

ЗАХИСТ КОЛЕКТОРА ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ ЕЛЕКТРОВОЗА ВІД ПОШКОДЖЕННЯ ДУГОВИМ РОЗРЯДОМ

В.Ю. Торгашов¹, М.О. Баб'як²

¹асистент кафедри залізничного транспорту,
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна,
ORCID ID: 0009-0003-9369-2121

²к.т.н., доцент кафедри залізничного транспорту,
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-5125-9133

Анотація

До залізничного транспорту висуваються високі вимоги щодо його безпеки та надійності. Вихід з ладу електровоза може ставити під загрозу безпеку руху, а також призвести до матеріальних та економічних витрат. Одними з найвразливіших елементів електричного рухомого складу залізниць є тягові електричні двигуни, які на багатьох електровозах мають значний термін експлуатації. Внаслідок значного вичерпання ресурсу та через важкі умови експлуатації збільшується імовірність виникнення несправностей як у механічній, так і в електричній частинах двигуна. Особливу увагу варто приділити несправностям, які пов'язані із щіточно-колекторним вузлом тягового електричного двигуна. Розглянувши причини виходу з ладу колекторних електричних двигунів різних серій електровозів, видно, що значний відсоток виходів з ладу пов'язаний із пошкодженням саме щіточно-колекторного вузла. Основною причиною такої закономірності є фізична взаємодія двох контактів, які рухаються один стосовно одного, що породжує можливість виникнення електричної дуги між ними. У цій роботі розглянуто причини виникнення дугового розряду в щіточно-колекторному вузлі тягового електричного двигуна електровоза, що може призводити до серйозних пошкоджень та відмов у роботі. Проаналізовано наявні методи діагностики тягових двигунів, визначено їхні переваги та недоліки. Розроблено методику виявлення утворення дуги у щіточно-колекторному вузлі на основі вимірювання інтенсивності ультрафіолетового випромінювання. Розроблено систему захисту двигуна, яка базується на програмованому логічному контролері. Обґрунтовано доцільність та ефективність впровадження такої системи на електровозах для підвищення надійності тягових електродвигунів та зниження експлуатаційних витрат. Оскільки на локомотивах, що експлуатуються в Україні, колекторні електричні машини застосовуються не лише для утворення тягового зусилля, а й для генерації струму збудження, напруги власних потреб та для роботи інших агрегатів, логічним розвитком описаної у роботі теми може стати удосконалення системи для виконання захисту допоміжних машин електровозів. У перспективі це дозволило б ще більше збільшити надійність та продуктивність роботи електрорухомого складу залізниць.

Ключові слова: тяговий електричний двигун, щіточно-колекторний вузол, електрична дуга, діагностика.

**PROTECTION OF ELECTRIC LOCOMOTIVE TRACTION MOTOR
COLLECTOR AGAINST DAMAGE BY ARC DISCHARGE**

V.Yu. Torhashov¹, M.O. Babyak²

¹Assistant at the Department of Railway Transport,
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine,
ORCID ID: 0009-0003-9369-2121

²Ph.D., Associate Professor at the Department of Railway Transport,
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-5125-9133

Summary

High requirements are imposed on railway transport in terms of its safety and reliability. The failure of an electric locomotive can jeopardize traffic safety, as well as lead to material and economic costs. One of the most vulnerable elements of the electric rolling stock of railways are traction electric motors, which on many electric locomotives have a significant service life. Due to significant depletion of the resource and due to difficult operating conditions, the likelihood of malfunctions in both the mechanical and electrical parts of the engine increases. Particular attention should be paid to malfunctions associated with the brush-commutator assembly of the traction electric motor. Having considered the causes of the failure of collector electric motors of various series of electric locomotives, it is clear that a significant percentage of failures is associated with damage to the brush-commutator assembly. The main reason for this pattern is the physical interaction of two contacts that move relative to each other, which creates the possibility of an electric arc between them. This paper examines the causes of arc discharge in the brush-commutator assembly of the traction electric motor of an electric locomotive, which can lead to serious damage and failures. Existing methods of diagnosing traction motors are analyzed, their advantages and disadvantages are determined. A method for detecting arc formation in the brush-commutator assembly based on measuring the intensity of ultraviolet radiation is developed. An engine protection system based on a programmable logic controller is developed. The feasibility and effectiveness of implementing such a system on electric locomotives to increase the reliability of traction electric motors and reduce operating costs is substantiated. Since on locomotives operated in Ukraine, DC electric machines are used not only to generate traction force, but also to generate excitation current, voltage for their own needs and for the operation of other units, a logical development of the topic described in the paper can be the improvement of the system for protecting auxiliary machines of electric locomotives. In the future, this would further increase the reliability and productivity of electric railway rolling stock.

