробігу в примусовому порядку виконуються тільки контрольні та найпростіші роботи по утриманню рухомого складу, а регульовальні та інші операції технічного обслуговування, як і роботи з поточного ремонту, виконуються за потребою. Цей метод з наукової точки зору уявляє найбільший інтерес і тому у подальшому буде розглянуто детальніше.

При пошуку оптимальних режимів діагностування необхідно розпоряджатися відповідною вихідною інформацією, що враховує певний метод обслуговування, закономірності зміни технічного стану систем і затрати засобів на виконання діагностичних робіт, профілактичне обслуговування та ремонти тролейбусів.

Інформація про зміну технічного стану буває двох типів. Можна розпоряджатися лише статистичними даними про моменти виникнення відмов. В цьому випадку закономірності зміни технічного стану можна відслідкувати, якщо вивчити зміну інтенсивності та параметра потоку відмов. До другого типу може бути віднесена інформація, яка розпоряджається крім статистичних даних про моменти виникнення відмов ще й даними про закономірності зміни вихідних (діагностичних) параметрів, які пов'язані з зміною технічного

стану.

Розглянемо схему здійснення методу обслуговування із застосуванням діагностики, режими якої визначаються за напрацюванням. Сутність цього методу полягає в тому, що регулярно через певні інтервали  $l$  пробігу виконується діагностування агрегатів тролейбуса. Профілактичне обслуговування виконують за потребою у об'ємі, який виявлено при діагностуванні.

У випадку виникнення відмов виконується позачергове діагностування та необхідні поточний ремонт та обслуговування. Іноді позапланове діагностування, що виконується при виникненні відмов, виконується через інтервал пробігу, менший за  $l$ , але близький до нього.

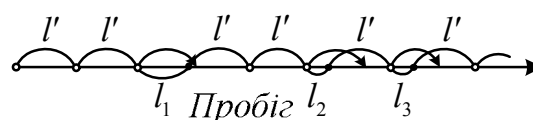


Рис. 2 – Схема організації профілактичного обслуговування з примусовим діагностуванням технічного стану тролейбусів:  $\circ$  – момент планового діагностування та обслуговування;  $\bullet$  – момент позачергового діагностування та обслуговування при виникненні відмов;  $\blacktriangle$  – діагностування та профілактичне обслуговування, що було заплановане раніше та не сталося.

Тоді чергове діагностування за старим планом недоцільно, так як пробіг між діагностичними операціями виявиться малим і технічний стан агрегата суттєво не зміниться. В цьому випадку виникають додаткові витрати на виконання діагностичних робіт. При такій ситуації доцільно перепланувати момент наступного діагностування та обслуговування та призначити його знов через інтервал  $l$  пробігу. Тоді схема здійснення методу буде мати вид, який наведено на рис. 2. До чергової відмови пробіг після виконаного діагностування може бути  $l_1, l_2, l_3$  і т.д.

Для реалізації оптимальних методів обслуговування необхідно встановити таку періодичність діагностування, яка була б меншою середнього пробігу між відмовами, коли діагностування та обслуговування не виконуються. З урахуванням цієї вимоги при дано-

му методі обслуговування будуть попереджені всі відмови, що лежать з права від величини  $l'$  (рис. 3)

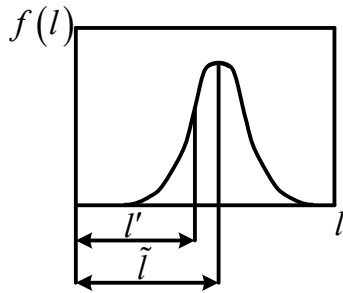


Рис. 3 – Графік обслуговування при даному розподілі відмов

Як видно, середній пробіг між впливами з обслуговування та ремонту лежать зліва від періодичності  $l'$ .

Періодичність  $l'$  діагностування визначають аналітично. Умову цієї техніко-економічної задачі зформулюємо так: періодичність  $l'$  оптимальна у цьому випадку, якщо коефіцієнт технічної готовності максимальний або затрати мінімальні.

