

СТРУКТУРА ПРИСТРОЮ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЩІТКОВО-КОЛЕКТОРНОГО ВУЗЛА ТЯГОВОГО ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

¹Вінницький національний технічний університет

Найбільша кількість відмов тягового електродвигуна постійного струму припадає на його щітково-колекторний вузол. Причинами цих відмов є неякісне налагодження комутації, зношення щіток та регулярні перевантаження тягового електродвигуна. Кожна з них характеризується іскрінням в перехідному контакті щітка–колектор, що погіршує технічний стан самого щітково-колекторного вузла й енергетичних показників функціонування тягового двигуна в цілому та впливає на залишковий ресурс останнього. Встановлено, що передумовою надійної експлуатації тягового електродвигуна постійного струму є визначення технічного стану його щітково-колекторного вузла.

З метою підвищення надійності роботи тягового електродвигуна постійного струму розроблено структуру пристрою для ідентифікації технічного стану його щітково-колекторного вузла. Ця структура враховує достатню кількість контрольованих параметрів, що дозволяють сформулювати діагностичні ознаки щітково-колекторного вузла та визначити залишковий ресурс щіток.

Синтезована структура пристрою дозволяє: фіксувати наявність та визначити інтенсивність іскріння на колекторі; фіксувати час початку та закінчення іскріння під щіткою, тривалість імпульсів іскріння; визначити значення середнього квадратичного відхилення тривалості імпульсів іскріння по колектору на його виході та значення середнього квадратичного відхилення тривалості імпульсів іскріння по всіх колекторних пластинах, які іскрять, в часі; визначити величину зношення щітки; швидкість зношення щітки; залишковий ресурс щітки; визначити биття колектора. У разі перевищення допустимого чи порогового значення будь-якого з параметрів передбачене інформування на відповідному індикаторі та спрацювання кола сигналізації.

Ідентифікація зазначених параметрів щітково-колекторного вузла тягового електродвигуна дозволить визначити джерела підвищеного іскріння, розробити шляхи підвищення якості комутації за рахунок зменшення іскріння.

Ключові слова: щітково-колекторний вузол, щітка, колектор, тяговий двигун, двигун постійного струму, технічний стан, ідентифікація, залишковий ресурс, інтенсивність іскріння, зношення щітки, биття колектора.

Вступ

На щітково-колекторний вузол тягового двигуна постійного струму припадає найбільша кількість відмов (більше 25 %) відносно інших елементів конструкції двигуна [1]. Основними причинами такої статистики є неякісне налагодження комутації, зношення щіток та регулярні перевантаження двигуна [2]. Кожна з них характеризується іскрінням між щіткою та колектором, що погіршує технічний стан самого щітково-колекторного вузла та енергетичних показників функціонування тягового двигуна в цілому, впливаючи на ресурс останнього. Тому, однією з передумов надійної експлуатації тягового електродвигуна постійного струму є визначення технічного стану його щітково-колекторного вузла.

Аналітичне дослідження комутації тягових двигунів розглянуто в [3], а математичне моделювання несправностей щітково-колекторного вузла здійснено в [4]. В роботі [5] запропоновано метод визначення величини іскріння на колекторі, а метод оцінки інтенсивності зношення щіток — в роботі [6]. В [7] пропонується комплексно оцінювати якість виконаного ремонту колекторно-щіткового вузла електродвигуна з використанням fuzzy-логіки. Особливості діагностування щітково-колекторного вузла розглянуті в [8], [9]. Шляхи збільшення ресурсу щіток описані в [10]. В [11] розроблено цифровий прилад контролю комутації тягових електродвигунів. Алгоритм прогнозу-

вання ресурсу щіток запропоновано в [12].

В розглянутих роботах для визначення технічного стану щітково-колекторного вузла тягового двигуна постійного струму або не враховані деякі параметри, що характеризують комутацію в перехідному контакті щітка-колектор, або досліджені пристрої для діагностування цього процесу, які не дозволяють одночасно оцінювати тривалість та амплітуду іскріння на колекторі, величину та швидкість зношення щіток, биття колектора, залишковий ресурс щіток.

Метою роботи є підвищення надійності роботи тягового електродвигуна постійного струму шляхом удосконалення структури пристрою для ідентифікації технічного стану його щітково-колекторного вузла за рахунок збільшення кількості контрольованих параметрів, які впливають на зменшення ресурсу цього вузла.