Key words: traction electric motor, brush-commutator assembly, electric arc, diagnostics.

Актуальність дослідження. Залізничний транспорт відіграє важливу роль у забезпеченні вантажних і пасажирських перевезень, зберігаючи стратегічне значення для економіки України.

Надійність і ефективність роботи локомотивного парку є важливою умовою стабільного функціонування залізничної галузі.

Високі вимоги до безпеки руху та необхідність покращення економічних показників роботи залізниці породжують необхідність збереження та підвищення надійності роботи всього обладнання тягового рухомого складу. Особливу увагу приділяють тяговим електричним двигунам (ТЕД), які забезпечують безпосередню реалізацію тягового зусилля електровоза. Надійність їх роботи суттєво впливає на загальну працездатність локомотива, а відмова або пошкодження таких вузлів може призвести до аварійних ситуацій та простоїв.

У зв'язку з цим розробка і впровадження методики виявлення та запобігання появи раптових несправностей тягових електричних двигунів є актуальною і практично значущою.

Постановка проблеми. Однією з вразливих частин тягового електричного двигуна, який застосовується на електровозах, є його щіточно-колекторний вузол. Він призначений для комутації обмоток якоря, які обертаються, у визначений момент часу, який залежить від конструкції тягового двигуна, та передачі електричного струму від нерухомих контактних елементів, що називаються щітками, які кріпляться в щіткотримачі до нерухомого остова.

Конструкцію колектора двигуна постійного струму показано на рисунку 1.

Основними елементами щітково-колекторного вузла є набір мідних пластин, до півників яких підключається обмотка якоря. Поверхні пластин торкаються графітові щітки, які утримуються на місці корпусом щіткотримача та притискаються пружиною із необхідною силою для забезпечення номінального натиску щіток, що є важливим для надійної роботи вузла.

Схематичне зображення конструкції щіткотримача електродвигуна постійного струму та траверси, на якій він кріпиться, показано на рисунку 2.

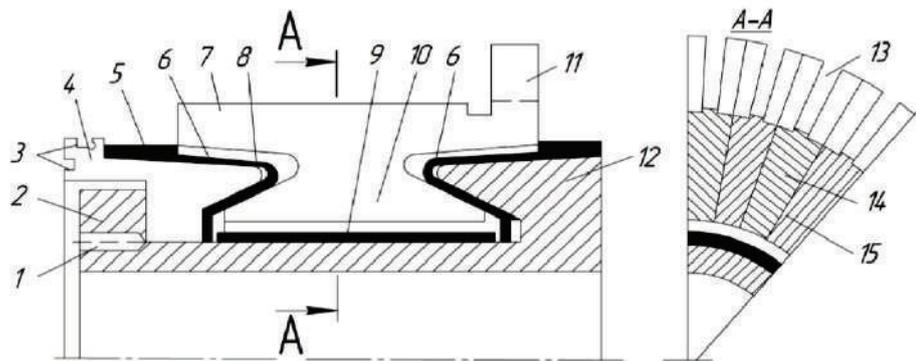


Рис. 1. Конструкція колектора на сталевій втулці [1]:

1 – стопорний гвинт; 2 – гайка; 3 – кільцеві канавки для балансувальних вантажів; 4 – конус натискання; 5 – бандаж; 6 – ізоляційні міканітові манжети; 7 – робоча частина колекторної пластини; 8 – зазор; 9 – ізоляційний циліндр; 10 – ластівчин хвіст; 11 – півник; 12 – корпус колектора (сталеві втулка); 13 – шліц у півнику; 14 – комплект колекторних пластин; 15 – колекторна міканітова прокладка

