

Всеукраїнський науково-технічний журнал

All-Ukrainian Scientific & Technical Journal

ISSN 2520-6168 (Print)

DOI:10.37128/2520-6168-2024-2



№2 (125)



2024

Machinery
Energetics
Transport
of Agribusiness

ТЕХНІКА
ЕНЕРГЕТИКА
ТРАНСПОРТ АПК



Науковий журнал

**ТЕХНІКА,
ЕНЕРГЕТИКА,
ТРАНСПОРТ АПК**

№ 2 (125) / 2024

м. Вінниця - 2024

Scientific Journal

**Engineering,
Energy, Transport
AIC**

Vol 125, № 2 / 2024

Vinnytsia – 2024

**ТЕХНІКА,
ЕНЕРГЕТИКА,
ТРАНСПОРТ АПК**

Журнал науково-виробничого та навчального спрямування
Видавець: Вінницький національний аграрний університет

Заснований у 1997 році під назвою «Вісник Вінницького державного сільськогосподарського інституту».

Правонаступник видання: Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки.

Свідоцтво про державну реєстрацію засобів масової інформації
КВ № 16644–5116 ПР від 30.04.2010 р.

Науковий журнал. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2024. № 2 (125). С. 1–142.

Друкується за рішенням Вченої ради Вінницького національного аграрного університету (протокол № 2 від 30.08.2024 р.)

Свідоцтво про державну реєстрацію засобів масової інформації №21906-11806 Р від 12.03.2016р.

Журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК» включено до переліку наукових фахових видань України з технічних наук (Категорія «Б», Наказ Міністерства освіти і науки України від 02.07.2020 року №886);

Згідно рішення Національної ради України з питань телебачення та радіомовлення від 25.04.2024 р. №1337 науковому журналу «Техніка, енергетика, транспорт АПК» присвоєно ідентифікатор медіа R30-05173.

- присвоєно ідентифікатор цифрового об'єкта (*Digital Object Identifier – DOI*);

- індексується в *CrossRef, Google Scholar*;

- індексується в міжнародній наукометричній базі *Index Copernicus Value* з 2018 року.

Головний редактор

Олексій ТОКАРЧУК – к.т.н., доцент,
Вінницький національний аграрний університет

Заступник головного редактора

Наталія ВЕСЕЛОВСЬКА – д.т.н., професор,
Вінницький національний аграрний університет

Відповідальний секретар

Юрій ПОЛЄВОДА – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Члени редакційної колегії

Анатолій СПІРІН – к.т.н., доцент,
Вінницький національний аграрний університет

Олег ЦУРКАН – д.т.н., професор,
Вінницький національний аграрний університет

Валерій ГРАНЯК – к.т.н., доцент,
Вінницький національний аграрний університет

Олена СОЛОНА – к.т.н., доцент,
Вінницький національний аграрний університет

Віталій ЯРОПУД – к.т.н., доцент,
Вінницький національний аграрний університет

Ігор ТВЕРДОХЛІБ – к.т.н., доцент,
Вінницький національний аграрний університет

Володимир БУЛГАКОВ – д.т.н., професор,
академік НААН України, Національний
університет біоресурсів і природокористування
України

Ростислав ІСКОВИЧ-ЛОТОЦЬКИЙ – д.т.н.,
професор, Вінницький національний технічний
університет

Ігор КУПЧУК – к.т.н., доцент,
Вінницький національний аграрний університет

Ярослав ІВАНЧУК – к.т.н., доцент,
Вінницький національний технічний університет

Зарубіжні члени редакційної колегії

Йордан Максимов – д.т.н., професор, Технічний
університет Габрово (Болгарія)

Аудріус Жунда – к.т.н., доцент, Університет Вітовта
Великого (Литва)

відповідальний секретар редакції – Полєвода Ю.А. к.т.н., доцент,

літературний редактор української та іноземних мов – Погранична Н.М.,

Адреса редакції: 21008, Вінниця, вул. Сонячна 3, Вінницький національний аграрний університет, тел. (0432) 46–00–03

Сайт журналу: <http://tetapk.vsau.org/>

Електронна адреса: pophv@ukr.net

Journal of scientific, industrial and educational direction

**ENGINEERING,
ENERGY,
TRANSPORT AIC**

Publisher: Vinnytsia National Agrarian University

It was founded in 1997 under the name "Bulletin of the Vinnytsia State Agricultural Institute".

Successor publication: Collection of Scientific Works of the Vinnytsia National Agrarian University. Series: Technical sciences.

Certificate of state registration of mass media

KV No. 16644–5116 PR dated 04/30/2010

Scientific Journal. (2024). *Technology, Energy, Transport AIC*, Vol. 125, № 2, P. 1–142.

Printed by decision of the Academic Council of the Vinnytsia National Agrarian University (protocol №. 2 dated August 30, 2024)

Certificate of state registration of mass media №. 21906-11806 R dated March 12, 2016.

