

В.М. Шавкун

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

РОЗРОБКА МОДЕЛІ НАДІЙНОСТІ, ЩО ВРАХОВУЄ ЗМІНИ СТАНУ КОНСТРУКТИВНИХ ВУЗЛІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МАШИНИ

Проаналізовано умови експлуатації електричних машин тролейбусів та визначено головні напрямки підвищення їх експлуатаційної надійності. Встановлено характер зміни стану конструктивних вузлів електричної машини у процесі експлуатації. Розроблено математичну модель надійності, що враховує зміни стану конструктивних вузлів електричної машини.

Ключові слова: електрична машина, модель надійності, діагностування, імовірність безвідмовної роботи, багатофакторний експеримент, діагностичний параметр.

Постановка проблеми

Під час розробки математичної моделі надійності електрична машина за часту розглядається як одне ціле. У цьому випадку модель надійності виходить досить складною і здебільшого неінформативною. Для більш якісної оцінки надійності доречно розробляти моделі, які враховували б зміну стану окремих конструктивних вузлів і елементів, а на їх основі оцінювати надійність електричної машини у цілому. Одним з підходів до вирішення поставленого завдання є побудова моделі надійності на основі аналізу статистичних даних, отриманих в результаті експериментів.

Під час побудови таких математичних моделей надійності широко використовуються методи теорії ймовірності та математичної статистики. Даний підхід є менш точним, але єдиним і ефективним рішенням на етапі проектування електричних машин.

Інший підхід розробки моделі надійності базується на теорії планування багатофакторного експерименту. При цьому з великої кількості параметрів, що характеризують електричну машину, вибираються основні, що впливають на надійність, а другорядні відкидаються. Даний підхід є більш точним, але не може бути реалізований на етапі проектування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Матеріали досліджень та досвід експлуатації тролейбусів свідчать, що на даний час відсутній ефективний контроль електричних машин, зокрема в процесі експлуатації, який дасть змогу значно підвищити стан електробезпеки під час експлуатації тролейбусів на маршрутах [1–3].

Аналіз умов експлуатації електродвигунів за останні роки свідчить про те, що надійність роботи

електроприводів у цілому не тільки досягла бажаного рівня, а навпаки, знизилася [4].

В умовах фізичного «старіння» тролейбусів, що відбувається на електричному транспорті України, підвищення надійності експлуатації тягового рухомого складу неможливо без впровадження ефективних методів контролю якості їх технічного обслуговування і ремонту.

При цьому для забезпечення необхідних обсягів і термінів перевезень, безпеки руху тролейбусів необхідно так будувати стратегію технічного обслуговування устаткування, щоб постійно підтримувати його надійність на гідному рівні, зменшувати час простою тролейбусів через несправність їхніх вузлів, агрегатів і систем. В цих умовах особливої уваги до себе, а точніше до оцінки стану, вимагає електроустаткування і, зокрема, тягові електродвигуни (ТЕД) постійного струму, оскільки вони відносяться до найбільш навантаженого електрообладнання з точки зору комплексного впливу теплових, електричних, механічних та кліматичних факторів.

Їх вихід з ладу в експлуатації складає біля 20 % за пошкодженнями і 30 % за кількістю заходжень на неплановий ремонт від відповідних видів відмов по всьому обладнанню [5, 6]. Основні причини низької надійності електричних машин в експлуатації – низька якість обслуговування, ремонту та пропуск дефектів при його контролі [7].

Таким чином, контроль параметрів електричних машин рухомого складу міського електричного транспорту з метою підвищення їх надійності у процесі експлуатації є задачею актуальною.

Формулювання мети та постановка задач

Метою роботи є обґрунтування структури і підходів до розробки моделі надійності, яка

враховувала б зміну стану конструктивних вузлів і елементів електричної машини.

Викладення основного матеріалу

Основні напрямки підвищення експлуатаційної надійності тягових електродвигунів тролейбусів.

Відмови тягових електродвигунів багато в чому залежать від властивостей конструкції, матеріалів, режимів навантаження і умов експлуатації.

Кількісно вони можуть оцінюватися за ймовірністю – статистичними характеристиками.

