

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

# ВІСНИК ВІННИЦЬКОГО ПОЛІТЕХНІЧНОГО ІНСТИТУТУ

Науковий журнал

Засновник і видавець: Вінницький національний технічний університет

Виходить 6 разів на рік

Заснований у грудні 1993 року

**№ 6 (159) 2021**

Схвалено Вченою радою  
Вінницького національного технічного університету,  
протокол № 5 від 23.12.2021р.

© Вінницький національний технічний університет, 2021

Вінниця • ВНТУ • 2021

Журнал «Вісник Вінницького політехнічного інституту» є виданням, яке входить до Переліку наукових фахових видань України у галузі технічних наук (**категорія Б**) за спеціальностями: 121, 122, 123, 124, 125, 126, 131, 132, 133, 141, 144, 151, 152, 163, 172, 183, 275, а також 01.05.00, 05.02.02, 05.02.10, 05.03.05, 05.09.03, 05.11.00, 05.13.05, 05.13.06, 05.12.13, 05.12.20, 05.14.02, 05.14.06, 05.22.20, 05.23.02, 05.23.05 (накази Міністерства освіти і науки України: від 11.07.2019 р. та № 975, від 15.10.2019, № 1301);

Журнал входить у міжнародні наукометричні бази Index Copernicus International та Google Scholar і реферується в Українському реферативному журналі «Джерело».

Журнал публікує статті, які містять нові теоретичні та практичні результати в галузях технічних, економічних, природничих та гуманітарних наук. Публікуються також огляди сучасного стану розв'язання важливих наукових проблем, огляди наукових та методичних конференцій, які відбулися у ВНТУ, статті з педагогіки вищої освіти.

Розділи журналу:

- ☒ автоматика та інформаційно-вимірювальна техніка;
- ☒ будівництво;
- ☒ гуманізація і гуманітаризація технічної освіти;
- ☒ застосування результатів досліджень;
- ☒ екологія та екологічна безпека;
- ☒ економіка та менеджмент;
- ☒ енергетика, електротехніка та електромеханіка;
- ☒ інформаційні технології та комп'ютерна техніка;
- ☒ машинобудування і транспорт;
- ☒ радіоелектроніка та радіоелектронне апаратобудування;
- ☒ стратегія, зміст та нові технології підготовки спеціалістів з вищою технічною освітою;
- ☒ рецензії;
- ☒ ювілеї і ювіляри.

Сайт журналу <https://visnyk.vntu.edu.ua/>

DOI журналу <https://doi.org/10.31649/1997-9266>

---

Адреса редакції:  
ВНТУ, к. 204 ГНК,  
вул. Хмельницьке шосе, 95,  
м. Вінниця, Україна, 21021

Контакти:  
Тел.: (0432) 65-18-06  
E-mail: visnykvpi@gmail.com

*Головний редактор*

**Мокін Б. І.**, академік НАПН України, д-р техн. наук, професор (ВНТУ).

*Заступники головного редактора*

**Грабко В. В.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Василевський О. М.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ).