The journal "Technology, Energy, Transport of the Agricultural Industry" is included in the list of technical scientific publications of Ukraine (Category "B", Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine dated July 2, 2020 №. 886);

According to the decision of the National Council of Ukraine on Television and Radio Broadcasting dated April 25, 2024 №. 1337, the scientific journal "Technology, Energy, Transport of the Agricultural Industry" was assigned the media identifier R30-05173.

- assigned a digital object identifier (Digital Object Identifier - DOI);
- indexed in CrossRef, Google Scholar;
- indexed in the international scientometric database Index Copernicus Value since 2018.

Chief editor

Olexii TOKARCHUK – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vinnytsia National Agrarian University (Ukraine)

Deputy editor-in-chief

Natalia VESELOVSKA – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, VNAU (Ukraine)

Responsible secretary

Yuriy POLIEVODA – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, VNAU (Ukraine)

Members of the editorial board

Anatoly SPIRIN – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vinnytsia National Agrarian University (Ukraine)

Oleg TSURKAN – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Vinnytsia National Agrarian University (Ukraine)

Valerii HRANIAK – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vinnytsia National Agrarian University (Ukraine)

Olena SOLONA – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vinnytsia National Agrarian University (Ukraine)

Vitalii YAROPUD – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vinnytsia National Agrarian University (Ukraine)

Igor TVERDOKHLIB – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vinnytsia National Agrarian University (Ukraine)

Volodymyr BULGAKOV – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Acad. NAAS, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Ukraine)

Rostislav ISKOVICH-LOTOTSKY – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Vinnytsia National Technical University (Ukraine)

Igor KUPCHUK – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vinnytsia National Agrarian University (Ukraine)

Yaroslav IVANCHUK – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Vinnytsia National Technical University (Ukraine)

Foreign members of the editorial board

Jordan Todorov MAXIMOV – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Technical University of Gabrovo (Bulgaria)

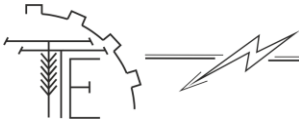
Audrius ŽUNDA – Ph.D., Associate Professor, Vytautas Magnus University (Kaunas, Lithuania)

editor-in-chief – **Yurii POLIEVODA**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, literary editor of Ukrainian and foreign languages – **Natalia POGRANICHNA**

Address of the editorial office: 21008, Vinnytsia, str. Sonyakna 3, Vinnytsia National Agrarian University, tel. (0432)46-00-03

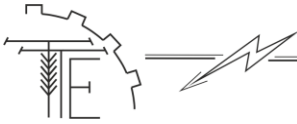
The magazine's website: <http://tetapk.vsau.org/>

