

**ПРОЕКТУВАННЯ, ВИРОБНИЦТВО, СЕРВІС ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ  
ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ**

УДК 621.313

**АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ БЕЗКОЛЕКТОРНИХ  
ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ЛОКОМОТИВІВ**

**ANALYSIS OF THE OPERATIONAL RELIABILITY OF BRUSHLESS  
LOCOMOTIVE TRACTION MOTORS**

*канд. техн. наук В. П. Нерубацький*

*Український державний університет залізничного транспорту (м. Харків)*

*V. P. Nerubatskyi, PhD (Tech.)*

*Ukrainian State University of Railway Transport (Kharkiv)*

Експлуатаційна надійність безколекторних тягових двигунів (БТД) є ключовим чинником забезпечення ефективної та безперебійної роботи сучасних локомотивів. Перехід від колекторних машин до безколекторних обумовлений необхідністю підвищення ресурсу тягового приводу, зменшення витрат на технічне обслуговування та забезпечення більшої стійкості до дестабілізуючих факторів експлуатаційних умов. Зростання обсягів перевезень та потреба в енергоощадних транспортних системах актуалізують завдання комплексного аналізу характеристик надійності БТД з урахуванням їх конструктивних, теплових, електромагнітних і механічних особливостей.

Безколекторні тягові двигуни локомотивів (переважно асинхронні та синхронні з постійними магнітами) характеризуються відсутністю колектора та щіткового апарату, що дає змогу усунути одну з найбільш ненадійних ланок традиційних машин, підвищеною термічною стійкістю обмоток статора, можливістю точного керування моментом і швидкістю завдяки застосування силової електроніки, широким діапазоном регулювання тягових характеристик.

У процесі роботи надійність БТД визначається якістю теплообміну, рівнем електромагнітних навантажень, стійкістю ізоляції, балансуванню ротора, якістю мастила, а також стабільністю методів керування. Інтенсивні тягові режими локомотивів створюють значні теплові та механічні навантаження, що потребує ретельного аналізу параметрів надійності.

Для оцінювання надійності БТД використовуються такі основні показники [1]:

- середній наробіток на відмову, що характеризує середню тривалість безвідмовної роботи двигуна;
- інтенсивність відмов, що відображає частоту виникнення відмов у часі;

- ймовірність безвідмовної роботи, що показує здатність двигуна функціонувати без відмов протягом заданого часу;
- коефіцієнт готовності, що визначає частку часу, коли тяговий двигун перебуває у працездатному стані;
- ремонтна складність, що характеризує необхідні ресурси для усунення відмов та відновлення працездатності.

Високий рівень цих показників є критичним для тягових двигунів, оскільки їхня відмова безпосередньо впливає на роботу локомотива та безпеку руху.

Умовно відмови БТД можна поділити на такі групи:

- електричні відмови – пробої або деградація ізоляції статора, міжвиткові короткі замикання, відмови датчиків температури та струму, порушення роботи систем живлення та перетворювачів;
- механічні відмови – зношення підшипникових вузлів, дисбаланс ротора, пошкодження валу через вібрації або ударні навантаження, ослаблення кріплень активних частин;
- теплові відмови – перегрів обмоток внаслідок недостатньої вентиляції, старіння лакоізоляційних матеріалів, локальні гарячі точки в активній сталі;
- відмови системи керування – некоректні сигнали інвертора, збої алгоритмів прямого керування моментом або векторного керування, помилки у вимірюванні фазних струмів та положення ротора.

Аналіз експлуатаційних даних показує, що найбільшу частку становлять теплові та механічні відмови, оскільки тягові двигуни працюють при високих струмах, значних перевантаженням і в умовах постійної вібрації [2, 3].

Серед ключових факторів впливу слід виділити температурний режим (підвищення температури на кожні 10 °С зменшує ресурс ізоляції вдвічі, що обумовлює необхідність оптимізації тепловідведення), якість перетворювачів (надійність інверторів визначає стабільність роботи двигуна), умови експлуатації локомотива (запиленість, вологість, вібрації та механічні удари негативно впливають на підшипники та ізоляцію), коректність алгоритмів керування (нечітке або нестабільне керування може спричинити зростання електромагнітних навантажень і появу гармонік у струмі), точність діагностики (наявність систем раннього виявлення дефектів – вібраційний моніторинг, контроль температури, аналіз спектра струму – суттєво підвищує загальну надійність приводу).