*Відповідальний секретар редколегії*

**Дерібо О. В.**, канд. техн. наук, доцент (ВНТУ).

*Члени редакційної колегії*

*технічні науки:*

**Азаров О. Д.**, д-р техн. наук, професор, (ВНТУ); **Багацький В. О.**, д-р техн. наук, професор (ІК); **Білинський Й. Й.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Біліченко В. В.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Бісікало О. В.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Боровська Т. М.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Василенко В. Б.**, д-р філософії, професор (Новий університет Лісабона, Португалія); **Войцек В.**, д-р техн. наук, професор (Державний університет «Люблінська Політехніка», Польща); **Григорова К.**, д-р філософії (Русенський університет «Ангел Кинчев», Болгарія); **Грушко О. В.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Губінський М. В.**, д-р техн. наук, професор (НМетАУ); **Данилов В. Я.** д-р техн. наук, професор (НТУУ «КПІ»); **Дінь Тхань Вьєт**, д-р філософії, доцент, (Університет м. Дананг, В'єтнам); **Друкований М. Ф.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Дубовой В. М.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Іскович-Лотоцький Р. Д.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Кветний Р. Н.**, член-кор. НАПН України, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Кичак В. М.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Козлов Л. Г.** д-р техн. наук, доцент (ВНТУ); **Кулик В. В.**, д-р техн. наук, доцент (ВНТУ); **Кучерук В. Ю.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Кухарчук В. В.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Лежнюк П. Д.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Лужецький В. А.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Майєр Г.**, д-р наук хабілітований, професор, (Інститут Макса Планка (структури і динаміки матерії), Гамбург, Німеччина); **Мартинюк Т. Б.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Михалевич В. М.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Мокін В. Б.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Мокін О. Б.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Моргун А. С.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Осадчук В. С.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Осадчук О. В.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Павлов С. В.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Петрук В. Г.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Поліщук Л. К.**, д-р техн. наук, професор, (ВНТУ); **Поляков А. П.**, д-р техн. наук, професор, (ВНТУ); **Постолатій В. М.**, академік АН Молдови, д-р техн. наук (Інститут енергетики АН Молдови, Молдова); **Ранський А. П.**, д-р хім. наук, професор (ВНТУ); **Романюк О. Н.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Русу Іоан**, д-р інженерії, професор (Технічний університет ім. Георге Асакі, м. Ясси, Румунія); **Савуляк В. І.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Семенов А. О.**, д-р техн. наук, доцент (ВНТУ); **Стратан Іон**, д-р техн. наук, професор (Технічний університет Молдови, Молдова); **Ткаченко С. Й.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Трофимчук О. М.**, член-кор. НАН України, д-р техн. наук, професор (ІТГП); **Штовба С. Д.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ), **Яремчук Ю. Є.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ).

*педагогічні науки:*

**Денисюк С. Г.**, д-р політ. наук, професор (ВНТУ); **Джеджула О. М.**, д-р пед. наук, професор (ВНАУ); **Клочко В. І.**, д-р пед. наук, професор (ВНТУ); **Корнієнко В. О.**, д-р політ. наук, професор (ВНТУ); **Куцєвол О. М.**, д-р пед. наук, професор (ВДПУ); **Петрук В. А.**, д-р пед. наук, професор (ВНТУ); **Ратніков В. С.**, д-р, філос. наук, професор (ВНТУ); **Хома О. І.**, д-р філос. наук, професор (ВНТУ); **Хом'юк І. В.**, д-р пед. наук, професор (ВНТУ).

*економічні науки:*

**Карачина Н. П.**, д-р екон. наук, професор (ВНТУ); **Мороз О. В.**, д-р екон. наук, професор (ВНТУ); **Мороз О. О.**, д-р екон. наук, професор (ВНТУ).

*Використані скорочення:*

ВДПУ — Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського, Україна;

ВНАУ — Вінницький національний аграрний університет, Україна;

ВНТУ — Вінницький національний технічний університет, Україна;

ІК — Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України, м. Київ, Україна;

ІТГП — Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна.

НМетАУ — Національна металургійна академія України, м. Дніпро, Україна.

НТУУ «КПІ» — Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського», м. Київ, Україна;

*Відповідальний за випуск* Дерібо О. В.

# ЗМІСТ

DOI випуску <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-159-6>

## АВТОМАТИКА ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

<b>Півторак Д. О., Павловський О. М., Платов І. М.</b> Перетворювач інформаційного сигналу в опір для системи автоматичного контролю .....	9
--	---

## ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

<b>Власенко О. В.</b> Дослідження теплообміну в об'ємі двофазної рідини за умов вимушеної її конвекції .....	14
<b>Богомолова О. С.</b> Планування режиму роботи електричної мережі з джерелами відновлювальної енергії .....	21
<b>Печеник М. В., Бур'ян С. О., Худя І. В.</b> Дослідження режимів роботи турбомеханізмів за використання каскадної схеми включення насосів .....	26
<b>Черкашина В. В., Баклицький В. М.</b> Дослідження впливу параметрів проводу на режими роботи повітряних ліній 110 кВ .....	32
<b>Розводюк М. П., Розводюк К. М.</b> Структура пристрою для ідентифікації технічного стану щітково-колекторного вузла тягового двигуна постійного струму .....	38
<b>Сахно О. А., Доморошин С. В., Скрупська Л. С.</b> Моніторинг концентрацій газів, розчинених у трансформаторному маслі, під час експлуатації силового трансформаторного обладнання .....	44
<b>Пересада С. М., Ніконенко Є. О., Ковбаса С. М., Стаценко О. В.</b> Стійкість двоконтурних систем керування напругою DC-DC перетворювача .....	51
<b>Терешкевич Л. Б., Бандура І. О.</b> Розробка математичної моделі керування батареями статичних конденсаторів з огляду її реалізації в мікропроцесорній системі .....	58
<b>Баженов В. А.</b> Використання методу гілок і границь для оптимізації розвитку електричних мереж сучасних енергосистем .....	64
<b>Дьяков В. О., Антонов А. В., Данилов О. А., Наумов Є. О.</b> Протикорозійний захист підземних споруд .....	70
<b>Демов О. Д., Бабенко О. В.</b> Моделі компенсації реактивної потужності в електричних мережах на основі просторово-часової декомпозиції .....	77
<b>Рубаненко О. Є., Лесько В. О., Поліщук А. В., Мельничук Д. О.</b> Особливості експлуатації високовольтних електричних вимикачів .....	82
<b>Чернюк А. М., Качанов Є. І., Черевик Ю. О., Оберемок З. В.</b> Загальні засади забезпечення електропостачання в локальних децентралізованих енергосистемах .....	88

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА КОМП'ЮТЕРНА ТЕХНІКА

<b>Денесяк О. І., Паламарчук Є. А.</b> Комплексна система прокторінгу в інформаційних технологіях аналізу контексту в системах оцінювання знань .....	93
<b>Данильчук О. М., Ковтун В. В., Никитенко О. Д., Нестюк Ю. Ю., Присяжнюк В. В.</b> Моделювання сценаріїв розвитку інфокомунікаційного процесу в бездротовому централізованому мережевому кластері .....	100
<b>Мокін В. Б., Дратований М. В., Козачко О. М., Жуков С. О.</b> Метод синтезу стійкої багатозв'язної когнітивної карти складної системи .....	114
<b>Дьогтєва І. О., Шиян А. А.</b> Моделювання роботи групи реагування на інциденти інформаційної безпеки в умовах зростання інтенсивності кібератак .....	123

<b>Мокін В. Б., Крижановський Є. М., Лучко А. М., Білецький Б. С., Жуков С. О.</b> Метод оптимізації інформаційних моделей масштабованих у просторі аналітичних веб-систем за критерієм повноти їхньої топологічної спостережуваності.....	131
--	-----

#### **МАШИНОБУДУВАННЯ І ТРАНСПОРТ**

<b>Лужанська Н. О., Лебідь І. Г., Кравченя І. М., Піцик М. Г., Мазуренко О. О.</b> Оцінка надійності логістичного ланцюга методом статистичних випробувань .....	142
<b>Рибак О. В.</b> Розробка модифікованого генетичного алгоритму для вибору параметрів процесу плоского шліфування плазмових покриттів.....	151

#### **РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ**

<b>Сінюгін В. В., Катаєв В. С., Грицак А. В.</b> Модульний генератор шуму для блокування витоку акустичної інформації .....	158
Перелік статей журналу «Вісник вінницького політехнічного інституту» за 2021 рік .....	159

# СОДЕРЖАНИЕ

DOI выпуска <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-159-6>

## АВТОМАТИКА И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

<b>Пивторак Д. А., Павловский А. М., Платов И. М.</b> Преобразователь информационного сигнала в сопротивление для системы автоматического контроля .....	9
--	---

## ЭНЕРГЕТИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

<b>Власенко О. В.</b> Исследование теплообмена в объеме двухфазной жидкости в условиях вынужденной ее конвекции .....	14
<b>Богомолова О. С.</b> Планирование режима работы электрической сети с источниками возобновляемой энергии .....	21
<b>Печеник Н. В., Бурьян С. А., Худя И. В.</b> Исследование режимов работы турбомеханизмов при использовании каскадной схемы включения насосов.....	26
<b>Черкашина В. В., Баклицкий В. Н.</b> Исследование влияния параметров провода на режимы работы воздушных линий 110 кВ.....	32
<b>Розводиук М. П., Розводиук Е. М.</b> Структура устройства для идентификации технического состояния щеточно-коллекторного узла тягового двигателя постоянного тока.....	38
<b>Сахно А. А., Доморошин С. В., Скрупская Л. С.</b> Мониторинг концентраций газов, растворенных в трансформаторном масле, при эксплуатации силового трансформаторного оборудования .....	44
<b>Пересада С. М., Никоненко Е. А., Ковбаса С. Н., Стаценко А. В.</b> Устойчивость двухконтурных систем управления напряжением DC-DC преобразователя .....	51
<b>Терешкевич Л. Б., Бандура И. А.</b> Разработка математической модели управления батареей статических конденсаторов, учитывая ее реализацию в микропроцессорной системе.....	58
<b>Баженов В. А.</b> Использование метода ветвей и границ для оптимизации развития электрических сетей сложных энергосистем .....	64
<b>Дьяков В. А., Антонов А. В., Данилов А. А., Наумов Е. О.</b> Противокоррозионная защита подземных сооружений.....	70
<b>Демов А. Д., Бабенко А. В.</b> Модели компенсации реактивной мощности в электрических сетях на основе пространственно-временной декомпозиции .....	77
<b>Рубаненко А. Е., Лесько В. А., Полищук А. В., Мельничук Д. А.</b> Особенности эксплуатации высоковольтных электрических выключателей .....	82
<b>Чернюк А. М., Качанов Е. И., Черевик Ю. А., Оберемок З. В.</b> Общие основы обеспечения показателей надежного электроснабжения в локальных децентрализованных энергосистемах .....	88

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И КОМПЬЮТЕРНАЯ ТЕХНИКА

<b>Денесяк А. И., Паламарчук Е. А.</b> Комплексная система прокторинга в информационных технологиях анализа контекста в системе оценивания знаний .....	93
<b>Данильчук О. Н., Ковтун В. В., Никитенко Е. Д., Нестюк Ю. Ю., Присяжнюк В. В.</b> Моделирование сценариев развития инфокоммуникационного процесса в беспроводном централизованном сетевом кластере .....	100
<b>Мокин В. Б., Дратованый М. В., Козачко А. Н., Жуков С. А.</b> Метод синтеза устойчивой многосвязной когнитивной карты сложной системы.....	114
<b>Дёгтева И. А., Шиян А. А.</b> Моделирование работы группы реагирования на инциденты информационной безопасности в условиях роста интенсивности кибератак.....	123

**Мокин В. Б., Крыжановский Е. Н., Лучко А. М., Белецкий Б. С., Жуков С. А.**  
Метод оптимизации информационных моделей масштабированных в пространстве  
аналитических веб-систем по критерию полноты их топологической наблюдаемости ..... 131

#### **МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ**

**Лужанская Н. А., Лебедь И. Г., Кравченя И. Н., Пицык М. Г., Мазуренко А. А.**  
Оценка надежности логистической цепи методом статистических испытаний ..... 142

**Рыбак О. В.** Разработка модифицированного генетического алгоритма для  
выбора параметров процесса плоского шлифования плазменных покрытий ..... 151

#### **РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И РАДИОЭЛЕКТРОННОЕ АППАРАТОСТРОЕНИЕ**

**Синюгин В. В., Катаев В. С., Грицак А. В.** Модульный генератор шума для  
блокировки утечки акустической информации..... 158