Результати дослідження

За результатами дослідження синтезовано структуру пристрою для ідентифікації технічного стану щітково-колекторного вузла тягового двигуна постійного струму, показано на рис. 1.

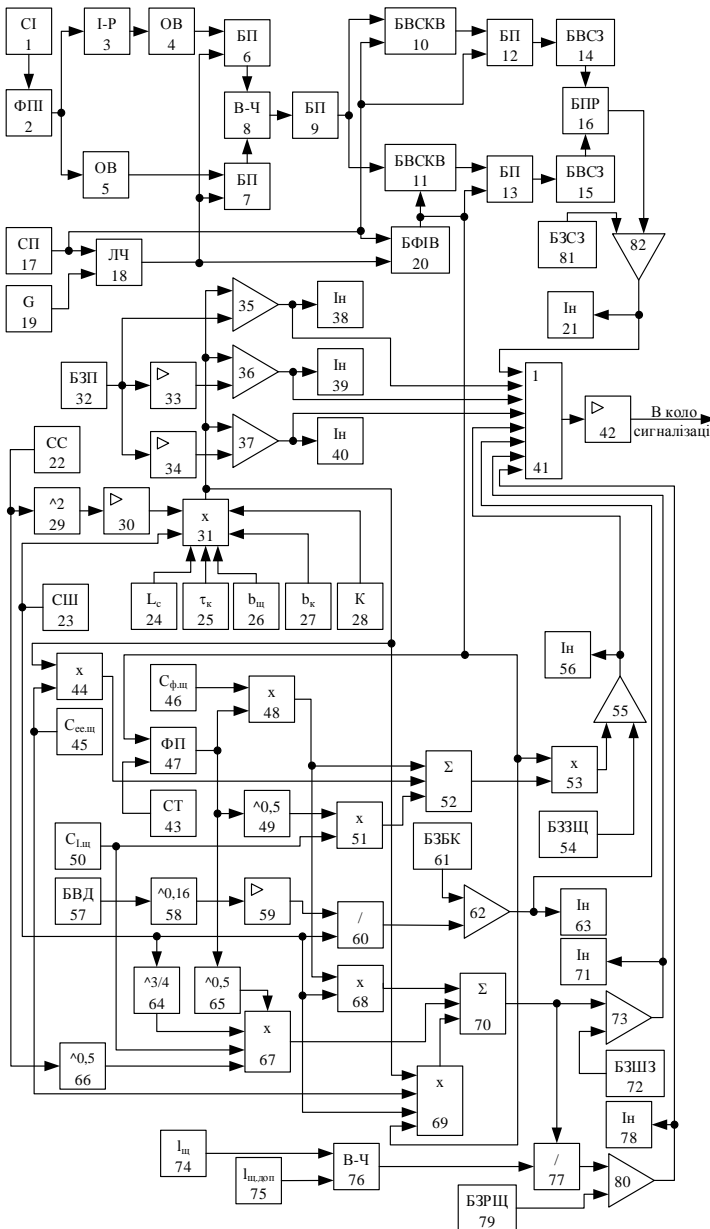


Рис. 1. Структура пристрою для ідентифікації технічного стану щітково-колекторного вузла тягового двигуна постійного струму

струмової складової зношення щітки; 52, 70 — перший та другий суматори; 54 — блок задання максимального зношення щітки; 57 — блок визначення діаметра колектора; 58 — блок піднесення до ступеня 0,16; 60, 77 — перший та другий блоки ділення, відповідно; 61 — блок задання биття колектора;