Для підвищення надійності БТД необхідно застосовувати такі інженерні рішення, як використання високотемпературних ізоляційних матеріалів класу H або N, встановлення підшипників підвищеної вантажопідйомності та з покращеним мастильним ресурсом, впровадження систем активної діагностики (теплова, вібраційна, струмова), оптимізація алгоритмів керування, використання більш ефективних систем охолодження, застосування перетворювачів із високонадійними силовими модулями [4, 5].

Таким чином, експлуатаційна надійність безколекторних тягових двигунів є одним із ключових критеріїв ефективності сучасних локомотивів. Аналіз відмов вказує на те, що основними чинниками зниження надійності є теплові та механічні навантаження, а також відмови силової електроніки. Підвищення

ресурсу БТД вимагає застосування комплексного підходу, який передбачає вдосконалення конструкції двигунів, покращення систем охолодження, впровадження інтелектуальних методів керування й розвинених систем моніторингу технічного стану. Застосування цих підходів дозволяє істотно збільшити напрацювання на відмову, зменшити експлуатаційні витрати і покращити енергоефективність локомотивного парку.

- [1] Martuyshv N. V., Malozyomov B. V., Sorokova S. N., Efremkov E. A., Valuev D. V., Qi M. (2023). Review models and methods for determining and predicting the reliability of technical systems and transport. *Mathematics*. 2023. Vol. 11, Iss. 15. 3317. <https://doi.org/10.3390/math11153317>.
- [2] Nerubatskyi V. P. Investigation of the influence of external factors on the efficiency of locomotive traction motors. *Матеріали XIII міжнародної науково-практичної конференції «Людина, суспільство, комунікативні технології»* (Харків, УкрДУЗТ, 24 жовтня 2025 р.). Дніпро: Середняк Т. К., 2025. С. 217–219.
- [3] Нерубацький В. П. Моніторинг технічного стану безколекторних тягових двигунів завдяки залученню цифрових технологій сьогодення. *Тези доповідей 6-ї міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології»* (Харків, УкрДУЗТ, 24–26 листопада 2025 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2025. С. 81–83.
- [4] Papkov A. V., Berezinetz N. I., Kireev A. V., Pak V. M. Longevity tests of class-H insulation systems (180°C) in locomotive traction motors. *R. Electrical Engineering*. 2011. Vol. 82. P. 189–191. <https://doi.org/10.3103/S1068371211040134>.
- [5] Nategh S., Boglietti A., Liu Y., Barber D., Brammer R., Lindberg D. A review on different aspects of traction motor design for railway applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2020. Vol. 56, Iss. 3. P. 2148–2157. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2968414>.

**УДК 656.22**

## **УДОСКОНАЛЕННЯ ПІДВ'ЯЗКИ ЛОКОМОТИВІВ ДО ПОЇЗДІВ НА ОСНОВІ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

### **IMPROVEMENT OF LOCOMOTIVE CONNECTING TO TRAINS BASED ON SIMULATION MODELING**

***П.В. Долгополов, канд. техн. наук., П.Р. Пелех, Р.І. Хлебик***  
*Український державний університет залізничного транспорту (м. Харків)*

***P. Dolgoplov, PhD (Tech.), P. Pelekh, R. Khliebyk***  
*Ukrainian State University of Railway Transport (Kharkiv)*

Важливою умовою ефективної експлуатаційної роботи залізниці є відповідність можливостей залізничної інфраструктури, зокрема ресурсів локомотивного господарства кількості поїздів, що планується пропустити впродовж кожного оперативного періоду (зміни, доби). Недотримання цього балансу може призвести до серйозних затримок перевізного процесу, що веде до збільшення витрат [1]. Стабільність руху поїздів не тільки від колійного розвитку і систем автоматики, а і від експлуатованого парку локомотивів у депо і інших факторів [2].

Тому у даній роботі побудована імітаційна модель у термінах математичного апарату кольорових мереж Петрі, що враховує нерівномірність