# CONTENTS

Issue DOI <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-159-6>

## AUTOMATION AND INFORMATION AND MEASURING TECHNIQUE

<b>Pivtorak D., Pavlovskiy O., Platov I.</b> Information Signal Converter in Registance for Automatic Control System.....	9
---	---

## POWER ENGINEERING, ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTROMECHANICS

<b>Vlasenko O.</b> Investigation of Heat Exchange in the Volume of Two-Phase Liquid under the Conditions of its Forced Convection.....	14
<b>Bohomolova O.</b> Eelectric Network Operation Planning with Renewable Energy Sources .....	21
<b>Pechenyk M., Burian S., Khudia I.</b> Research of Operating Modes of Turbomechanisms when Using an Inclusion Cascade Pump Switching Scheme .....	26
<b>Cherkashyna V., Baklytskyi V.</b> Scientific Research of the Influence of Wire Parameters on the Operating Modes of 110 kV Overhead Lines .....	32
<b>Rozvodiuk M., Rozvodiuk K.</b> The Structure of the Device for Identifying the Technical State of the Brush-Collector Node of the DC Traction Motor.....	38
<b>Sakhno O., Domoroshchyn S., Skrupska L.</b> Monitoring of Gas Concentrations Dissolved in Transformer Oil During Operation of Power Transformer Equipment .....	44
<b>Peresada S., Nikonenko Ye., Kovbasa S., Statsenko O.</b> Stability of Cascaded Voltage Control Systems of DC-DC Converters.....	51
<b>Tereshkevych L., Bandura I.</b> Development of Mathematical Model of Battery Control of Static Capacitors with Regard to its Implementation in Microprocessor System .....	58
<b>Bazhenov V.</b> Use of the Method of Branches and Boundaries to Optimize the Development of Electrical Networks of Complex Energy Systems.....	64
<b>Diakov V., Antonov A., Danylov O., Naumov Ye.</b> Corrosion Protection of Underground Structures .....	70
<b>Demov O., Babenko O.</b> Models of Reactive Power Compensation in Electrical Networks on the Basis of Spatial-Temporal Decomposition .....	77
<b>Rubanenko O., Lesko V., Polishchuk A., Melnychuk D.</b> Features of Operation of High-Voltage Electric Switches.....	82
<b>Cherniuk A., Kachanov Ye., Cherevyk Yu., Oberemok Z.</b> General Framework for Ensuring Indicators of Reliable Power Supply in Local Decentralized Power Systems .....	88

## INFORMATION TECHNOLOGIES AND COMPUTER ENGINEERING

<b>Denesiak O., Palamarchuk Ye.</b> Comprehensive Proctoring System in Information Technologies of Context Analysis in Knowledge Evaluation Systems .....	93
<b>Danylchuk O., Kovtun V., Nykytenko O., Nestiuk Yu., Prysiachniuk V.</b> Simulation of Infocommunications Process Development Scenarios in Wireless Centralized Network Cluster .....	100
<b>Mokin V., Dratovanyi M., Kozachko O., Zhukov S.</b> Method of Synthesis of a Stable Multi-Connected Cognitive Map of a Complex System.....	114
<b>Dohtieva I., Shyian A.</b> Simulation of the Work of the Information Security Incident Response Group in the Conditions of Increasing Cyberattack Intensity .....	123
<b>Mokin V., Kryzhanovskiy Ye., Luchko A., Biletskyi B., Zhukov S.</b> Method of Optimization of Information Models Scaled in Space of Analytical Web-Systems by the Criteria of Completeness of their Topological Observation .....	131

## MECHANICAL ENGINEERING AND TRANSPORT

<b>Luzhanska N., Lebid I., Kravchenya I., Pitsyk M., Mazurenko O.</b> Assessment of Supply Chain Reliability Based on the Monte-Carlo Method.....	142
<b>Rybak O.</b> Development of the Modified Genetic Algorithm for Searching Parameters of Plasma Coatings Surface Grinding Process.....	151

## RADIO ELECTRONICS AND RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT

<b>Siniuhin V., Kataiev V., Hrytsak A.</b> Modular Noise Generator for Blocking Acoustic Information Leaks .....	158
--	-----



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

<sup>1</sup>Вінницький 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.