E-mail address: pophv@ukr.net



ЗМІСТ

I. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА. МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО. ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ	
<i>АЛІЄВ Ельчин Бахтияр огли, БЕЗВЕРХНІЙ Петро Євгенович, ДУДІН Володимир Юрійович, АЛІЄВА Ольга Юрійівна</i>	
РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ УДОСКОНАЛЕНОЮ СИСТЕМОЮ ПОДАЧІ НАСІННЯ ПНЕВМАТИЧНОЇ СІВАЛКИ ТОЧНОГО ВИСІВУ.....	7
<i>БАБІН Ігор Анатолійович</i>	
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТЕНДУ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ПРОМИВАННЯ ДОЇЛЬНОЇ УСТАНОВКИ З ПОВІТРЯНИМИ ІНЖЕКТОРАМИ ТА ФОТОДАТЧИКОМ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ.....	16
<i>ГРИЦУН Анатолій Васильович, ЗОЗУЛЯК Ігор Анатолійович, БОРИС Микола Михайлович, МАРТИНЮК Андрій Віталійович</i>	
ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ МАШИННОГО ДОЇННЯ КОРІВ АПАРАТОМ З ДОЇЛЬНОЮ ГУМОЮ ПЕРЕМІННОГО ПЕРЕРІЗУ.....	28
<i>КОЗАЧЕНКО Олексій Васильович, АЛІЄВ Ельчин Бахтияр огли, ПІХ Євгеній Олексійович</i>	
ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОПЕРЕДНЬОЇ СЕПАРАЦІЇ НАСІННЄВОЇ СУМІШІ НА ГВИНТОВОМУ ЖИВИЛЬНИКУ ВІБРОФРИКЦІЙНОГО СЕПАРАТОРА.....	36
<i>КУДРЯВЦЕВ Ігор Миколайович</i>	
ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СЕПАРАЦІЇ ВІДХОДІВ НАСІННЄВОЇ СУМІШІ СОНЯШНИКУ В ПНЕВМОСЕПАРУЮЧОМУ КАНАЛІ АЕРОДИНАМІЧНОГО СЕПАРАТОРА...	47
<i>ПАЛАДІЙЧУК Юрій Богданович, ГОРОВИЙ Артур Володимирович</i>	
ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМ І ПРИЗНАЧЕННЯ МАКРОРЕЛЬЄФІВ НА РОБОЧИХ ПОВЕРХНЯХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ.....	56
<i>ТРОХАНЯК Олександра Миколаївна, ЯРОПУД Віталій Миколайович</i>	
ДОСЛІДЖЕННЯ ГНУЧКОГО ГВИНТОВОГО КОНВЕЄРА ДЛЯ УТИЛІЗАЦІЇ ПОШКОДЖЕНОГО ВІЙСЬКОВИМИ ДІЯМИ ШАРУ ЗЕМЕЛЬ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	66
<i>ШТУЦЬ Андрій Анатолійович</i>	
ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ПОБУДУВИ КРИВИХ ГРАНИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЇ ДЛЯ ПРОЦЕСІВ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ.....	75
<i>ЯРОПУД Віталій Миколайович</i>	
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НАГРІВУ ПОТОКУ ПОВІТРЯ У ВЕРТИКАЛЬНОМУ ГРУНТОВОМУ ТЕПЛООБМІННИКУ.....	83
II. АГРОІНЖЕНЕРІЯ	
<i>КРАВЕЦЬ Світлана Миколаївна, ТОКАРЧУК Олексій Анатолійович</i>	
ІНТЕГРАЦІЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС СТУДЕНТІВ СПЕЦІАЛЬНОСТІ АГРОІНЖЕНЕРІЯ.....	91
<i>РЯБОШАПКА Вадим Борисович, МЕЛЬНИК Віталій Олегович</i>	
ПРИЧИНИ ЗНОШУВАННЯ ПЛУНЖЕРНИХ ПАР ТА ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ДОВГОВІЧНОСТІ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ БІОПАЛИВА.....	99
<i>ТВЕРДОХЛІБ Ігор Вікторович, ПОЛЄВОДА Юрій Алікович, СЛОБОДЯНЮК Віктор Володимирович, ПАВЛЕНКО Владислав Костянтинівич</i>	
КОНСТРУКЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ ТА РЕЖИМИ РОБОТИ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ЗЕЛЕНОЇ МАСИ ЕНЕРГО- ТА РЕСУРСООЩАДНОГО ВИРОБНИЦТВА ПРОДУКЦІЇ ТВАРИННИЦТВА.....	105
<i>ХОЛОДЮК Олександр Володимирович, КАВУНОВ Владислав Віталійович, ХРИЩЕНЮК Владислав Валерійович</i>	
РОЗРОБКА СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ВИЯВЛЕННЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРИСТРОЇВ ТА ЗАБРУДНЕНЬ НА СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ УГІДДЯХ.....	111
III. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА	
<i>ГРАНЯК Валерій Федорович, КУПЧУК Ігор Миколайович, ЗЛОТНІЦЬКИЙ В'ячеслав Миколайович, САФТЮК Ярослав Владиславович</i>	
ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА НА ФОРМУВАННЯ ТРИФАЗНОЇ СИСТЕМИ СТРУМУ СТАТОРА.....	124
<i>ЧУМАК Вадим Володимирович, ДУХНО Роман Павлович, СТУЛІШЕНКО Андрій Сергійович, СВЯТНЕНКО Вадим Анатолійович</i>	
ВИСОКОЧАСТОТНІ ПРОЦЕСИ В ОБМОТКАХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ЗАГАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ПРИ НАЯВНОСТІ ДЕФЕКТІВ КОРПУСНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ..	130



CONTENTS

I. APPLIED MECHANICS. MATERIALS SCIENCE. INDUSTRY MACHINERY BUILDING

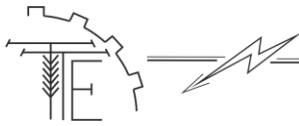
*Elchyn ALIIEV, Petro BEZVERKHNIY, Volodymyr DUDIN, Olha ALIIEVA***RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES ON THE IMPROVED SEED DELIVERY SYSTEM OF A PNEUMATIC PRECISION SEEDER..... 7***Ihor BABYN***EXPERIMENTAL STUDIES OF THE STAND OF THE AUTOMATED MILKING UNIT WASHING SYSTEM WITH AIR INJECTORS AND A PHOTO SENSOR FOR DETERMINING THE CONTAMINATION LEVEL..... 16***Anatolii HRYTSUN, Igor ZOZULYAK, Mykola BORYS, Andrii MARTYNYUK***THEORETICAL STUDIES OF THE PROCESS OF MACHINE MILKING OF COWS WITH AN APPARATUS WITH MILKING RUBBER VARIABLE THICKNESS..... 28***Oleksii KOZACHENKO, Elchyn ALIIEV, Yevhenii PIKH***NUMERICAL SIMULATION OF THE PROCESS OF PRELIMINARY SEPARATION OF THE SEED MIXTURE ON THE SCREW FEEDER OF THE VIBRO-FRICTION SEPARATOR..... 36***Ihor KUDRIAVTSEV***NUMERICAL SIMULATION OF THE WASTE SEPARATION PROCESS OF SUNFLOWER SEED MIXTURE IN THE PNEUMATIC SEPARATING CHANNEL OF THE AERODYNAMIC SEPARATOR..... 47***Yuriy PALADIYCHUK, Artur HOROVYI***STUDY OF THE FORMS AND PURPOSE OF MACRO-RELIEF ON THE WORKING SURFACES OF CYLINDRICAL PARTS..... 56***Oleksandra TROKHANIAK, Vitalii YAROPUD***RESEARCH OF A FLEXIBLE SCREW CONVEYOR FOR DISPOSAL OF AGRICULTURAL LAND DAMAGED BY MILITARY ACTIONS..... 66***Andrii SHTUTS***IMPROVEMENT OF THE METHOD OF CONSTRUCTING LIMIT DEFORMATION CURVES FOR ROLL STAMPING PROCESSES..... 75***Vitalii YAROPUD***EXPERIMENTAL STUDIES OF THE AIR FLOW HEATING PROCESS IN A VERTICAL SOIL HEAT EXCHANGER..... 83**

