

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION  
AND SCIENCE OF UKRAINE

National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute"

**Вісник Національного  
технічного університету  
«ХПІ». Серія: Проблеми  
удосконалювання  
електричних машин  
і апаратів. Теорія  
і практика**

**Bulletin of the National  
Technical University  
"KhPI". Series:  
Problems of electrical  
machines and apparatus  
perfection. Theory  
and practice**

№ 1 (5) 2021

No 1 (5) 2021

Збірник наукових праць

Collection of Scientific papers

Видання засноване у 1961 р.

The edition was founded in 1961

Харків  
НТУ «ХПІ», 2021

Kharkiv  
NTU «KhPI», 2021

**Вісник Національного технічного університету «ХПІ».** Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика = Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Проблемы усовершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Problems of electrical machines and apparatus perfection. Theory and practice : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2021. – № 1 (5). – 61 с. – ISSN 2079-3944.

У збірнику представлені результати досліджень в електроапаратобудуванні, електромашинобудуванні, енергетиці, техніки сильних електричних і магнітних полів, теоретичної електротехніки, електричних станцій та мереж, а також з фундаментальних аспектів сучасних технологій.

Для науковців, викладачів вищої школи, аспірантів, студентів і фахівців.

The publication is devoted to the results of research in electrical apparatus engineering, electrical engineering, energy, technology of strong electric and magnetic fields, theoretical electrical engineering, power stations and networks, as well as on the fundamental aspects of modern technology.

For scientists, high school lecturers, graduate students, students and professionals.

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації  
КВ № 23781-13621Р від 14 лютого 2019 року

Мова статей – українська, російська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ» Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого рішенням Атестаційної колегії МОН України. Наказ № 886 (додаток 4) від 02.07.2020 р.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика», включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі в базу журналів відкритого доступу DOAJ (Directory of Open Access Journals), бібліографічну базу даних OCLC WorldCat (США), індексується в наукометричній базі Index Copernicus та пошуковими системами Google Scholar і Crossref; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

**Офіційний сайт видання:** <http://pema.khpi.edu.ua/>

Засновник  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»  
Редакційна колегія  
Головний редактор:  
Байда Є. І., д-р техн. наук, доц., НТУ "ХПІ", Харків,  
Україна  
Відповідальний секретар:  
Варшамова І. С., ст. викладач, НТУ «ХПІ», Україна  
Члени редколегії:  
Баранов М. І., д-р техн. наук, с.н.с., НДПКИ "Молнія" НТУ  
"ХПІ", Харків, Україна;  
Кропачек О. Ю., д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПІ", Харків,  
Україна;  
Плюгін В. Є., д-р техн. наук, проф., ХНУМГ, Харків,  
Україна;  
Середа О. Г., канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПІ", Харків,  
Україна;  
Шевченко С. Ю., д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПІ", Харків,  
Україна;  
Clemens Markus, Prof. Dr., Bergische Universität Wuppertal,  
Wuppertal, Germany;  
Dolezel Ivo, Prof., University of West Bohemia. Plzen, Czech  
Republic;  
Gurevich Vladimir, Honorary Prof., Senior specialist of Central  
Electric Lab., Israel Electric Corporation, Haifa, Israel;  
Kasolis Fotios, Dr., Bergische Universität Wuppertal,  
Wuppertal, Germany.  
Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».  
Протокол № 5 від 28.05.2021 р.

Founder  
National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute"  
Editorial staff  
Editor-in-chief:  
Baida E. I., dr. tech. sc., Ph. D. (Eng.), NTU "KhPI", Ukraine  
Executive secretary:  
Varshamova I. S., NTU "KhPI", Ukraine  
Editorial staff members:  
Baranov M. I., dr. tech. sc., prof, SRPDI "Molniya" NTU  
"KhPI", Ukraine;  
Kropachok O. Yu., dr. tech. sc., prof., NTU "KhPI", Ukraine;  
Pliugin V. E., dr. tech. sc., prof., O.M.Beketov National  
University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine;  
Sereda O. G., Ph. D. (Eng.), NTU "KhPI", Ukraine;  
Shevchenko S. Yu., dr. tech. sc., prof., NTU "KhPI", Ukraine;  
Clemens Markus, Prof. Dr., Bergische Universität Wuppertal,  
Wuppertal, Germany;  
Dolezel Ivo, Prof., University of West Bohemia. Plzen, Czech  
Republic;  
Gurevich Vladimir, Honorary Prof., Senior specialist of Central  
Electric Lab., Israel Electric Corporation, Haifa, Israel;  
Kasolis Fotios, Dr., Bergische Universität Wuppertal,  
Wuppertal, Germany.