Властивості елементів тягових електродвигунів і характер факторів, які впливають, можуть бути різними. Тому зміна параметрів елементів системи в процесі експлуатації різна. В одних випадках вони призводять до поступових відмов, у других – до раптових, у третіх – до їх поєднань. Так, наприклад, такі деталі як електроціпки, ізоляція, підшипники, колектор можуть мати, в основному, поступові відмови.

Вал якоря, шихтовка заліза, кріплення полюсів, раптові відмови. Якщо розглядати властивості елементів глибше, то всі елементи можуть поєднувати поступові і раптові відмови. Різниця лише в тому, що їх співвідношення сильно відрізняються і залежать від правильного вибору навантаження і міцності елемента.

Питанню підвищення надійності тролейбусів присвячена значна кількість робіт [8–11], зокрема оцінці і прогнозуванню надійності: структурно-функціональні; логіко-імовірнісні і логіко-структурні; структурно-імовірнісні. Однак у більшості випадків вони не відповідають необхідним вимогам, тобто не забезпечують максимальної точності оцінки і прогнозу.

Історія розвитку і вдосконалення методів оцінки надійності дозволяє виділити два основних етапи: дослідження статистичних параметрів і вивчення фізико-статистичних характеристик.

Порівняння методів, з точки зору точності отриманих параметрів і адекватності модельованих процесів, дозволяє виділити їх особливості. Статистичні методи дають оцінку надійності за даними спостережень в експлуатації або стендових випробувань системи на підставі характеристик відмов.

Фізико-статистичні методи передбачають дослідження і виявлення закономірностей впливу вхідних факторів, які прискорюють знос деталей. Це дозволяє сформулювати моделі надійності системи, що враховують вплив експлуатаційних факторів на їх надійність.

Важливим і актуальним у цьому напрямку є розробка шляхів підвищення надійності технічних систем, які передбачають підвищення працездатності елементів систем, зниження

навантажень, сприйманих елементами системи з метою створення полегшеного режиму, а також використання в необхідних випадках резервування деталей і вузлів машин.

Вибір того чи іншого способу регламентується технічним завданням на проектування, умовами експлуатації і наведеними сумарними витратами на виготовлення продукції.

Мірою надійності електричної машини і в загалі кожного обладнання є інтенсивність відмов у роботі. Якщо відмови відсутні, обладнання має стовідсоткову надійність, але якщо інтенсивність відмов висока – обладнання ненадійне. Під відмовою у теорії надійності розуміється подія, після виникнення якої електрична машина втрачає свою здатність виконувати задані функції.

Прогнозування зміни показників надійності електричних машин постійного струму включає в себе передбачення зміни стану машини на основі аналізу її параметрів, систематичної оцінки отриманих даних та визначення імовірності відмов окремих вузлів та машини в цілому. Прогнозування показників надійності включає в себе найбільш точну оцінку працездатності тягових електричних двигунів.

Зокрема, закон Вейбула виражається [12]:

$$P(t) = \exp[-\lambda t^\alpha], \quad (1)$$

де λ, α – параметри.

Імовірність безвідмовної роботи протягом напрацювання системи $t_1 \div t_2$, за умови працездатності до початку інтервалу визначається за формулою:

$$P(t_1, t_2) = \frac{\exp[-\int_0^{t_1} \lambda(x) dx]}{\exp[-\int_0^{t_2} \lambda(x) dx]}, \quad (2)$$

де $\lambda(x)$ – потік відмов елементів тягових електричних двигунів [12].

Діагностування є в даний час одним з основних напрямів удосконалення системи ремонту техніки, підвищення її надійності в експлуатації, тому що воно сприяє виявленню відмов випадкового характеру в міжремонтні періоди.

Для вирішення завдання досить використання простої моделі надійності, отриманої з використанням положень теорії планування багатфакторного експерименту, в якій об'єкт досліджень представляється у вигляді схеми

(рис. 1), заснованої на принципі «чорного ящика» і характеризується наступною групою параметрів:

- 1) керуючі (вхідні) x_i – впливові фактори;
- 2) вихідні параметри y_i – показники надійності конструктивного вузла або елемента;
- 3) w_i – впливи.