II. AGROENGINEERING

*Svitlana KRAVETS, Oleksii TOKARCHUK***INTEGRATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE EDUCATIONAL PROCESS OF AGRO ENGINEERING STUDENTS..... 91***Vadym RYABOSHAPKA, Vitalii MELNYK***REASONS FOR WEAR OF PLUNGER PAIRS AND INCREASING THEIR DURABILITY DUE TO THE USE OF BIOFUEL..... 99***Igor TVERDOKHLIB, Yurii POLIEVODA, Viktor SLOBODYANYUK, Vladyslav PAVLENKO***CONSTRUCTION AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE PROCESS OF REDUCING GREEN MASS OF ENERGY- AND RESOURCE-SAVING PRODUCTION OF LIVESTOCK PRODUCTS..... 105***Oleksandr KHOLODIUK, Vladyslav KAVUNOV, Vladyslav KHRYSHCHENIUK***DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR REMOTE DETECTION OF EXPLOSIVE DEVICES AND POLLUTION ON AGRICULTURAL LANDS..... 111**

III. ELECTRICAL ENERGY, ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTROMECHANICS

*Valerii HRANIAK, Ihor KUPCHUK, Viacheslav ZLOTNITSKYI, Yaroslav SAFTYUK***FEATURES OF THE INFLUENCE OF THE TECHNICAL PARAMETERS OF ASYNCHRONOUS MOTOR ON THE FORMATION OF IT'S THREE-PHASE STATOR CURRENT SYSTEM..... 124***Vadym CHUMAK, Roman DUKHNO, Andriy STULISHENKO, Vadym SVYATNENKO***HIGH-FREQUENCY PROCESSES IN THE WINDINGS OF GENERAL-PURPOSE ELECTRICAL MACHINES IN THE PRESENCE OF DEFECTS IN THE GROUND-WALL INSULATION..... 130**

**FEATURES OF THE INFLUENCE OF THE TECHNICAL PARAMETERS OF ASYNCHRONOUS MOTOR ON THE FORMATION OF IT'S THREE-PHASE STATOR CURRENT SYSTEM**

Valerii HRANIAK, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ihor KUPCHUK, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Vinnytsia National Agrarian University
Viacheslav ZLOTNITSKYI, project manager
LCC «INNOVINNPROM»
Yaroslav SAFTYUK, Postgraduate Student
Vinnytsia National Agrarian University

ГРАНЯК Валерій Федорович, к.т.н., доцент
КУПЧУК Ігор Миколайович, к.т.н., доцент
ЗЛОТНІЦЬКИЙ В'ячеслав Миколайович, менеджер проєктів
ТОВ «ІННОВІННПРОМ»
САФТЮК Ярослав Владиславович, аспірант
Вінницький національний аграрний університет

In recent decades, there has been a growing trend towards the increasing role of automated electric drives implemented based on asynchronous motors. This trend is driven by several objective factors, among which the main ones are the development of mathematical models of asynchronous motors, leading to increased accuracy and functional capabilities of their control systems, and active advancement in power semiconductor technology, resulting in improved efficiency and reduced cost of power frequency converters.

It is worth noting that a consequence of modern technical progress is the increase in complexity, cost, and technological sophistication of industrial equipment, thus leading to potential losses accompanied by its malfunction during operation. Another trend in the development of industry, both in Ukraine and in most industrially advanced countries, is the increase in the quantity of electrical equipment that has reached its nominal service life. Since there is an inverse proportional relationship between reliability and operating time of rotating electric machines, it is quite logical and evident that this leads to the growing relevance of building highly efficient systems for their diagnostics.

The article justifies the expediency of applying current-based diagnostic methods for asynchronous motors, which do not require intervention in the construction of the electric machine, allowing simplification of the design of the diagnostic system and reducing capital costs for its construction. It also theoretically substantiates the functional relationship between the technological parameters of an asynchronous motor and the frequencies of the components of the current signal of its stator circuit, on which their influence will manifest, which in perspective will allow identifying abnormal deviations from the corresponding technological parameters by monitoring the harmonic components of the stator current.

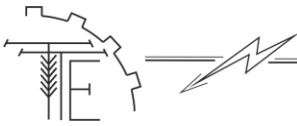
Key words: asynchronous motor, diagnostics, stator current, harmonic components, magnetic field, disturbance, technological parameters.