Є. І. БАЙДА, О. Г. КОРОЛЬ

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ІНДУКЦІЙНО-ДИНАМІЧНОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З РУХОМИМ ІНДУКТОРОМ ТА ДВОМА ДИСКАМИ

**Загальний опис теми дослідження.** У статті проведено комплексне дослідження традиційних індукційно-динамічних механізмів (з одним диском та нерухомою котушкою) і мультиякірних індукційно-динамічних механізмів (лінійних імпульсних індукційних перетворювачів) з рухомою котушкою і двома дисками. **Актуальність теми.** Подібні індукційно-динамічні механізми широко застосовуються в різних галузях, зокрема, в електроапаратуванні, де швидкість є однією з найважливіших характеристик. **Метою статті** є порівняльний аналіз і уточнення характеристик традиційної індукційно-динамічної системи з одним диском і нерухомою котушкою і мультиякірної – з рухомою котушкою і двома дисками. **Метод досліджень, наукова новизна.** Розрахунки проведені на підставі рішення рівнянь електромагнітного поля і рівнянь для електричного кола котушки. **Практична значимість і основні висновки.** В ході розрахунків були визначені значення електромагнітної сили і імпульсу сили, що діють на рухомий диск, втрати енергії в системі і електромагнітна енергія системи. Результати дослідження показані у вигляді графіків, а саме, струм котушки і сумарна магнітна енергія для традиційного індукційно-динамічного механізму з одним диском і для мультиякірної – з двома дисками, втрати Джоуля в нерухомій котушці і диску (в традиційній системі) і в рухомій котушці і двох дисках (в мультиякірній системі), імпульс сили і електромагнітна сила рухливої котушки (в мультиякірній системі) і рухомого диска (в традиційній і мультиякірній системі), сумарний імпульс рухомих частин індукційно-динамічного механізму з мультиякірною системою, а також електромагнітна сила і сумарна сила, що діє на рухомі частини індукційно-динамічного механізму з мультиякірною системою. Показано, що індукційно-динамічний механізм з двома дисками менш ефективний щодо електромагнітної сили, імпульсу і електромагнітної енергії, ніж індукційно-динамічний механізм традиційної компоновки.

**Ключові слова:** індукційно-динамічний механізм, мультиякірна система, традиційна система.

Е. И. БАЙДА, Е. Г. КОРОЛЬ

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ С ПОДВИЖНЫМ ИНДУКТОРОМ И ДВУМЯ ДИСКАМИ

**Общее описание темы исследования.** В статье проведено комплексное исследование традиционных индукционно-динамических механизмов (с одним диском и неподвижной катушкой) и мультиякорных индукционно-динамических механизмов (линейных импульсных индукционных преобразователей) с подвижной катушкой и двумя дисками. **Актуальность темы.** Подобные индукционно-динамические механизмы широко применяются в различных отраслях, в частности, в электроаппаратостроении, где быстродействие является одной из важнейших характеристик. **Целью статьи** является сравнительный анализ и уточнение характеристик традиционной индукционно-динамической системы с одним диском и неподвижной катушкой и мультиякорной – с подвижной катушкой и двумя дисками. **Метод исследований, научная новизна.** Расчеты проведены на основании решения уравнений электромагнитного поля и уравнений для электрической цепи катушки. **Практическая значимость и основные выводы.** В ходе расчетов были определены значения электромагнитной силы и импульса силы, действующих на подвижный диск, потери энергии в системе и электромагнитная энергия системы. Результаты исследования показаны в виде графиков, а именно, ток катушки и суммарная магнитная энергия для традиционного индукционно-динамического механизма с одним диском и для мультиякорного – с двумя дисками, потери Джоуля в неподвижной катушке и диске (в традиционной системе) и в подвижной катушке и двух дисках (в мультиякорной системе), импульс силы и электромагнитная сила подвижной катушки (в мультиякорной системе) и подвижного диска (в традиционной и мультиякорной системе), суммарный импульс подвижных частей индукционно-динамического механизма с мультиякорной системой, а также электромагнитная сила и суммарная сила, действующая на подвижные части индукционно-динамического механизма с мультиякорной системой. Показано, что индукционно-динамический механизм с двумя дисками менее эффективен по электромагнитной силе, импульсу и электромагнитной энергии, чем индукционно-динамический механизм традиционной компоновки.