Передбачається, що впливи не підлягають контролю і або є випадковими, або змінюються в часі. Кожен фактор x_i має область визначення, яка повинна бути встановлена до проведення експерименту. На практиці метою багатофакторного експерименту є встановлення залежності $y = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$, яка описує поведінку об'єкта.

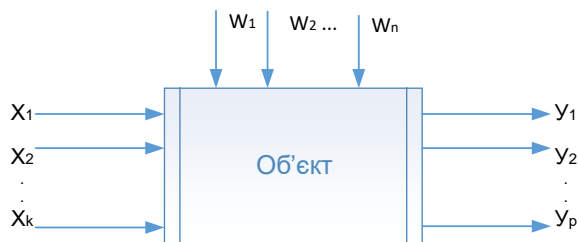


Рис. 1. Схема багатофакторного експерименту

Електрична машина є складним об'єктом, що об'єднує невідновлювані та відновлювані вузли. При цьому велика кількість конструктивних вузлів і елементів підлягають ремонту або заміні. Тому критерієм вибору основних конструктивних вузлів є частота їх відмов. Так, для асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором такими вузлами є обмотка статора і підшипниковий вузол, а в разі фазного ротора, крім того – обмотка ротора і вузол контактних кілець. Для машин постійного струму – обмотки: якоря, збудження, додаткових полюсів, компенсаційна; щіткоколекторний і підшипникові вузли. Для синхронних машин – обмотки статора і збудження, вузли контактних кілець і підшипникові вузли. Для кожного вузла повинна бути розроблена математична модель, а на її основі – методика розрахунку надійності.

Як впливає зі сказаного, надійність електричної машини в значній мірі визначається надійністю обмоток, яка, в свою чергу, залежить від стану ізоляції. руйнування ізоляції відбувається в результаті нагрівання, механічних зусиль, впливу вологи, агресивних середовищ і інших чинників. В високовольтних машинах істотне значення має вплив електричного поля, що характеризується перенасиченням.

Для більшості електричних машин підшипникові вузли є другою за значимістю після обмотки джерело відмов, а в машинах малої потужності і в високошвидкісних машинах відмови через зносу і пошкоджень підшипникових вузлів

часто стають переважаючими. аномальна робота підшипникового вузла виявляється по надмірного підвищення температури, шуму, витoku мастила, підвищення опору при обертанні і збільшення моменту рушання. Причини, що призводять до цього, – вплив температури і механічні дії.

Працездатність і довговічність колекторного вузла визначаються взаємодією трьох груп основних факторів, пов'язаних з електромагнітними процесами, механічними впливами і фізико-хімічною природою ковзного контакту.

З вищевикладеного випливає, що різні фактори, що впливають на термін служби конструктивних вузлів електричних машин, для кожного вузла і елемента свої. Так, для колекторного вузла впливають факторами служать температура θ_k колектора, амплітуда A вібрації і частота обертання n ротора; для підшипникового вузла – температура θ_n і частота обертання n ; для обмотки – температура θ_o , амплітуда вібрації A . Амплітуда вібрації A і частота обертання n характерні і для контактних кілець. Розрахунок моделей повинен проводитися відповідно до плану повного факторного експерименту типу 2^k , де k – число факторів.

Число дослідів для таких планів $N = 2^k$. Ці плани дозволяють отримати моделі типу

$$A_i = \frac{\sum_{n=1}^N y_n x_{in}}{N}, \quad (3)$$

де n – номер дослідів;

N – кількість дослідів;

y_n – значення y в n -му досліді.

Розробка моделі надійності з використанням методів планування експерименту повинна включати наступні етапи:

1. На підставі існуючої інформації електрична машина розбивається на вузли, що мають найбільшу ймовірність виходу з ладу: підшипниковий вузол, колекторний вузол двигуна постійного струму, контактні кільця синхронного генератора, ізоляція обмоток і апаратура управління.

2. Вибираються фактори форсування для конструктивних вузлів і елементів. Аналіз окремих вузлів розглянутих спеціальних електричних машин показує, що найбільш ефективними факторами форсування є теплове і механічне впливи.