На рис. 1 використано такі позначення: 1 — сенсор імпульсів; 2 — формувач прямокутних імпульсів; 3 — інвертор; 4, 5 — перший і другий одновібратори, відповідно; 6, 7, 9, 12, 13 — перший–п’ятий блоки пам’яті, відповідно; 8, 76 — перший та другий блоки віднімання, відповідно; 10, 11 — перший та другий блоки визначення середнього квадратичного відхилення, відповідно; 14, 15 — перший та другий блоки визначення середнього значення, відповідно; 16 — блок прийняття рішення; 17 — сенсор положення; 18 — лічильник; 19 — генератор прямокутних імпульсів; 20 — блок формування інтервалу вимірювання; 21, 38, 39, 40, 56, 63, 71, 78 — перший–восьмий індикатори, відповідно; 22 — сенсор струму; 23 — сенсор швидкості; 24 — блок задання індуктивності секції; 25 — блок задання колекторного ділення; 26 — блок задання ширини щітки; 27 — блок задання ширини колекторної пластини; 28 — блок задання кількості колекторних пластин; 29 — блок піднесення до квадрату; 30, 33, 34, 42, 59 — перший–п’ятий підсилювачі, відповідно; 31, 44, 48, 51, 53, 67, 68, 69 — перший–восьмий блоки множення, відповідно; 32 — блок задання потужності; 35, 36, 37, 55, 62, 73, 80, 82 — перший–восьмий компаратори, відповідно; 41 — логічний елемент АБО; 43 — сенсор тиску; 45 — блок задання коефіцієнта ерозійної складової зношення щітки; 46 — блок задання коефіцієнта фрикційної складової зношення щітки; 47 — функціональний перетворювач; 49, 65, 66 — перший–третій блоки піднесення до ступеня 0,5; 50 — блок задання коефіцієнта

64 — блок піднесення до ступеня 3/4; 72 — блок задання швидкості зношення щіток; 74 — блок визначення довжини щітки; 75 — блок задання мінімально допустимої довжини щітки, 79 — блок задання ресурсу щіток; 81 — блок задання порогового значення середньоквадратичного відхилення тривалості імпульсів іскріння.

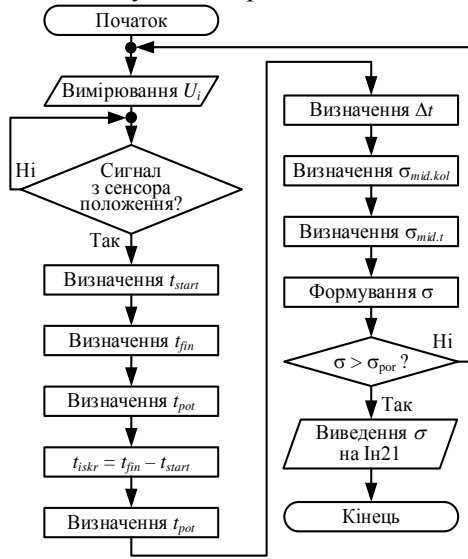


Рис. 2. Алгоритм визначення тривалості імпульсів іскріння в колекторі і в часі

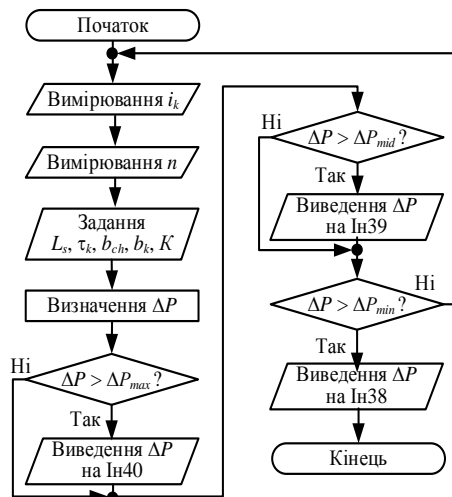


Рис. 3. Алгоритм визначення амплітуди іскріння

У блоках 1—20 здійснюється визначення тривалості імпульсів іскріння t_{iskr} , значень середнього квадратичного відхилення тривалості імпульсів іскріння по колектору $\sigma_{mid.kol}$ на його виході та середньоквадратичного відхилення тривалості імпульсів іскріння $\sigma_{mid.t}$ по всіх колекторних пластинах, що іскрять, в часі. Алгоритм цього процесу подано на рис. 2.

Імпульси напруги іскрових розрядів U_i вимірюються сенсором імпульсів 1, який розміщують біля краю робочої щітки, що іскрить, на колекторі. Початок імпульсу іскріння t_{start} формується на виході другого однофазного генератора 5, а час закінчення імпульсу іскріння t_{fin} — на виході першого однофазного генератора 4. Початок обертання колектора фіксується сенсором положення 17. Поточне значення часу t_{pot} формується у вигляді коду на виході лічильника 18.