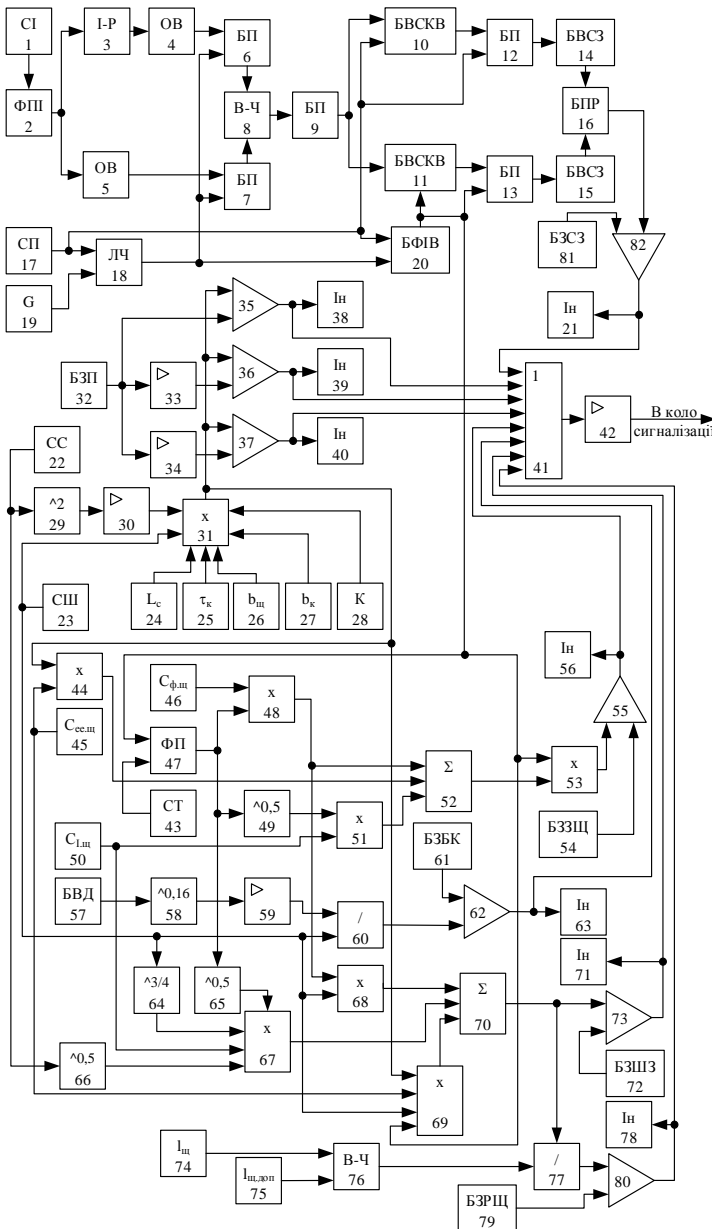


Рис. 1. Структура пристрою для ідентифікації технічного стану щітково-колекторного вузла тягового двигуна постійного струму

струмової складової зношування 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 зношування щітки; 46 — блок задання коефіцієнта фрикційної складової зношування 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.