**Ключевые слова:** индукционно-динамический механизм, мультиякорная система, традиционная система.

Ye.I. BAIDA, O.G. KOROL

## COMPARATIVE ANALYSIS OF ELECTROMECHANICAL PROCESSES IN INDUCTION-DYNAMIC CONVERTER WITH MOBILE INDUCTOR AND TWO DISKS

**General description of the research topic.** The article presents a comprehensive study of traditional induction-dynamic mechanisms (with one disk and a fixed coil) and multi-core induction-dynamic mechanisms (linear pulse induction converters) with a movable coil and two disks. **Actuality of the topic.** Such induction-dynamic mechanisms are widely used in various fields, in particular, in electrical apparatus industry, where speed is one of the most important characteristics. **The purpose of the article** is a comparative analysis and refinement of the characteristics of the traditional induction-dynamic system with one disk and a fixed coil and multi-core one with a movable coil and two disks. **Research method, scientific novelty.** The calculations are based on the solution of the equations of the electromagnetic field and the equations for the electric circuit of the coil. **Practical significance and main conclusions.** During the calculations, the values of electromagnetic force and force impulse acting on the moving disk, energy losses in the system and electromagnetic energy of the system are determined. The results of the study are presented in the form of graphs, namely, the coil current and total magnetic energy for a traditional induction-dynamic mechanism with one disk and for multi-core one with two disks, Joule losses in a fixed coil and disk (in a traditional system) and in a moving coil and two disks (in a multi-core system), force impulse and electromagnetic force of a moving coil (in a multi-core system) and a moving disk (in a traditional and a multi-core system) total impulse of the moving parts of the induction-dynamic mechanism with a multi-core system, as well as the electromagnetic force and the total force acting on the moving parts of the induction-dynamic mechanism with a multi-core system. It is shown that the induction-dynamic mechanism with two disks is less effective in terms of electromagnetic force, impulse and electromagnetic energy than the induction-dynamic mechanism of the traditional layout.

**Key words:** induction-dynamic mechanism, multi-core system, traditional system.

**Введение.** Индукционно-динамические механизмы (ИДМ) широко используются в различных электротехнических устройствах [1-4]. Они просты по конструкции, надежны и обладают высоким быстро-

действием.

В последнее время одним из направлений исследований ИДМ являются мультиякорные системы [5]. Причем, обоснованием для исследования таких систем

© Є.І. Байда, О.Г. Король, 2021

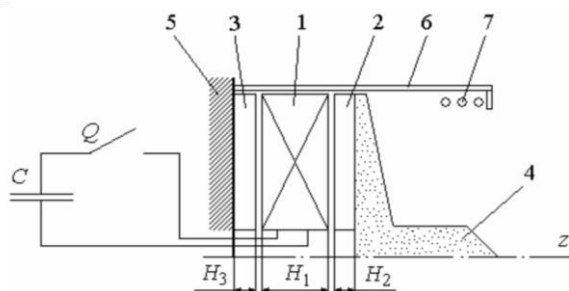
служит утверждение «поскольку в традиционной конструкции линейных импульсно-индукционных электромеханических преобразователей индукционно с диском взаимодействует только одна сторона катушки, то значительная часть магнитного поля с противоположной стороны катушки рассеивается в окружающее пространство и не используется для создания дополнительных электродинамических усилий (ЭДУ)». Дополнительные ЭДУ, повышающие эффективность системы, предполагается получить путем изменения конструкции, а именно, между неподвижным и подвижным дисками расположить подвижную катушку, которая «отталкиваясь от неподвижного диска, помогала бы разгонять подвижный диск».