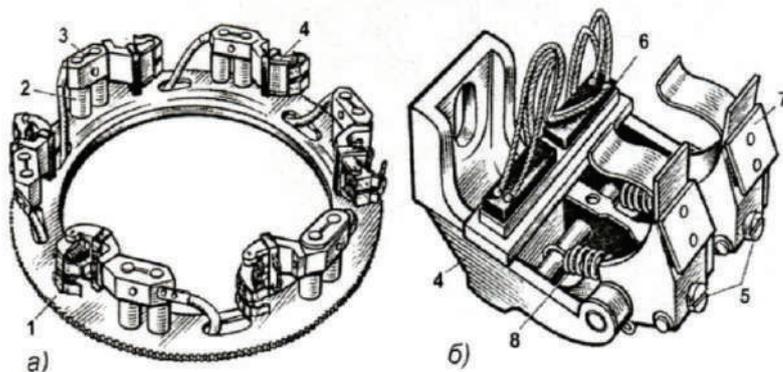


Рис. 2. Траверса (а) і щіткотримач (б) тягового електродвигуна постійного струму [2]: 1 – траверса; 2 – палець; 3 – кронштейн; 4 – щіткотримач; 5 – регулювальні гвинти; 6 – щітка; 7 – поворотний кронштейн; 8 – пружина

На ТЕД для покращення робочих параметрів застосовуються розрізні щітки, які запобігають заклинюванню щітки, а також мають меншу імовірність відриву від поверхні колекторних пластин, що важливо для запобігання утворення дуги.

Кількість пластин, щіток, їх розміри та інші параметри щіточно-колекторного вузла можуть відрізнятися залежно від типу двигуна.

Проте спільним недоліком усіх колекторних електродвигунів є те, що під час роботи на колекторі може виникати іскріння, яке за певних умов може перерости у круговий вогонь.

Є декілька причин появи іскріння щіток, серед основних можна виділити неправильний натиск щіток на колектор, надмірне зношення щіток, закусування щітки у щіткотримачі, нерівності на поверхні колектора.

Оскільки електрична дуга має значну температуру, вона може викликати перегрівання зони контакту, що може призвести до пошкодження колекторних пластин або корпусу колектора, з можливим утворенням напливів, задирів та зтягування робочої поверхні колекторних пластин та інших пошкоджень, що показано на рисунках 3, 4.



Рис. 3. Пошкодження колектора, що викликані утворенням електричної дуги та натисканням щіток [3]



Рис. 4. Зварювання колекторних пластин між собою під дією електричної дуги та натисканням щіток [3]

Пошкоджений колектор зазвичай викликає ще більше іскріння, що значно погіршує його стан. Тривалий процес іскріння може призвести до кругового вогня та до зварювання колекторних пластин між собою, що показано на рисунку 4.

У разі таких пошкоджень досить часто виникає необхідність виконання колісно-моторного блоку з-під електровоза та ремонту тягового двигуна. Проточування колекторних пластин стає неможливим, що вимагає капітального ремонту або заміни якоря.

Раннє виявлення появи дугового розряду на щіточно-колекторному вузлі дозволило б зменшити витрати на ремонт тягових електричних двигунів, а також зменшити ймовірність їх виходу з ладу під час виконання поїзної роботи.

На залізницях України використовуються різні електровози, у яких застосовується застаріла елементна база або її немає зовсім. На більшості серій електровозів впроваджено лише захист від короткого замикання у двигунах, боксування і перевантаження.

Тому в цій роботі пропонується вирішити проблему пошкодження ТЕД електрорухомого складу під дією електричної дуги.

Теоретичний аналіз дослідження. У більшості відомих досліджень пропонується захист ТЕД на основі прямого вимірювання параметрів електричного кола, в яке включено тяговий електричний двигун. Виникнення іскріння викликає специфічні завади в колі, які можна виявити шляхом прямого виміру параметрів електричної схеми електровоза, а саме струму та напруги на колекторах двигунів [4; 5; 6; 7].

За допомогою математичних перетворень отриманих значень система повинна визначити наявність іскріння.

Недоліком такого методу є застосування прямого вимірювання параметрів із високою частотою вибірки, що на електровозі практично неможливо через значну кількість електромагнітних завод різних частот. Однією з основних проблем є величина напруги, що подається на колектор ТЕД.