F. 15. Fig. 1. Ref. 13.

1. Problem formulation

The magnetic field that arises in the stator of an ideal asynchronous motor (AM) has a completely symmetric shape. However, in the operation of a real AM, the formation of disturbances in the electromagnetic field inevitably occurs, due to deviations in its design parameters both due to inaccuracies in its manufacture and due to defective degradation of structural nodes [1]. It is obvious that the presence of disturbances, which lead to deformation of the AM magnetic field, will inevitably manifest through the increase in nonlinearity of the stator resistance and its asymmetry. This, in turn, will cause an increase in the amplitudes of both higher harmonics in each phase separately and the amplitude of the direct and reverse sequence of the three-phase stator current system [2, 3].





It should be noted that the stator current is a convenient signal for monitoring. Therefore, considering the presence of a functional dependence between the characteristics of the three-phase stator current system of the AM and its current technical condition, it is obvious that the study of the features of such a functional relationship is a relevant scientific and applied task, the solution of which can become a significant impetus for the further development of promising diagnostic systems for rotating electrical machines.

2. Analysis of recent research and publications

In most modern automatic control systems for asynchronous drives, functions for measuring currents and voltages of the stator circuit of electric machines are already provided [4, 5]. However, in the absence of such a measurement system, its practical implementation will not require intervention in the construction of the electric machine. These circumstances, in the case of using stator current parameters as diagnostic indicators, will allow for significant simplification of the design of the diagnostic system and reduce the capital costs for its construction in many cases, thereby increasing the feasibility of such a diagnostic method [6]. For instance, one possible example of practical implementation of a measurement system for currents and voltages of the stator circuit of the AM is shown in Fig. 1.



Fig. 1. An example of the implementation of the measuring system of currents and voltages of the stator circuit AM

At present, the widespread use of such an approach is significantly limited by the absence of high-precision mathematical models that would describe the influence of deviations in the technological parameters of AMs, including those caused by the development of the most probable defects, on the parameters of the three-phase stator current system. Therefore, considering the aforementioned, the relevance of further research aimed at obtaining such mathematical dependencies can be emphasized.

In alternating current motors, the electromagnetic forces applied to their structural nodes have a frequency twice that of the magnetic field frequency, as the latter is proportional to the magnitude of the magnetic flux modulation [7]. That is:

$$f_{EM} = 2f_1, \quad (1)$$

where f_1 – power supply frequency.

In a symmetric winding of the rotor, electromagnetic forces do not have variable components but only generate the working torque. However, if the stator currents are asymmetric, pulsating components of the electromagnetic torque are formed with a double slip frequency:

$$f_{2s} = f_1 \cdot 2s, \quad (2)$$

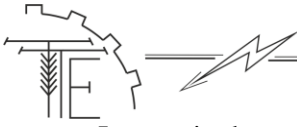
where s – AM sliding, which can be defined as:

$$s = \frac{f_1 - f_r}{f_1}, \quad (3)$$

where f_r – rotation frequency of the AM rotor.

In turn, mechanical vibrations in AM, caused by electromagnetic forces, will also occur at twice the frequency of the mains. Therefore, the force of electromagnetic influence between each pair of current-carrying elements will also have a double frequency relative to the mains frequency:

$$f_{ED} = 2f_1, \quad (4)$$



In turn, in the case of an asymmetric stator field, when the magnetic field has a reverse component, a weak variable electromagnetic force appears, and accordingly, a torque with a frequency:

$$f_{EM} = 2f_1, \quad (5)$$

In this case, as a rule, an increase in the amplitude of the reverse sequence occurs either due to asymmetry in the stator windings or due to asymmetry in the power supply network. In the latter case, corresponding distortions should also be expected in the three-phase voltage system at the terminal clamps of the investigated motor [8].

The next most significant in terms of amplitude are the oscillating forces of electromagnetic nature acting at tooth frequencies, which are determined by the periodic alternation of ferromagnetic teeth and slots on the stator and rotor. The tooth frequency of the rotor can be determined by the following equation:

$$f_{zr} = f_r \cdot Z_2, \quad (6)$$

where f_r – rotor rotation frequency; Z_2 – the number of rotor teeth.

Accordingly, the stator tooth frequency:

$$f_{zs} = \frac{f_1 \cdot Z_1}{p}, \quad (7)$$

where Z_1 – the number of stator teeth; p – the number of pairs of poles.

The magnetic saturation of the active iron in the tooth zone of the rotor is characterized by the increase in radial vibrations of the machine at frequencies kf_1 , which are multiples of the mains frequency [9].

The development of defects in AMs, caused by damage to mechanical and electrical components, leads to the emergence of additional vibrations, which in turn results in the appearance of additional higher harmonics in the magnetic field. As a consequence, there is an additional change in the spectral composition of the investigated currents.

3. The purpose of the article

The purpose of this study is to develop and justify effective current methods for diagnosing asynchronous electric motors, which allow identifying abnormal deviations of technological parameters without contact and without interfering with the design of the equipment.