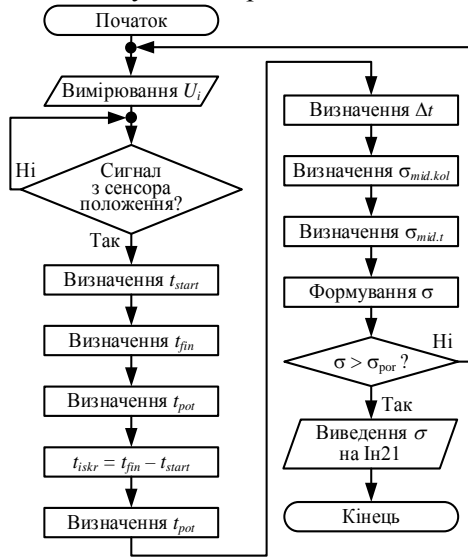


Рис. 2. Алгоритм визначення тривалості імпульсів іскріння в колекторі і в часі

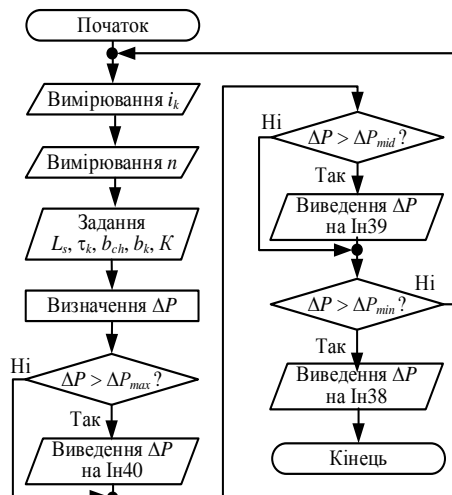


Рис. 3. Алгоритм визначення амплітуди іскріння

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  $\Delta t$ , 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  $\tau_k$ , 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  $\Delta P_{min}$  заданий в блоці задання потужності 32. Середній  $\Delta P_{mid}$  та максимально допустимий  $\Delta P_{max}$  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  $\Delta R_{ch}$ . Алгоритм цього процесу подано на рис. 4.

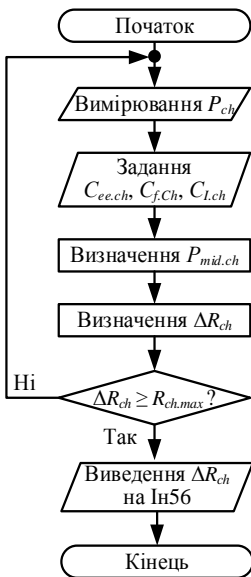


Рис. 4. Алгоритм визначення величини зношення щітки

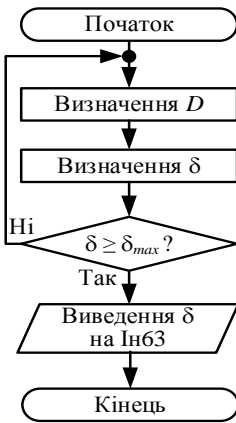


Рис. 5. Алгоритм визначення биття колектора

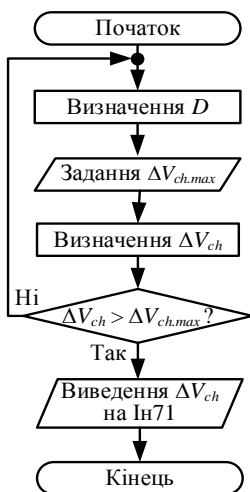


Рис. 6. Алгоритм визначення швидкості зношення щітки

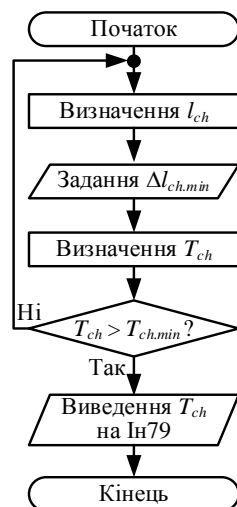


Рис. 7. Алгоритм визначення залишкового ресурсу щітки

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  $\Delta t$ . 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  $\delta_{max}$ , 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  $\Delta V_{ch}$  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 визначити

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. Розвodyк, і К. М. Розвodyк, «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

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

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

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**M. P. Rozvodiuk<sup>1</sup>**  
**K. M. Rozvodiuk<sup>1</sup>**

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

<sup>1</sup>Vinnitsia 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. Розводюк<sup>1</sup>**  
**Е. М. Розводюк<sup>1</sup>**

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

<sup>1</sup>Вінницький 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