Також у цій системі виникають помилкові спрацювання, оскільки в колі ТЕД використовуються електропневматичні контактори, на яких виникають значні дугові розряди при комутаціях.

У роботі [8] подавалися пропозиції вимірювання рівня електромагнітних завад від двигуна через індуктивні датчики на його корпусі. Під час виникнення дугового розряду утворюються специфічні електромагнітні завади, які індукують струм у котушці датчика.

Схематично розміщення датчика показано на рисунку 5.

Отримані сигнали обробляються за допомогою математичних перетворень та дозволяють зробити висновок про наявність дугового розряду та його інтенсивність.

Такий метод не вимагає втручання в коло. Проте в реальних умовах роботи електрорухомого складу залізниці така система працюватиме нестабільно через велику кількість електромагнітних завад, які генеруються усіма складниками електровоза, а також вимагає високоточного і дорогого обладнання та його налаштування під конкретний тип двигуна.

Тому впровадження такого методу є проблематичним і недоцільним в умовах залізничного транспорту.

Проаналізувавши наявні методи виявлення електричної дуги на колекторі, можна зробити висновок про недосконалість різних систем для використання їх на електрорухомому складі, що вимагає узагальнення та удосконалення відомих методів.

Мета роботи. У цьому дослідженні проводиться аналіз роботи розробленої авторами інноваційної системи моніторингу й захисту тягових електродвигунів електрорухомого складу від виникнення електричної дуги, яка може призвести до негативних наслідків.

Завдання дослідження:

1. Аналіз фізичного механізму виникнення та розвитку електричної дуги у щіточно-колекторному вузлі тягового електродвигуна та визначення параметрів дугового розряду, за якими можливе його виявлення.

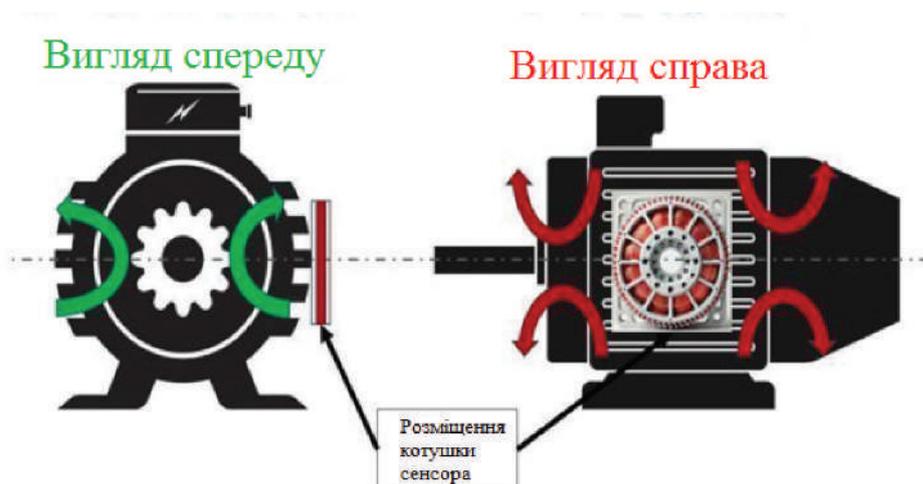


Рис. 5. Схематичне зображення розміщення датчика електромагнітних завад на корпусі двигуна [8]

2. Розробка архітектури інноваційної системи моніторингу, що поєднує сенсорні елементи та методи обробки сигналів, для виявлення дугового розряду.

Основний матеріал дослідження. Прямі вимірювання динаміки струму та напруги у колі тягових електричних двигунів електровозів є вкрай ускладненими через високу напругу живлення (1500 В). Тому доцільно вибрати не струм та напругу, а інший параметр, який дозволить відслідковувати електричну дугу, що виникає на колекторі.

Розглянувши характеристики електричної дуги, відомо, що вона породжує не лише електромагнітні завади, а й певну кількість світлового випромінювання у видимому діапазоні.

Проаналізувавши результати дослідження [9], що наведені на рисунку 6, спостерігається схожість спектрів дуги, з яких випливає, що стовп дугового розряду випромінює електромагнітні хвилі довжиною, близькою до 300 нм.

Тобто можна сказати, що у спектрі електричної дуги переважає ультрафіолетове випромінювання, довжина хвилі якого практично не залежить від частоти модуляції струму в електричному розряді.