В приведенной работе исследуется влияние различных параметров на движение подвижного диска, но сравнительный анализ традиционной индукционно-динамической системы и мультякорной системы [5] проведено недостаточно полно, а именно это и определяет жизнеспособность новой конструкции ИДМ. А утверждение о нерациональном использовании магнитного поля и получении дополнительных электромагнитных сил требует дополнительной проверки.

**Цель статьи** – сравнительный анализ и уточнение характеристик традиционной индукционно-динамической системы с одним диском и неподвижной катушкой и мультякорной – с подвижной катушкой и двумя дисками.

**Новизна.** К научной новизне статьи можно отнести комплексное исследование, уточнение физических процессов и сравнительный анализ традиционных и предлагаемых мультякорных ИДМ.

**Описание модели, основные допущения, схема подключения катушки и задача расчета.** На рис. 1 приведена расчетная схема мультякорной системы в цилиндрической системе координат такой, какой она рассматривается в [5].



1 – подвижная катушка; 2 – подвижный диск;  
3 – неподвижный диск; 4 – немагнитный ударный элемент;  
5 – немагнитное основание; 6 – направляющие;  
7 – возвратная пружина

Рис. 1. Расчетная схема индукционно-динамического механизма с подвижной катушкой и двумя дисками

#### Допущения, принимаемые при расчетах.

1. При расчетах не рассматривалось движение подвижных элементов системы, так как для анализа её работы вполне достаточно получаемых данных на основании решения системы уравнений электрической цепи и электромагнитного поля (анализ движения с различными массами катушки и диска планируется в дальнейшем).

2. Геометрические размеры катушки и дисков, а также расстояния между ними не изменялись.

3. Ёмкость конденсатора и начальное напряжение заряда конденсатора оставались неизменными.

4. Электрическая разрядная схема включает диод, подключенный параллельно катушке, что обеспечивает аperiодическую форму разрядного тока. Такая схема позволяет полностью использовать энергию конденсатора, не допуская его перезаряда.

Задачей расчета было определение значений электромагнитной силы и импульса силы, действующих на подвижный диск, потери энергии в системе и электромагнитная энергия системы.

**Расчетные соотношения.** Основным расчетным соотношением является система уравнений нестационарного электромагнитного поля вид которых зависит от параметров расчетной области. Граничные условия: отсутствия поля на внешней границе расчетной области и аксиальная симметрия поля по оси  $z$ .

Так как, катушка намотана относительно тонким проводом, то её область представлена как область с малой проводимостью и равномерно распределенной суммарной плотностью тока по поперечному сечению. В общем случае уравнение для векторного магнитного потенциала при отсутствии ферромагнитных элементов может быть записано

$$\sigma_j \cdot \frac{\partial \vec{A}_j}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \times (\nabla \times \vec{A}_j) = \delta_{stj}, \quad (1)$$

где  $\sigma_j$  – удельная электропроводность материала;  $\vec{A}_j$  – векторный магнитный потенциал;  $\mu_0$  – абсолютная магнитная проницаемость;  $\delta_{stj} = \frac{i \cdot w}{S} \cdot \mathbf{e}_\varphi$  – сторонняя плотность тока катушки;  $i$  – ток в катушке;  $w$  – число витков;  $j=1 \dots N$  – число расчетных областей;  $S$  – площадь поперечного сечения катушки;  $\mathbf{e}_\varphi$  – орт.