Щоб визначити оптимальну періодичність діагностування, необхідно вирішити задачу мінімізації питомих витрат. Запишемо вираз для питомих витрат та прирівняємо похідну цього виразу до нуля.

Оптимальний режим діагностування при встановленій періодичності  $l'$  отримаємо з умови:

$$\frac{d}{dt} \left\{ \frac{M[U(l')]}{M[V(l')]} \right\} = M[V(l')] dM[U(l')] - M[U(l')] dM[V(l')] = 0 \quad (1)$$

де  $M[U(l')]$  – математичне очікування витрат на обслуговування та ремонт;  $M[V(l')]$  – математичне очікування тривалості роботи системи між профілактичними або ремонтними впливами.

Запишемо у загальному виді рівняння для визначення оптимальної періодичності діагностування за напрацюванням [1-3]:

$$\frac{\lambda(l')}{[1-F(l')]^2} \int_0^{l'} [1-F(l)] dl + \ln[1-F(l')] - \frac{C_{п.р.}}{C_{т.р.}} = 0 \quad (2)$$

де  $\lambda(l')$  – інтенсивність відмов;  $F(l')$  – функція розподілу пробігу між відмовами;  $C_{п.р.}$  – витрати при виконанні планової діагностики та обслуговування (профілактики);  $C_{т.р.}$  – витрати на виконання непланових поточних ремонтів;  $(l')$  – очікувана оптимальна періодичність діагностування.

Отримане рівняння має рішення при любых законах розподілу  $F(l)$ . Для експоненціального закону розподілення  $F(l) = 1 - e^{-\lambda l}$  останнє рівняння набуває виду:

$$e^{\lambda l'} - \lambda l' - 1 - \frac{C_{п.р.}}{C_{т.р.}} = 0. \quad (3)$$

За законом Вейбулла  $F(l) = 1 - e^{-\alpha l^\beta}$  рівняння виражається наступним чином:

$$\frac{\alpha \beta l'^{\beta-1}}{e^{-\alpha l'^\beta}} \int_0^{l'} e^{-\alpha l^\beta} dl + \alpha l' \beta - \frac{C_{п.р.}}{C_{т.р.}} = 0, \quad (4)$$

де  $\alpha, \beta$  – параметри закону Вейбулла.

Отримані рівняння для визначення оптимальних режимів діагностування справедливі для всіх агрегатів, механізмів та вузлів, крім тих, що забезпечують безпеку руху. Для цих систем неможна встановлювати оптимальні режими обслуговування тільки за мінімумом питомих витрат.

Там, де мова йде про безпеку, економічній стороні проблеми належить другорядна роль, і задача повинна вирішуватися з урахуванням забезпечення заданого рівня імовірності безвідмовної роботи.

Практично близько до імовірності безвідмовної роботи, рівній одиниці, можна наблизитися, якщо щоденно виконувати примусове обслуговування та заміну окремих елементів, що впливають на безпеку і схильних до від-

мов. Це практично нездійсненно. Отже, необхідно шукати інші шляхи щодо досягнення високої імовірності безвідмовної роботи.

Застосування високопродуктивних та ефективних контрольно-діагностичних засобів дозволяє запропонувати метод обслуговування систем, що забезпечують безпеку, який дозволяє отримати високу імовірність безвідмовної роботи при мінімальних витратах засобів на здійснення даної стратегії. Цей метод складається з примусового діагностування технічного стану систем та їх елементів, обслуговуванні та ремонті в об'ємі, що виявлено при діагностуванні, і примусовій заміні елементів у випадку досягнення граничних значень вихідних або структурних параметрів.

Таким чином, застосування експресдіагностування з подальшим обслуговуванням і примусовою заміною через певний пробіг окремих елементів системи дозволить попередити виникнення як зносних, так і раптових відмов. Періодичність експресдіагностування з достатньою точністю визначається з кривої надійності, якщо задати певним рівнем безвідмовної роботи при умові, що кожного разу після діагностування повністю відновлюється технічний стан системи і надійність стає близькою до одиниці.