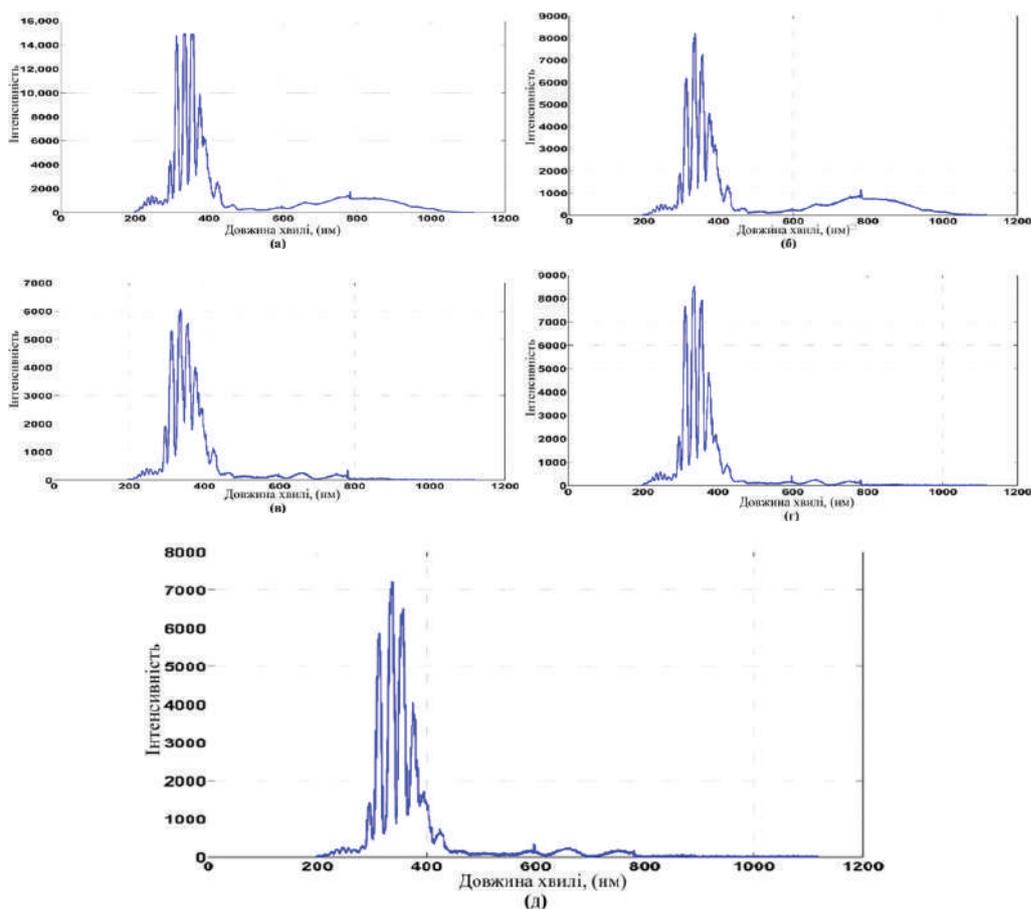


Рис. 6. Залежності інтенсивності світлового випромінювання електричної дуги від довжини електромагнітної хвилі за різних частот модуляції електричного струму: а) 13,5 кГц; б) 20,0 кГц; в) 80,0 кГц; г) 100,0 кГц; д) 150,0 кГц [9]

За результатами цього аналізу для виявлення дугового розряду між щіткою і колектором нами пропонується використовувати датчик ультрафіолетового випромінювання.

Основна перевага такої пропозиції полягає у новій технології виявлення дуги в тягових електричних двигунах електрорухомого складу. При цьому використовується доволі проста конструкція вимірювального комплексу без застосування дорогих і складних високоточних пристроїв.

Однак за такого підходу слід припустити мінімальну ймовірність хибних спрацювань від сонячного випромінювання.

Але тягові електричні двигуни виготовляються у щільно закритому корпусі та розташовані під кузовом електровоза.

Додатково більша частина корпусу двигуна закрита рамою візка. Тому потрапляння сонячного ультрафіолету всередину тягового електричного двигуна мало ймовірне.