3. Визначаються контрольні параметри і критерії відмови окремих вузлів.

4. Проводяться попередні випробування з метою пошуку таких сукупностей факторів форсування, які найбільш повно характеризують надійність конструктивних вузлів і елементів. Для проведення подібних попередніх випробувань

пропонується використовувати повний факторний експеримент 2³.

Кожен з дослідів проводиться до відмови всіх досліджуваних вузлів. Значення критеріїв працездатності вузлів вимірюються безперервно або дискретно.

Отримані експериментальні дані дають можливість в загальному випадку визначити надійність по кожному з вузлів – підшипниковому, колекторного, контактних кілець і обмотці. спільне їх розгляд дозволяє отримати єдину модель надійності для всієї електричної машини.

Узагальнена математична модель будується з урахуванням факторів, що впливають на надійність конструктивних вузлів і елементів, з подальшим їх об'єднанням отриманих залежностей на основі співвідношення:

$$P_p(t) = P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t). \quad (4)$$

де $P_1(t), P_2(t), P_3(t), P_4(t)$ – ймовірності безвідмовної роботи конструктивних вузлів і елементів.

Висновки

В роботі запропоновано підхід до розробки моделі надійності, що враховує зміну стану конструктивних вузлів і елементів електричної машини.

Обрані основні конструктивні вузли, показаний підхід до розробки їх моделей надійності і на їх основі – загальної моделі надійності всієї електричної машини.

Література

1. Яцун М.А. *Експлуатація та діагностування електричних машин і апаратів* / М.А. Яцун, А.М. Яцун. – Львів.: «Львівська політехніка», 2010. – 228 с.
2. Шавкун В.М. *Исследование влияния эксплуатационных факторов на параметры нагружения силового электрооборудования троллейбусов* / В.М. Шавкун, А.А. Певная, О.Б. Уваров // *Научное периодическое издание "OMEGA SCIENCE"*. – Уфа: 2015. ISSN 2410 – 700X, № 11, в двух частях. Ч. 1, С. 64–67.
3. Далека В.Х. *Технічна експлуатація міського електричного транспорту: навч. посібник* / В.Х. Далека, В.Б. Будниченко, Е.І. Карпушин, В.І. Коваленко. – Х. : ХНУМГ, 2014. – 235 с.
4. Шавкун В.М. *До питання підвищення надійності тягових електричних двигунів та ресурсозбереження на рухомому складі міського електричного транспорту: Наук.-техн. зб.* / В.М. Шавкун // *Комунальне господарство міст, серія: технічні науки і архітектура. ХНАМГ.* – 2010. – Вип. 97. – С. 272–278.
5. Castaldi P., Tilli A. *Parameters estimation of induction motor at standstill with magnetic flux monitoring* // *Accepted for the publication on IEEE Transaction on Control System Technology: to appear.*

6. Peresada S., Montanari M., Till A., Bolotnikov A. *A speed-sensorless indirect field-oriented control for induction motor: theoreticfl result and experimental evaluation* // *зб. наук. пр. Дніпродзержинського державного університету. Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика.* – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2007. – С. 60–65.
7. H. Douglas, P.Pillay, A Ziarani. *Detection of broken rotor bars in induction motors using wavelet analysis* // *IEEE transactions on industrial electronics, Vol. 50.* – № 3, 2003. – P. 452–460.
8. Stefan Jennifer, Bodson Marc. *Real-time estimation of the parameters and fluxes of induction motors* // *IEEE Transactions on Industrial Applications.* – 1994. – Vol. 30. – N 3. – P. 746–759.
9. *Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрооборудования* / С.И. Лукьянов, А.С. Карандаев, А.С. Сарваров и др. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова, 2014. № 1(45). С. 129–134.*
10. Neelam Mehala, Ratna Dahiya. *Motor current signature analysis and its applications in induction motor fault diagnosis. International journal of systems applications, engineering & development.* – 2007. – N° 1. – pp 29–35.
11. Сінчук, О.М. *До проблеми побудови комплексної, безперервної системи діагностики тягових електричних машин рухомого складу* / О.М. Сінчук, Д.Л. Сушко // *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля.* – Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2003. № 9(67). – С. 25–28.
12. Шавкун В.М. *Діагностування тягових електричних машин електротранспорту* / В.М. Шавкун // *Восточно-европейский журнал передовых технологий. Вып. 1/7(67).* – 2014, С. 48–52.