Для практичного використання отриманих залежностей можна застосовувати графічний метод визначення оптимальної періодичності діагностування. Введемо величину, рівну відношенню оптимальної періодичності  $l'$  діагностування до середнього значення пробігу  $l'$  між відмовами (див. рис 3), і назовемо її коефіцієнтом оптимальності  $\tau$ .

Коефіцієнт оптимальності  $\tau$  показує, у скільки разів оптимальна періодичність діагностування більше або менше середнього пробігу між відмовами при різних значеннях параметрів, які входять до рівняння. Криві, які характеризують залежність коефіцієнта оптимальності  $\tau$  від параметрів, назовемо кривими оптимальної періодичності.

При нормальному законі розподілу коефіцієнт варіації  $v = \frac{\sigma}{\bar{l}}$  повністю характеризує форму розподілу. Тому криві оптимальної поведінки будемо розглядати для різних значень коефіцієнта варіації, що автоматично

враховує значення параметрів закону  $\bar{l}, \sigma$ . Криві оптимальної поведінки, які розраховані для нормального закону розподілення в залежності від відношення середніх затрат на профілактику і ремонт для різних значень коефіцієнта варіації  $v$ , представлено на рис.4.

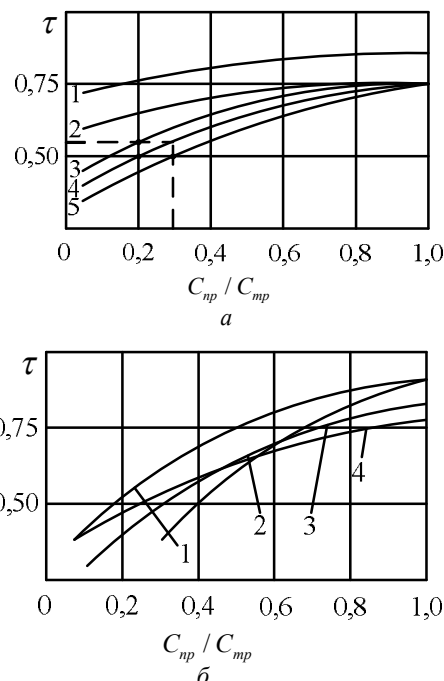


Рис. 4 – Залежність коефіцієнта оптимальності від відношення витрат: 1 –  $v = 0,1$ ; 2 –  $v = 0,2$ ; 3 –  $v = 0,3$ ; 4 –  $v = 0,4$ ; 5 –  $v = 0,5$ .

По мірі збільшення відношення затрат на профілактику і ремонт коефіцієнт оптимальності  $\tau$  також зростає, тобто оптимальна періодичність діагностування  $l'$  наближається до середнього значення пробігу між відмовами. Це свідчить про те, що більш поглиблена діагностика і обслуговування, які потребують більших затрат, ефективніше попереджують відмови, тому оптимальна періодичність діагностування може бути збільшена.

Навпаки, із збільшенням коефіцієнта варіації  $v$  коефіцієнт оптимальності зменшується, тобто оптимальна періодичність діагностування зменшується при одному тому ж значенні відношення  $C_{n.p.} / C_{m.p.}$ , і збільшується розбик пробігів між відмовами довкола середнього значення. Таким чином, щоб з однаковою ефективністю попереджувати відмови, періодичність діагностування повинна бути зменшена. З графіка також видно, що із збільшенням відношення  $C_{n.p.} / C_{m.p.}$  і змен-

шенням коефіцієнта варіації  $v$  коефіцієнт оптимальності прагне до значення 0,75–0,90. Звідси витікає важливий для практики висновок, згідно якому оптимальна періодичність діагностування для випадку нормального розподілу не повинна перевищувати  $0,90l'$ .