Произведя соответствующие операции с (1) можно получить уравнение

$$\left( \begin{array}{c} \mu_0 \cdot \sigma_j \cdot \frac{\partial A_\varphi}{\partial t} - \frac{\partial^2 A_\varphi}{\partial z^2} + \frac{A_\varphi + r \cdot \frac{\partial A_\varphi}{\partial r}}{r^2} - \\ \frac{2 \cdot \frac{\partial A_\varphi}{\partial r} + r \cdot \frac{\partial^2 A_\varphi}{\partial r^2}}{r} \end{array} \right) \cdot \mathbf{e}_\varphi = (\mu_0 \cdot \delta_{stj}) \cdot \mathbf{e}_\varphi, \quad (2)$$

где  $A_\varphi$  – угловая составляющая векторного магнитного потенциала, зависящая от времени и координат;  $j$  – индекс, определяющий расчетную область.

Условия на границах будут определяться исходя из уравнения

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0, \quad (3)$$

где  $\mathbf{n}$  – вектор нормали к границе.

Система (2) будет различаться для каждой из расчетных областей (воздух, катушка, диск) значениями проводимости и правой частью уравнения (1), (2).

Система уравнений (2), (3) должна быть дополнена уравнением электрической цепи при нулевых началь-

ных условиях

$$\begin{cases} L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i = \left( U_{c0} - \frac{q}{C} \right) \cdot \delta + E; \\ \frac{dq}{dt} = i, \end{cases} \quad (4)$$

где  $L$  – внешняя индуктивность рассеяния;  $R$  – активное сопротивление проводов и катушки;  $i$  – ток катушки;  $U_{c0}$  – начальное напряжение на конденсаторе;  $E$  – противо-ЭДС катушки, зависящая от производной по времени от векторного магнитного потенциала;  $q$  – электрический заряд;  $\delta$  – единичная функция, моделирующая аperiодический разряд конденсатора

$$\delta = \begin{cases} 1, & \left( U_{c0} - \frac{q}{C} \right) > 0 \\ 0, & \left( U_{c0} - \frac{q}{C} \right) \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

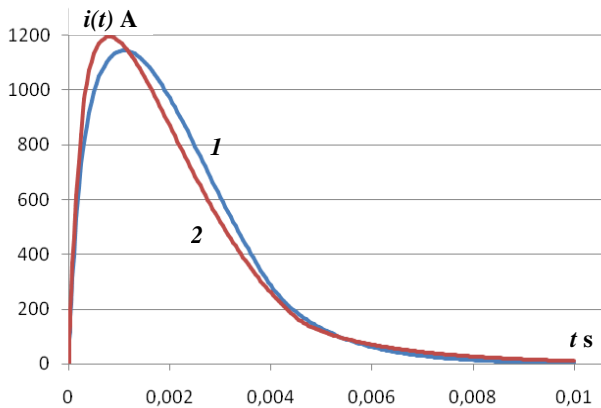
Противо-ЭДС катушки определялась как

$$E = - \frac{2 \cdot \pi \cdot w}{S} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left( \int_S A_\varphi \cdot r \cdot dr \cdot dz \right) \quad (6)$$

**Постоянные параметры.** Размеры катушки и подвижного диска: радиус 30 мм; толщина подвижного диска 1,75 мм. Катушка намотана проводом диаметром 1 мм. Число витков равно 93.

Электрические параметры модели: сопротивление катушки и проводов 0,2 Ом; начальное напряжение заряда конденсатора 400 В; ёмкость конденсатора 8000 мкФ; внешняя индуктивность рассеяния 10 мкГн.

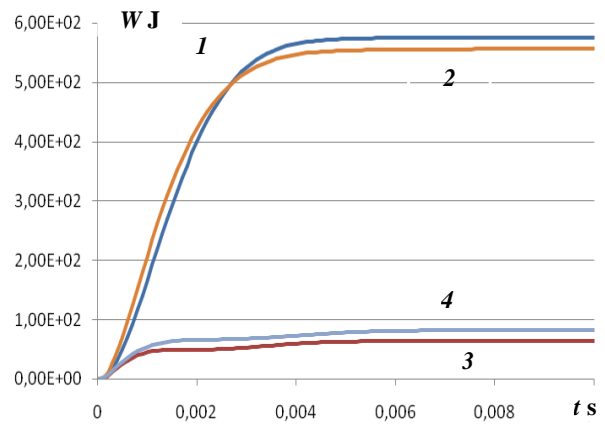
**Результаты расчетов.** Вначале был проведен расчет токов катушки. На рис. 2 показаны токи катушек в случае одного и двух дисков.