4. Results of the researches

In real electric machines, in the air gap, in addition to the fundamental harmonic, there exists an infinite number of harmonics of the magnetic field. These harmonics have frequencies higher and lower than the fundamentals, which are referred to as higher harmonics and subharmonics, respectively. Higher harmonics differ from each other in amplitudes and frequencies, and they are conventionally divided into temporal and spatial harmonics.

Temporal harmonics are those arising in the air gap from the side of the machine terminals (from the network, shaft, and thermal output). Spatial harmonics are caused by the design features and nonlinear parameters of the machine [8].

Spatial harmonics of the field induce higher harmonics of electromagnetic forces (EMF) in the stator winding. To reduce these and consequently improve the shape of the EMF curve, measures such as shortening the step, skewing the slots, and distributing the winding across slots are applied so that the number of coils within a coil group is $q > 1$, etc.

Spatial harmonics arising from design features and nonlinear parameters of the machine significantly influence energy conversion processes in the air gap. In the case of a concentrically arranged rotor in the air gap and open slots in the stator and rotor with the numbers Z_s and Z_r , and the number of pole pairs p , the most pronounced harmonics of field induction of the following orders exist [7, 9]:

- the main harmonic, which has p periods around the air gap circumference, forming a rotating field with induction:

$$B_1 = \frac{4}{\pi} \frac{F_1 \mu_0}{\delta} \lambda_0 \cos\left(\frac{\pi x}{\tau} - \omega_1 t\right), \quad (8)$$

where F_1 – amplitude of the magnetizing force of the main harmonic; τ – polar division; δ – air gap between stator and rotor, mm; λ_0 – constant component of air gap conductivity; ω_1 – cyclic frequency of the power supply network; x – projection of harmonic amplitude along the abscissa axis.

- harmonics of the order of stator tooth, arising as a result of variable magnetic conductivity, which forms a rotating field with induction:



$$B_{zs1} + B_{zs2} = \frac{4 F_1 \mu_0}{\pi \delta} \lambda_{zs1} \cos\left((2m_1 q - 1) \frac{\pi x}{\tau} - \omega_1 t\right) + \lambda_{zs2} \cos\left((2m_1 q - 1) \frac{\pi x}{\tau} - \omega_1 t\right), \quad (9)$$

where m_1 – the number of phases of the stator winding; q – the number of grooves per pole and phase of the winding; $\lambda_{zs1}, \lambda_{zs2}$ – the relative amplitudes of the toothed harmonics of the stator air gap conductance;

- harmonics of the order determined by the number of phase zones forming rotating fields of the type:

$$B_{zr1} + B_{zr2} = \frac{4 F_1 \mu_0}{\pi \delta} \lambda_{zr1} \cos\left(\left(\frac{z_r}{p} - 1\right) \frac{\pi x}{\tau} - \omega_1 t\right) + \lambda_{zr2} \cos\left(\left(\frac{z_r}{p} - 1\right) \frac{\pi x}{\tau} - \omega_1 t\right), \quad (10)$$

where Z_r – the number of rotor grooves; ω_r – cyclic frequency of rotation of the rotor; $\lambda_{zr1}, \lambda_{zr2}$ – relative amplitudes of toothed harmonics of rotor air gap conductance.

In addition, there are higher-order harmonics, which typically have smaller amplitudes and different combinatorial components. It is worth noting that the harmonic composition of the actual spectrum of the stator current of an AM is the result of electromagnetic phenomena, power supply conditions, and the specifics of the mechanical drive system. The spectrum of harmonic components of the current includes harmonics related to its design features [10]:

- higher-order harmonics of order $6c \pm 1$ are caused by other harmonics of the magnetically motive force (MMF) in the stator winding:

$$f_{MPC} = f_1 (6c \pm 1), \quad (11)$$

where $c = 1, 2, 3 \dots$ (whole numbers).

Harmonics are multiples of the 50 Hz frequency. Harmonics of order $(6c+1)$ rotate in the same direction as the first-order harmonic, while harmonics of order $(6c-1)$ rotate in the opposite direction [10]:

- tooth harmonics of the rotor caused by the presence of grooves in the rotor core:

$$f_{3TP} = \frac{k \cdot Z_r}{p} f_r \pm f_1, \quad (12)$$

where Z_r – number of rotor grooves (number of rods).

- tooth harmonics of the stator caused by the presence of grooves in the stator core:

$$f_{3TC} = f_1 \left(\frac{k \cdot Z_s}{p} \pm 1 \right), \quad (13)$$

where $k = 1, 2, 3 \dots$ (whole numbers); Z_s – the number of stator grooves; p – the number of pairs of poles.

A significant increase in the amplitude of tooth harmonics of the stator field occurs during the no-load operation of the AM, while relatively less occurs during nominal load [7].

- higher harmonics caused by a change in the mutual location of the grooves of the stator and rotor:

$$f_{3TC-3TP} = f_1 \left(\frac{k \cdot Z_s}{p} \pm \frac{k \cdot Z_r}{p} \pm 1 \right). \quad (13)$$

As a rule, the amplitudes of tooth harmonics are significantly influenced by the ratio of the number of grooves on the stator and rotor. Some ratios are not permissible as they cause significant vibrations and noise [11, 12].