Залежність коефіцієнта оптимальності  $\tau$  для випадку закону Вейбулла від відношення  $C_{n.p.} / C_{m.p.}$  і параметра форми  $\beta$  представлено на рис. 4,б. Неважно зауважити, що з ростом відношення  $C_{n.p.} / C_{m.p.}$  коефіцієнт оптимальності  $\tau$  також збільшується.

Крива оптимальної поведінки має найбільш простий і наглядний вид для випадку експоненціального закону розподілу (рис. 5). Вона не залежить від параметра закону  $\lambda$ , а визначається тільки відношенням  $C_{n.p.} / C_{m.p.}$  і зростає з його збільшенням. Цей факт дуже цінний на практиці.

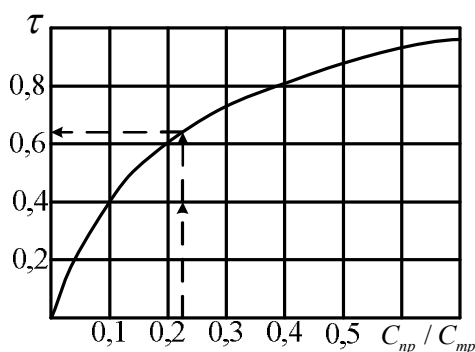


Рис. 5 – Залежність коефіцієнта оптимальності від відношення витрат для експоненціального закону розподілу

Дійсно, найбільш тривалим і важливим етапом експлуатації є сталий режим експлуатації рухомого складу тролейбусів, на якому відмови розподіляються в залежності з експоненціальним законом, хоча і мають зносний характер. Тому, знаючі відношення  $C_{n.p.} / C_{m.p.}$ , яке встановлюється під час статистичного спостереження, із графіка отримуємо значення коефіцієнта оптимальності  $\tau$ . Оптимальну періодичність діагностування визначимо з добутку оберненого значення параметра  $1/\lambda$  на  $\tau$ , тобто

$$l' = \tau / \lambda.$$

Наприклад, нехай  $\lambda = 0,08 \cdot 10^{-4}$ ,

$C_{n.p.} / C_{m.p.} = 0,40$ . Із графіка на рис. 5 отримуємо, що  $\tau = 0,80$ . Тоді оптимальна періодичність діагностування:

$$l' = \frac{\tau}{\lambda} = \frac{0,8}{0,08 \cdot 10^{-4}} = 10000 \text{ км.}$$

Таким чином, графіки дозволяють, не вдаючись до рішення складних рівнянь, отримувати оптимальну періодичність діагностування.

### Висновок

Отримано рівняння для визначення оптимальних режимів діагностування, які справедливі для всіх агрегатів, механізмів та вузлів, крім тих, що забезпечують безпеку руху.

Визначено оптимальні режими діагностики та коефіцієнт оптимальності  $\tau$ , який показує, у скільки разів оптимальна періодичність діагностування більше або менше середнього пробігу між відмовами при різних значеннях параметрів.

### Література

1. Шавкун В. М. Методи моніторингу параметрів тягових електричних двигунів в процесі експлуатації рухомого складу міського електротранспорту / В. М. Шавкун, В. М. Бушма // Комунальне господарство міст: Наук.-техн. зб. серія: технічні науки і архітектура. : ХНАМГ, 2011. – Вип. 97. – С. 272 – 278.
2. Шавкун В. М. Вплив періодичності діагностування на показники надійності тягових електродвигунів рухомого складу електротранспорту / В. М. Шавкун, С. П. Шацький // Комунальне господарство міст: Наук.-техн. зб. серія: технічні науки і архітектура. : ХНАМГ, 2011. – Вип. 101. – С. 265 – 269.
3. Будниченко В. Б. Планування потреби в електроенергії на експлуатацію міського електротранспорту за узагальненими статистичними даними / В. Б. Будниченко, В. Х. Далека, Е. І. Карпушин, М. В. Хворост // Сб. Коммунальное хозяйство городов, К.: Техніка. – 2001. – Вип. 30. – С. 249 – 254.

Рецензент: О.П. Смирнов, професор ХНАДУ. Стаття поступила до редакції 18 листопада 2017 р.