Розглянемо ще одне припущення, за якого мізерна кількість сонячного ультрафіолету може потрапити через вентиляційну решітку. Навіть у разі такого мало ймовірного випадку випромінюванню доведеться відбитися декілька разів від масивного корпусу, що зменшить його інтенсивність до мінімуму.

Ще одним фактором, який зменшує ймовірність потрапляння сонячного ультрафіолету на датчик, є те, що на більшості тягових електродвигунів повітря для охолодження подається зі сторони колектора, і вихлопний кожух знаходиться з іншої сторони якоря.

За такої конструкції шлях для можливого ультрафіолетового випромінювання додатково перекривається якорем.

Як детектор використовується фотодіод зі світлофільтром, який працює в ультрафіолетовому діапазоні. У разі потрапляння у вікно детектора ультрафіолетового випромінювання через фотодіод починає протікати струм, що пропорційний інтенсивності випромінювання.

Для цього дослідження нами вибрано фотодіод GFUV-T10GD-L, що має лінійну залежність струму, який протікає через нього, від потужності випромінювання, яке вимірюється в мВт/см². Струмова характеристика фотодіода GFUV-T10GD-L наведена на рисунку 7.

Фотодіод встановлюється всередині корпусу тягового електродвигуна разом із платою підсилювача та за допомогою дротового підключення передає сигнал до керуючого елементу системи, що розташовують у кузові електровоза.

Як керуючий елемент використовується програмований логічний контролер (ПЛК), який отримує та аналізує інформацію з датчиків. На основі результатів аналізу ПЛК робить висновок про виявлення несправності щіточно-колекторного вузла.

Згідно з характеристикою, що зображена на рисунку 5, фотодіод видає сигнал величиною від 0 до 1,5 мкА. Такий сигнал неможливо передати на значну відстань, особливо в умовах електровоза, який генерує значну кількість електромагнітних завад.

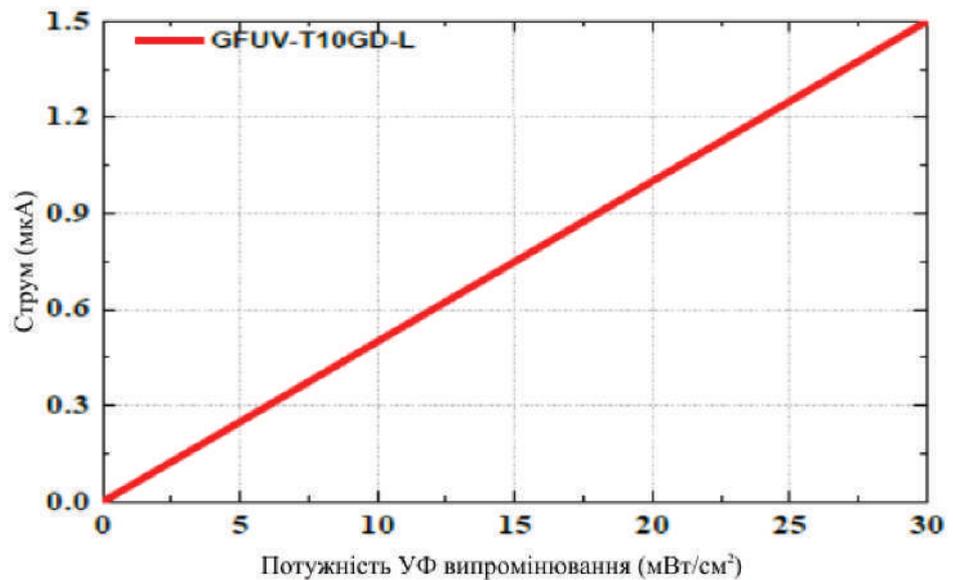


Рис. 7. Залежність струму від інтенсивності випромінювання для фотодіода GFUV-T10GD-L у разі опромінення його лампою з довжиною хвилі 222 нм [10]

Для вирішення цієї проблеми на фотодіод встановлюється плата підсилювача, яка перетворює слабкий сигнал фотодіода на промисловий стандарт 4...20 мА.

Перетворений сигнал подається на аналоговий вхід ПЛК.

Передача сигналу струмом, а не напругою збільшує його завадозахищеність, що є особливо важливим у реальних умовах експлуатації електричного транспорту залізниць.