Тривалість імпульсів іскріння формується на виході блока віднімання 8

$$t_{iskr} = t_{fin} - t_{start}. \quad (1)$$

Середнє значення середньоквадратичного відхилення тривалості імпульсів іскріння по колектору $\sigma_{mid.kol}$ формується на виході першого блока визначення середнього значення 14, а значення середньоквадратичного відхилення тривалості імпульсів іскріння $\sigma_{mid.t}$ по всіх колекторних пластинах, що іскрять, в часі — на виході другого блока визначення середнього значення 15. Один цикл вимірювання здійснюється впродовж часового проміжку Δt , що формується блоком формування інтервалу вимірювання.

У блоках 22—40 здійснюється визначення наявності та інтенсивності іскріння на колекторі. Алгоритм цього процесу подано на рис. 3.

Струм i_k , що протікає через щітку, вимірюється сенсором струму 22, а швидкість обертання колектора n — сенсором швидкості 23. В блоках 24—28 задані значення індуктивності секції L_s , колекторного ділення τ_k , ширини щітки b_{ch} , ширини колекторної пластини b_k та число колекторних пластин K . Потужність, яка виділяється під щіткою [2]

$$\Delta P = \frac{L_s i_k^2}{2\tau_k b_{ch}} \cdot \frac{K b_k n}{60}, \quad (2)$$

формується на виході першого блока множення 31, за значенням якої для конкретної електричної машини можна визначати наявність та інтенсивність іскріння на колекторі.

Мінімально допустимий рівень іскріння ΔP_{min} заданий в блоці задання потужності 32. Середній ΔP_{mid} та максимально допустимий ΔP_{max} рівні іскріння формуються на виходах другого 33 та третього 34 підсилювачів. За умови

$$\Delta P \geq \Delta P_{min} \vee \Delta P \geq \Delta P_{mid} \vee \Delta P \geq \Delta P_{max}, \quad (3)$$

що характеризує наявність іскріння на колекторі на початковій стадії, середнього та інтенсивного іскріння, відповідно, інформація відобразиться на відповідних другому–четвертому індикаторах 38—40 та подаватиметься на входи логічного елемента АБО 41.

У блоках 43—53 визначається величина зношення щітки ΔR_{ch} . Алгоритм цього процесу подано на рис. 4.

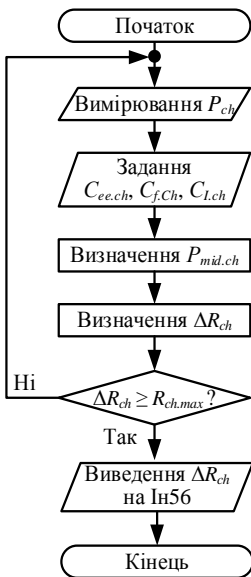


Рис. 4. Алгоритм визначення величини зношення щітки

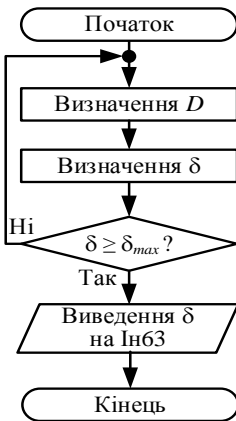


Рис. 5. Алгоритм визначення биття колектора

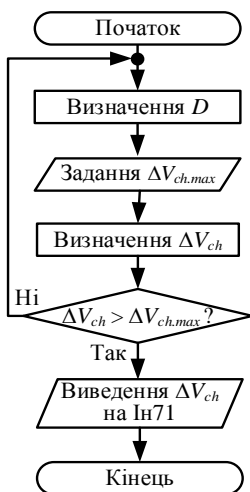


Рис. 6. Алгоритм визначення швидкості зношення щітки

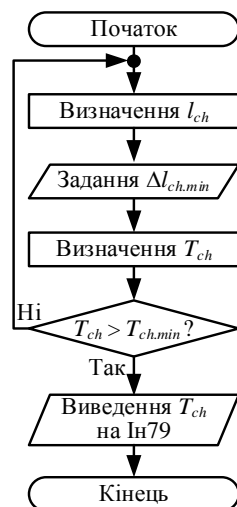


Рис. 7. Алгоритм визначення залишкового ресурсу щітки

Натиск щітки P_{ch} на колектор вимірюється сенсором тиску 43. У блоках 45, 46, 50 записані значення коефіцієнтів складових зношення щітки: ерозійної $C_{ee.ch}$, фрикційної $C_{f.ch}$ та струмової $C_{l.ch}$. Функціональним перетворювачем 47 розраховується середнє значення тиску $P_{mid.ch}$ щітки на часовому проміжку Δt . Значення величини зношення щітки [9]

$$\Delta R_{ch} = (C_{f.ch} P_{mid.ch} + C_{l.ch} P_{mid.ch}^{0.5} + C_{ee.ch} \Delta P) \cdot \Delta t, \quad (4)$$