- higher harmonics due to core saturation:

$$f_{nac} = f_1 (2k - 1), \quad (14)$$

In low-power AMs, the influence of these harmonics in the slip interval $s = 0 \div 1$ can be neglected due to their negligible contribution [10, 13].

- higher harmonics, characterized by the number of pole pairs, are caused by the interaction of saturation harmonics with the rotor winding:

$$f_{nac-OP} = f_1 (p(2k - 1) \pm k \cdot Z), \quad (15)$$

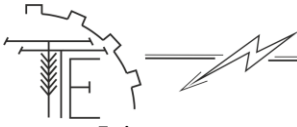
- higher harmonics caused by the discreteness of the arrangement of bars in the closed-loop rotor winding:

$$f_{OP} = f_1 \left(\frac{k \cdot Z_r}{p} \pm 1 \right). \quad (16)$$

- harmonics with frequencies dependent on the rotor rotation speed [11, 13]:

$$f_m = |k \cdot f_1 + n \cdot f_r|, \quad (15)$$

where $n = \pm 1, \pm 2, \dots$ (whole numbers).



It is necessary to take into account current harmonics, the frequencies of which are related to the third harmonic with respect to f_1 , which may arise due to the supply of stator windings with voltages containing the third harmonic. Another reason for their manifestation is saturation of the magnetic circuit. Diagnostic assessment of the motor using spectral analysis of currents requires identifying the largest number of harmonics and selecting those necessary for a correct fault assessment. When a fault occurs, the operating machine becomes a generator of additional harmonics with corresponding frequencies [10, 11].

Considering [9-11], the stator winding (with an integer number of slots per pole and phase) with magnetic and electrical symmetry of the motor acts as a filter for this frequency, passing only harmonics whose order satisfies the condition $(v = 6 \cdot c \pm 1)$ та $(v = 1 \pm kZ/p)$.

In the event of a fault, there is a disruption of the internal symmetry of the motor. In such a case, it is necessary to theoretically consider their impact on the operation mode. It is essential to identify harmonic components caused by bearing wear and inter-turn short circuits.

5. Conclusions

1. The application of current-based diagnostic methods for asynchronous motors is justified as they do not require intervention in the machine's construction. This allows simplification of the diagnostic system design and reduces capital costs for its implementation. Current-based methods, such as spectral analysis of currents, provide information about the machine's condition by measuring and analyzing electrical parameters reflecting mechanical status. This enables timely detection of anomalies and deviations in machine operation, facilitating planned maintenance and repair activities.

2. The theoretical justification of the functional relationship between the technological parameters of the asynchronous motor and the frequencies of the components of its stator current signal, where their influence manifests, will allow the identification of abnormal deviations from the respective technological parameters through monitoring of the harmonic components of the stator current.

References

1. Beaty, H.W., Kirtley, J.L. (1998). *Electric Motor Handbook. 1st Edition*. New York: McGraw Hill. [in English].
2. Allythi, F. (2020). *Three Phase Asynchronous Motors*. London: Noor Publishing. [in English].
3. Hraniak, V.F., Kukharchuk, V.V., Bogachuk, V.V., Vedmitskyi, Yu.G., Vishtak, I.V. Popiel, P., et al. (2018). Phase noncontact method and procedure for measurement of axial displacement of electric machine's rotor. *Proceedings of SPIE-International society for Optical Engineering*, 7, 10808 (1080866), [in English].
4. Yermieiev, I.S., Kyselov, V.B. *Avtomatyzovani systemy upravlinnia tekhnolohichnymy protsesamy [Automated control systems of technological processes]*. Zaporizhzhia: Helvetica. [in Ukrainian].
5. Honcharuk, I., Kupchuk, I., Yaropud, V., Kravets, R., Burlaka, S., Hraniak, V. (2022). Mathematical modeling and creation of algorithms for analyzing the ranges of the amplitude-frequency response of a vibrating rotary crusher in the software Mathcad. *Przeglad Elektrotechniczny*, 98 (9), 14–20. [in English].
6. Hraniak, V.F. (2023). Using discrete wavelet analysis of vibration signal for detection of electrical machines' defects. *Revue Roumaine des Sciences Techniques-Série Électrotechnique et Énergétique*, 68 (4), 357–362. [in English].
7. Ostashevskyi, M.O., Yurieva, O.Yu. (2022). *Elektrychni mashyny i transformatory [Electric machines and transformers]*. Kyiv: Karavela. [in Ukrainian].
8. Khilov, V.S. (2021). *Teoretychni osnovy elektrotekhniki [Theoretical foundations of electrical engineering]*. Dnipro: National Technical University "Dnipro Polytechnic". [in Ukrainian].
9. Hrabko, V.V., Rozvodiuk, M.P., Levytskyi, S.M., Kazak, M.O. (2007). *Eksperymentalni doslidzhennia elektrychnykh mashyn. Chastyna III. Asynkhronni mashyny [Experimental studies of electric machines. Part III. Asynchronous machines]*. Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].
10. Kupin, A.I., Kuznietsov, D.I. (2016). *Informatsiina tekhnolohiia dlia hrupovoi diahnostryky asynkhronnykh elektrodyhuniv na osnovi spektralnykh kharakterystyk ta intelektualnoi klasyfikatsii [Information technology for group diagnosis of asynchronous electric motors based on spectral characteristics and intelligent classification]*. Kryvyi Rih: Publisher of FOP Chernyavskiy D.O. [in Ukrainian].
11. Sziki, G.A., Szanto, A., Kiss, J., Juhasz, G., Adamko, E. (2022). Measurement System for the Experimental Study and Testing of Electric Motors at the Faculty of Engineering, *University of Debrecen. Applied Sciences*, 12 (19), 1–18. [in English].
12. Kukharchuk, V.V., Katsyv, S.Sh., Hraniak, V.F., Madyarov, V.G., Kyivskiy, V.V., Prychepa, I. V., et al. (2020). Analysis of dependency current harmonics on load and filter parameters for asymmetrical network models. *Przeglad Elektrotechniczny*, 96 (9), 103–107. [in English].