Аналізуючи сигнали, ПЛК отримує інформацію про наявність іскріння на колекторі тягового електродвигуна та у разі перевищення допустимих значень сигналізує машиністу про несправність.

У разі ігнорування машиністом сигналу від системи виконується розбирання силового кола з метою захисту двигуна від подальшого пошкодження.

У більшості електровозів, що експлуатуються в Україні, на кожній секції застосовується осьова формула 2o-2o, тобто чотири моторних осі розділені на два візки [4; 5; 6; 7].

У такій конфігурації кількість ТЕД на одній секції становить чотири, а отже, і входів ПЛК для реалізації захисту також необхідно чотири.

Серед популярних рішень таким параметрам задовольняє ПЛК від SIMENS, а саме S7-1200 з модулем розширення SM1231. Проте таке рішення є дорогим і недоцільним через його можливості, які не будуть застосовуватися повною мірою, та значну вартість.

Як ПЛК нами пропонується вибрати контролер виробництва компанії Unitrionics. Згідно з каталогом пристроїв [11] є два можливих варіанти, а саме окремий модуль вводу/виводу, який працює через Ethernet, та ПЛК серії VISION. Оскільки для першого варіанту необхідний додатковий ПЛК, що є недоцільним, нами вибрано VISION V130-J-TR6.

Для вибору порогового значення спрацювання системи проводиться вибірка замірів інтенсивності випромінювання у справних двигунах та ТЕД з різними пошкодженнями, які викликають іскріння на колекторі. З кожного заміру вибирається максимальне і мінімальне значення інтенсивності вхідного сигналу. Отримані значення дозволяють отримати діапазон інтенсивності випромінювання справного та несправного тягового двигуна. Між діапазонами інтенсивності випромінювання у справних та несправних ТЕД логічно очікувати проміжок, в який не потрапляє значення інтенсивності випромінювання ні справних, ні несправних двигунів, посередині якого вибирається порогове значення спрацювання розробленої системи захисту. Визначення конкретного значення порогу спрацювання системи потребує проведення додаткових досліджень для отримання релевантної вибірки значень інтенсивності випромінювання за різних типів пошкоджень.

Висновки. Впровадження описаної вище системи захисту тягових електричних двигунів за розробленою нами методикою виявлення утворення дуги у щіточно-колекторному вузлі на основі вимірювання інтенсивності ультрафіолетового випромінювання всередині корпусу двигуна дозволить вчасно попередити утворення дугового розряду на колекторі та запобігти значним пошкодженням внаслідок перегріву контактних поверхонь колекторних пластин.

Своєю чергою це дозволяє покращити надійність роботи тягових електричних двигунів та електровоза загалом, що повинно призвести до зменшення ймовірності простою рухомого складу.

Розроблена нами система захисту тягових електричних двигунів дозволяє зменшити витрати на ремонт як тягового двигунів, так і електровозів загалом, що дозволяє її впровадження вважати актуальним та виправданим.

Подальшим напрямом розвитку описаної в роботі системи може стати виконання захисту не лише тягових електродвигунів, а й допоміжних електричних машин, в яких також застосовуються колектори.

ЛІТЕРАТУРА

1. Проектування електричних машин : навчальний посібник / Д.В. Ципленков та ін. Дніпро : Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 2020. 408 с.
2. Тягові електродвигуни вантажних електровозів. URL: <https://raillook.com/materialy/transport/jeleznodorojniy/tyagoviypodvijnoi-sostav/tyagovi-elektrodviguni-vantazhnih-elektrovoziv-docx> (дата звернення: 11.06.2025).
3. Щіточно-колекторний вузол тягового електродвигуна. Особистий архів автора, 2025.
4. Martínez Iglesias M.E., Antonino-Daviu J.A., Dunai L., Conejero J.A., Fernández de Córdoba P. Higher-Order Spectral Analysis and Artificial Intelligence for Diagnosing Faults in Electrical Machines: An Overview. *Mathematics*. 2024. T. 12. № 24. P. 4032. DOI: 10.3390/math12244032.
5. Babyak M., Neduzha L. Transportation Optimization of Homogeneous Freight in the Transport Systems. *Proceedings of the 26th International*