формується на виході п'ятого блока множення 53, яке далі порівнюється з максимально допустимим значенням $\Delta R_{ch,max}$, записаного в блоці задання максимального зношення щітки 54. У випадку, коли $\Delta R_{ch} \geq \Delta R_{ch,max}$, інформація з'являється на п'ятому індикаторі 56 та подається на вхід логічного елемента АБО 41.

У блоках 57—60 розраховується биття колектора. Алгоритм цього процесу показано на рис. 5.

Діаметр колектора D визначається у блоці 57. Значення биття колектора формується на виході першого блока ділення 60

$$\delta = 0,047 \cdot \frac{D^{0,16}}{n}, \quad (5)$$

яке порівнюється з максимально допустимим значенням δ_{max} , що записане у блоці 61. У випадку, коли $\delta \geq \delta_{max}$, що відповідає критичному значенню биття колектора, інформація з'являється на шостому індикаторі 63 та подається на вхід логічного елемента АБО 41.

У блоках 64—70 розраховується швидкість зношення щітки [1]

$$\Delta V_{ch} = n C_{f.ch} P_{mid.ch} + n^{3/4} l_k^{0,5} C_{l.ch} P_{mid.ch}^{0,5} + n C_{ee.ch} W, \quad (6)$$

де W — енергія іскріння.

Значення ΔV_{ch} формується на виході суматора 70, яке порівнюється з допустимим значенням швидкості зношення щітки $\Delta V_{ch,max}$, записаного в блоці 72. Якщо $\Delta V_{ch} > \Delta V_{ch,max}$, інформація відображається на сьомому індикаторі 71 та подається на вхід логічного елемента АБО 41.

Алгоритм визначення швидкості зношення щітки показаний на рис. 6.

У блоках 74—77 розраховується залишковий ресурс щітки T_{ch} . Алгоритм цього процесу подано на рис. 7.

Значення поточної довжини щітки l_{ch} визначається блоком 74, а мінімально допустима довжина щітки $l_{ch,min}$ записана у блоці 75. Значення залишкового ресурсу щітки [1]

$$T_{ch} = \frac{l_{ch} - l_{ch,min}}{\Delta V_{ch}} \quad (7)$$

формується на виході другого блока ділення 77, яке порівнюється з мінімальним допустимим значенням $T_{ch,min}$, записаним в блоці 79. Якщо $T_{ch} > T_{ch,min}$, інформація надходить на восьмий індикатор 78 та подається на вхід логічного елемента АБО 41.

Висновки

Синтезована структура пристрою для ідентифікації технічного стану щітково-колекторного вузла тягового двигуна постійного струму дозволяє комплексно визначати поточні параметри двигуна, на підставі яких можна розробляти шляхи підвищення якості комутації за рахунок зменшення іскріння.

Враховуючи характер імпульсів напруги іскрових розрядів та положення щітки, можна визначати

час початку імпульсу іскріння та час його закінчення, розраховуючи тривалість самого імпульсу з можливістю запам'ятовування, розраховувати значення середньоквадратичного відхилення тривалості імпульсів іскріння за кілька обертів якоря, формуючи середнє значення середньоквадратичного відхилення тривалості імпульсів іскріння по колектору, а також розраховувати значення середньоквадратичного відхилення тривалості імпульсів іскріння по кожній окремій колекторній пластині, формуючи усереднене значення середньоквадратичного відхилення тривалості імпульсів іскріння по всіх колекторних пластинах, що іскрять, в часі.