13. Dambrauskas, K., Vanagas, J., Bugenis, S., Zimnickas, T., Kalvaitis, A. (2020). Methodology for Asynchronous Motor Impedance Measurement by Using Higher Order Harmonics. *Energies*, 13 (10), 2541. [in English].

ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА НА ФОРМУВАННЯ ТРИФАЗНОЇ СИСТЕМИ СТРУМУ СТАТОРА

Останніми десятиліттями усе активніше спостерігається тенденція до зростання ролі автоматизованих електроприводів, реалізованих на базі асинхронних електродвигунів. Це обумовлено рядом об'єктивних факторів, серед яких основними є розвиток математичних моделей асинхронних електродвигунів, що у свою чергу призвело до підвищення точності та функціональних можливостей систем їх керування, та активним розвитком силової напівпровідникової техніки, що у свою чергу обумовило підвищення ефективності та зменшення вартості силових частотних перетворювачів.

Варто відзначити і ту обставину, що наслідком сучасного технічного прогресу є зростання складності, вартості та технологічності виробничого обладнання, а отже, зростання потенційних втрат, що супроводжується його аварійною відмовою в процесі експлуатації. Ще однією тенденцією розвитку промисловості, як України, так і більшості промислово розвинутих країн світу, є збільшення кількості електрообладнання, яке відпрацювало свій номінальний термін служби. Оскільки між надійністю та часом напрацюванням обертових електричних машин існує обернено пропорційна залежність, то цілком логічним і очевидним наслідком цього є зростання актуальності побудови високоефективних систем їх діагностування.

У статті обґрунтовано доцільність застосування струмових методів діагностування асинхронних двигунів, як таких, що не передбачають необхідність втручання у конструкцію електричної машини, дозволяють спростити конструктивне виконання системи діагностування та знизити капітальні витрати на її побудову. А також теоретично обґрунтовано функціональний зв'язок між технологічними параметрами асинхронного двигуна та частотами складових струмового сигналу його статорного кола, на яких проявлятиметься їх вплив, що у перспективі дозволить ідентифікувати аномальні відхилення відповідних технологічних параметрів шляхом моніторингу гармонічних складових струму статора.

Ключові слова: асинхронний двигун, діагностування, струм статора, гармонічні складові, магнітне полк, збурення, технологічні параметри.

Ф. 15. Рuc. 1. Літ. 13.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valerii HRANIAK – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Power engineering, electrical engineering and electromechanics of Vinnytsia National Agrarian University. (3 Soniachna St., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: titanxp2000@ukr.net <https://orcid.org/0000-0001-6604-6157>).

Ihor KUPCHUK – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering Mechanics and Technological Processes in the Agricultural Industry of Vinnytsia National Agrarian University (3, Sonychna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: kupchuk.igor@i.ua, <http://orcid.org/0000-0002-2973-6914>).

Viacheslav ZLOTNITSKYI – project manager LCC INNOVINNPROM (Shevchenka St. 5A, Vinnytsia, Ukraine, 21036)

Yaroslav SAFTIUK – postgraduate student of the first year of majoring in 133 Industrial Mechanical Engineering of the Vinnytsia National Agrarian University. (Soniachna St., 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: groupyaroslav@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-9730-7198>).

ГРАНЯК Валерій Федорович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри Електротехніки, електроенергетики та електромеханіки Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: titanxp2000@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6604-6157>).

КУПЧУК Ігор Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри Інженерної механіки та технологічних процесів в АПК інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: kupchuk.igor@i.ua, <http://orcid.org/0000-0002-2973-6914>).

ЗЛОТНІЦЬКИЙ В'ячеслав Миколайович – менеджер проєктів ТОВ "ІННОВІННПРОМ" (м. Вінниця, вул. Шевченка 5А, 21036, e-mail: zlotnitskiy.slava@innovinnprom.com).

САФТЮК Ярослав Владиславович – аспірант першого року навчання зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: groupyaroslav@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-9730-7198>).