- Conference “Transport Means”. Kaunas, Lithuania, 5–7 October 2022. P. 755–760. DOI: 10.5755/e01.2351-7034.2022.P2.
6. Babyak M., Keršys R., Neduzha L. Improving the dependability evaluation technique of a transport vehicle. *Transport Means : Proceedings of International Conference*. 2020. P. 646–651.
 7. Babyak M., Horobets V., Sychenko V., Horobets Y. Comparative tests of contact elements at current collectors in order to comprehensively assess their operational performance. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. T. 6, № 12 (96). P. 13–21. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.151751.
 8. Salas-Robles J.E., Biot-Monterde V., Antonino-Daviu J.A. Current and Stray Flux Combined Analysis for Sparking Detection in DC Motors / Generators Using Shannon Entropy. *Entropy*. 2024. T. 26. № 9. P. 744. DOI: 10.3390/e26090744.
 9. Nagi L., Koziol M., Zygarlicki J. Optical Radiation from an Electric Arc at Different Frequencies. *Energies*. 2020. T. 13. № 7. P. 1676. DOI: 10.3390/en13071676.
 10. GFUV-T10GD-LUV photodiode datasheet. URL: <https://www.oec-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/04/OEC-GFUV-T10GD-L.pdf> (дата звернення: 23.06.2025)
 11. Unitronics. All products catalog – Global. URL: https://www.unitronicsplc.com/Website/Technica_Support/Product_catalogs/All_products_catalog_Global.pdf (дата звернення: 23.06.2025).

REFERENCES

1. Tsiplenkov, D.V., Ivanov, O.B., Bobrov, O.V., Kuznetsov, V.V., Artemchuk, V.V., & Bab’iak, M.O. (2020). Design of electric machines: Textbook [Electronic resource]. Dnipro : National Technical University “Dnipro Polytechnic”, 408 p.
2. Traction electric motors of freight locomotives (2018, July 18). [Electronic resource]. URL: <https://raillook.com/materialy/transport/jeznodorojniy/tyagoviy-podvijnoi-sostav/tyagovi-elektrodiviguni-vantazhnih-elektrovoziv-docx>
3. Author’s own photo. (2025). Brush-commutator assembly of a traction electric motor [Photograph]. Personal archive.
4. Martínez Iglesias, M.E., Antonino-Daviu, J.A., Dunai, L., Conejero, J.A., & Fernández de Córdoba, P. (2024). Higher-order spectral analysis and artificial intelligence for diagnosing faults in electrical machines: An overview. *Mathematics*. 12 (24), 4032. DOI: <https://doi.org/10.3390/math12244032>.
5. Babyak, M., & Neduzha, L. (2022). Transportation optimization of homogeneous freight in the transport systems. In Proceedings of the 26th International Conference “Transport Means” (pp. 755–760). Kaunas, Lithuania, October 5–7. DOI: <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2022.P2>.
6. Babyak, M., Keršys, R., & Neduzha, L. (2020). Improving the dependability evaluation technique of a transport vehicle. *Transport Means : Proceedings of the International Conference*. 646–651.

7. Babyak, M., Horobets, V., Sychenko, V., & Horobets, Y. (2018). Comparative tests of contact elements at current collectors in order to comprehensively assess their operational performance. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 6 (12 (96)). 13–21. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.151751>.
8. Salas-Robles, J.E., Biot-Monterde, V., & Antonino-Daviu, J.A. (2024). Current and stray flux combined analysis for sparking detection in DC motors/generators using Shannon entropy. *Entropy*. 26 (9). 744. DOI: <https://doi.org/10.3390/e26090744>.
9. Nagi, Ł., Koziół, M., & Zygarlicki, J. (2020). Optical radiation from an electric arc at different frequencies. *Energies*. 13 (7). 1676. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13071676>.
10. GFUV-T10GD-L UV photodiode datasheet. (n.d.). OEC GmbH. URL: <https://www.oec-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/04/OEC-GFUV-T10GD-L.pdf>
11. Unitronics. (n.d.). All products catalog – Global. URL: https://www.unitronicsplc.com/Website/Technical_Support/Product_catalogs/All_products_catalog_Global.pdf

Дата першого надходження статті до видання: 27.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 26.11.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті: 26.12.2025