За значенням потужності, що виділяється під щіткою, для конкретної електричної машини можна визначати інтенсивність іскріння на колекторі за трьома рівнями: допустиме, середнє, максимально допустиме. З урахуванням середнього значення тиску щітки на колектор, енергії іскріння та інших показників визначається величина й швидкість зношення щітки та залишковий її ресурс, а також биття колектора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. В. Харламов, Д. И. Попов, М. Ф. Байсадыков, и Д. В. Супоня, «Разработка методики предиктивного анализа ресурса щеток тяговых электродвигателей подвижного состава по условиям эксплуатации,» *Известия Транссиба*, № 1 (45), с. 2-11, 2021.
- [2] M. P. Rozvodiuk, "Monitoring of technical condition of the dc electric motor," in *Wissenschaft für den modernen Menschen: innovative technik und technologie, informatik sicherheitssysteme, verkehrsentwicklung, architektur: monografische Reihe «Europäische Wissenschaft»*. Karlsruhe, Germany: ScientificWorld-NetAkhatAV, Buch 4, Teil 4, 2021, pp. 29-38. <https://doi.org/10.30890/2709-2313.2021-04-04-071> . ISBN 29 978-3-949059-12-4. [Electronic resource]. Available: <https://www.sworld.com.ua/simpge4/sge4-04.pdf> .
- [3] В. М. Безрученко, і А. В. Шаповалов, «Аналітичне дослідження комутації тягових двигунів», *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В.Лазаряна*, вип. 32, с. 159-161, 2010. <https://doi.org/10.15802/stp2010/13357> .
- [4] Н. В. Ивченков, «Математическое моделирование неисправностей щеточно-коллекторного узла машины постоянного тока,» *Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського*, вип. 4/2009 (57), с. 160-163, 2009.
- [5] А. А. Осадченко, А. А. Цукублин, и О. Л. Рапопорт, «Мониторинг щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя при эксплуатации,» *Известия Томского политехнического университета*, т. 308, № 7, с. 107-109, 2005.
- [6] М. Байсадыков, «Разработка метода оценки интенсивности изнашивания и алгоритма прогнозирования остаточного ресурса щеток тяговых электродвигателей.» автореф. дис. канд. техн. наук за спец. 05.09.01, Электромеханика и электрические аппараты. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения», Омск, 2020, 20 с.
- [7] П. К. Шкодун, и А. В. Долгова, «Применение аппарата нечеткой логики при диагностировании коллекторно-щеточного узла тяговых электрических двигателей подвижного состава,» *Известия Транссиба*, № 4 (28), с. 59-68, 2016.
- [8] В. В. Харламов, П. В. Шкодун, А. С. Хлопцов, и А. В. Долгова, «Формирование граф-модели диагностирования коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя с учетом тепловых факторов,» *Известия Томского политехнического университета*, т. 337, №1, с. 88-95, 2016.
- [9] М. П. Розводюк, і К. М. Розводюк, «Діагностування щітково-колекторного вузла електричного двигуна постійного струму,» *International periodic scientific journal «Modern engineering and innovative technologies»*, is. 11, part 3, pp. 32-39, March 2020. Karlsruhe, Germany: Sergeieva&Co. <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2020-11-01-043>.
- [10] О. С. Качин, А. С. Каракулов, и А. Б. Серов, «Анализ факторов, влияющих на интенсивность изнашивания щеток электрических машин и пути увеличения их срока службы,» *Электротехника. Электротехнология. Энергетика: в 3 ч., сб. науч. тр. VII Международной научной конференции молодых ученых. Ч. 1. Секция «Электротехника»*, Новосибирск, РФ: изд-во НГТУ, 2015, с. 34-40.
- [11] В. В. Харламов, Д. И. Попов, и А. И. Стретенцев, «Разработка цифрового прибора контроля коммутации тяговых электродвигателей подвижного состава,» *Известия Транссиба*, № 2 (30), с. 54-64, 2017.
- [12] В. В. Харламов, Д. И. Попов, и М. Ф. Байсадыков, «Алгоритм прогнозирования ресурса работы электрических щеток тяговых электродвигателей,» *Известия Транссиба*, №1 (29), с. 47-56, 2017.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 26.10.2021

Розводюк Михайло Петрович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті, e-mail: rozvodiukmp@gmail.com ;

Розводюк Катерина Михайлівна — студентка факультету інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, e-mail: rozvodiukkm@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

M. P. Rozvodiuk¹
K. M. Rozvodiuk¹

The Structure of the Device for Identifying the Technical State of the Brush-Collector Node of the DC Traction Motor

¹Vinnitsia National Technical University

Most of the electric motors that work in manufacturing sphere have already exhausted their resource. The largest number of failures in the traction DC electric motor occur in the brush-collector node. The reasons for these failures are the poor quality of the switching adjustment, wear out of brushes and regular overload of the traction electric motor. Each failure is characterized by sparking in transient contact with a brush-collector, which worsens the technical condition of the brush-collector node and energy performance of the traction motor in general and affects the resource of the latter. It had been identified that the prerequisite for reliable operation of the DC electric motor is the determination of the technical condition of its brush-collector node.