References

1. Yatsun, M., (2010). Operations and diagnostics of electric machines and apparatuses, 228.
2. Shavkun, V., (2015). Investigation of the influence of operational factors on the loading parameters of power electrical equipment of trolleybuses. Scientific Periodical Publication «Omega science», 11, 64–67.
3. Daleka, V., (2014). Technical Operation of Urban Electric Transport, 235.
4. Shavkun, V., (2010). On the issue of increasing the reliability of traction electric motors and resource conservation on the rolling stock of urban electric transport. *Komunalne gospodarstvo mist*, 97, 272–278.
5. Castaldi, P., Tilli, A. Parameters estimation of induction motor at standstill with magnetic flux monitoring. Accepted for the publication on IEEE Transaction on Control System Technology: to appear.
6. Peresada, S., Montanari, M., Till, A., Bolotnikov, A., (2007). A speed-sensorless indirect field-oriented control for induction motor: theoreticfl result and experimental evaluation. *Problemy avtomatyzovanogo elektroprivoda*, 60–65.
7. Douglas, H., Pillay, P., Ziarani, A., (2003). Detection of broken rotor bars in induction motors using wavelet analysis. *IEEE transactions on industrial electronics*, 3, 452–460.

8. Jennifer, B., Marc, S. (2004). Real-time estimation of the parameters and fluxes of induction motors. IEEE Transactions on Industrial Applications, 3, 746–759.
9. Lukianov, S., Karandaev, A., Sarvarov, A. and others. (2014). Development and implementation of intelektualni systems of diagnosing the technical condition elektrooborudovaniya. Bulletin of Magnitogorsk state technical University. G. I. Nosova, 1(45), 129–134.
10. Mehala, N., Ratna, D., (2007). Motor current signature analysis and its applications in induction motor fault diagnosis. International journal of systems applications, engineering & development, 1. 29–35.
11. Sinchuk, O., (2003). To the problem of construction of a complex, continuous system of diagnostics of traction electric vehicles of rolling stock. Bulletin of the East-Ukrainian National University named after. V. Dal., 9 (67), 25–28.

12. Shavkun, V., (2014). Diagnosis of traction electric vehicles of electric vehicles. East-European magazine of advanced technologies, 1/7 (67), 48–52.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. каф. охорони праці та безпеки життєдіяльності Хворост М.В., 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 – ym.shavkun@gmail.com
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3253-1282>

DEVELOPMENT OF A RELIABILITY MODEL THAT TAKES INTO ACCOUNT CHANGES IN THE STATE OF STRUCTURAL COMPONENTS OF ELECTRICAL MACHINES

V.M. Shavkun

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

Statistic data concerning the trolleybuses operations in Ukraine prove that reliability of traction electric engines has been reduced for subjective and objective reasons over the past 10-15 years. New developments and the use of technologies are therefore needed for more effective use of the known technical equipment, its modernization, reliability improvement and extending the service life.

To determine the effectiveness of trolleybus operation on the route, the modern methods of reliability assessment of the traction electric engines are used, which allow to get adequate characteristics of the structure, functional links of parts and units.

Improving public transport services is linked to the efficient operation of urban electric transport. It depends on the capabilities and quality of individual components and units of rolling stock. In addition, power supply and traffic control systems play an important role.

An important technical and economic indicator of quality for each technical system of electric transport or product is the concept of reliability, which characterizes the level of operating conditions of the main elements and characteristics of traction electric motors.

One of the main criteria for the reliability of traction motors is the reliability of operation during operation.

The conditions of operation of electric machines of trolley buses are analyzed and the main directions of increasing their operational reliability are determined. The nature of the change in the state of structural units of an electric machine during operation has been established. A mathematical model of reliability has been developed that takes into account changes in the state of structural units of an electric machine.

Keywords: electrical machine, reliability model, diagnostics, probability of failure-free operation, multifactor experiment, diagnostic parameter.