To increase the reliability of the DC traction electric motor there had been suggested the structure of the device to identify the technical condition of its brush-collector node. This structure takes into account a sufficient number of controlled parameters that allow to form diagnostic signs of a brush-collector node and determine the residual brush resource.

The synthesized device structure allows to: fix the presence and determine the intensity of sparking on the collector; fix the starting time and ending of sparks under the brush, the duration of spark pulses; determine the value of the average quadratic deviation of the duration of sparks by collector on its output and the value of the average quadratic deviation of the spark pulses in all collector plates that are sparking, in time; determine the magnitude of wear out; brush wear out speed; residual brush resource; determine the collector's beating. When exceeding the permissible or threshold value of any of the parameters there had been envisaged the notification on the corresponding indicator and the alarm circle operation.

Identification of these parameters of the brush-collector node of the traction electric motor will determine the sources of increased spark, enabling to develop ways to improve the quality of switching by reducing the spark.

Keywords: brush-collector knot, brush, collector, traction motor, DC motor, technical condition, identification, residual resource, intensity of spark, wearing brush, collector beating.

Rozvodiuk Mykhailo P. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Electro-mechanical Systems Automation in Industry and Transport, e-mail: rozvodiukmp@gmail.com ;

Rozvodiuk Kateryna M. — Student of the Department of Intelligent Information Technology and Automation, e-mail: rozvodiukkm@gmail.com

М. П. Розводюк¹
Е. М. Розводюк¹

Структура устройства для идентификации технического состояния щеточно-коллекторного узла тягового двигателя постоянного тока

¹Вінницький національний технічний університет

Наибольшее количество отказов тягового электродвигателя постоянного тока приходится на его щеточно-коллекторный узел. Причинами этих отказов являются некачественное налаживание коммутации, износ щеток и регулярные перегрузки тягового электродвигателя. Каждая из них характеризуется искрением в переходном контакте щетка-коллектор, ухудшает техническое состояние самого щеточно-коллекторного узла и энергетических показателей функционирования тягового двигателя в целом и влияет на остаточный ресурс последнего. Установлено, что причиной надежной эксплуатации тягового электродвигателя постоянного тока является определение технического состояния его щеточно-коллекторного узла.

Для повышения надежности работы тягового электродвигателя постоянного тока разработана структура устройства для идентификации технического состояния его щеточно-коллекторного узла. Эта структура учитывает достаточное количество контролируемых параметров, позволяющих сформировать диагностические признаки щеточно-коллекторного узла и определить остаточный ресурс щеток.

Синтезированная структура устройства позволяет: фиксировать наличие и определять интенсивность искрения на коллекторе; фиксировать время начала и окончания искрения под щеткой, продолжительность импульсов искрения; определять значение среднеквадратического отклонения длительности импульсов искрения по коллектору на его выходе и значение среднеквадратического отклонения длительности импульсов искрения по всем коллекторным искрящим пластинам во времени; определять величину износа щетки; скорость износа щетки; остаточный ресурс щетки; определять биение коллектора. При превышении допустимого или порогового значения любого из параметров предусмотрено информирование на соответствующем индикаторе и срабатывание цепи сигнализации.

Идентификация указанных параметров щеточно-коллекторного узла тягового электродвигателя позволит определить источники повышенного искрения, разработать пути повышения качества коммутации за счет уменьшения искрения.

Ключевые слова: щеточно-коллекторный узел, щетка, коллектор, тяговый двигатель, двигатель постоянного тока, техническое состояние, идентификация, остаточный ресурс, интенсивность искрения, износ щетки, биение коллектора.

Розводюк Михаил Петрович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электромеханических систем автоматизации в промышленности и на транспорте, e-mail: rozvodiukmp@gmail.com ;

Розводюк Екатерина Михайловна — студент факультета интеллектуальных информационных технологий и автоматизации, e-mail: rozvodiukkm@gmail.com