1 – традиционная ИДМ с одним диском и неподвижной катушкой; 2 – мультиякорная система с подвижной катушкой и двумя дисками  
Рис. 2. Токи катушки

Как видно из рис. 2, ток в случае двух дисков больше. Такая амплитуда и форма тока обусловлена меньшей индуктивностью системы, которая увеличивает ток и уменьшает постоянную времени цепи.

Для оценки эффективности системы на рис. 3 представлены значения тепловых потерь в системе (интегралы Джоуля).



1, 3 – потери в неподвижной катушке и диске (в традиционной системе); 2, 4 – потери в подвижной катушке и двух дисках (в мультиякорной системе)  
Рис. 3. Потери Джоуля в системе

Максимальные значения потерь: а) катушка – один диск 575,3 Дж; катушка – два диска 556,2 Дж; б) один диск – 64 Дж; два диска суммарные – 82,3 Дж.

Суммарные потери в системе с двумя дисками больше, чем в системе с одним диском. Однако тепловые потери в системах отличаются незначительно – 639,2 Дж и 638,95 Дж.

Так как одной из основных характеристик ИДМ является значение скорости подвижного элемента, то следующим этапом расчетов было определение импульса подвижных элементов систем, который определяется по формуле

$$S = \int_t F \cdot dt, \quad (7)$$

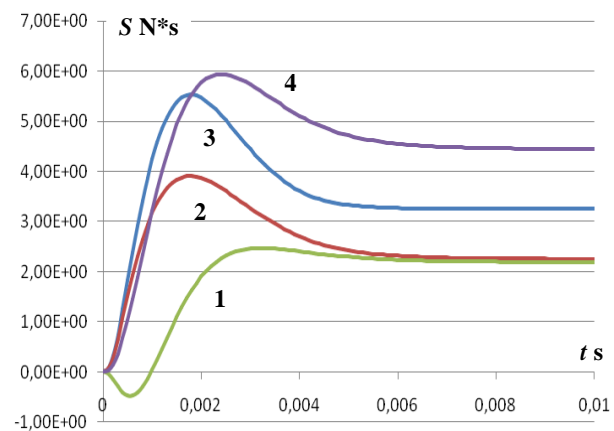
где  $S$  – импульс силы;  $F$  – сила.

Зная значение импульса, можно оценить значение скорости подвижных элементов и кинетическую энергию движущихся частей

$$v = \frac{S}{m}, \quad W = \frac{S^2}{2 \cdot m}, \quad (8)$$

где  $v$  – скорость;  $m$  – масса движущихся частей.

На рис. 4 показаны значения импульса системы.

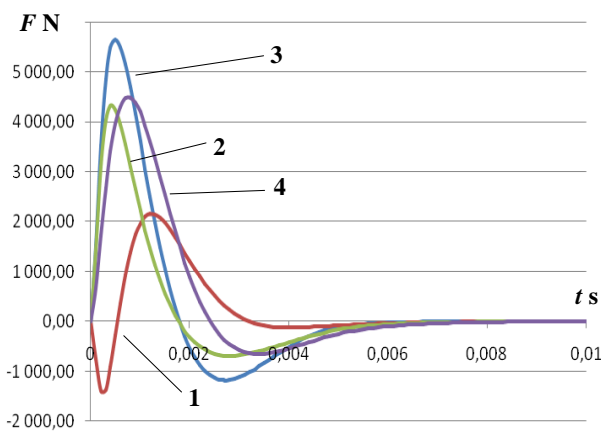


1 – подвижная катушка в мультиякорной ИДМ; 2 – подвижный диск в мультиякорной ИДМ; 3 – диск в традиционной ИДМ; 4 – суммарный импульс подвижных частей ИДМ с мультиякорной системой  
Рис. 4. Значение импульса силы системы

Как видно из рис. 4, в начальные моменты времени на катушку действует отрицательный импульс, но суммарный импульс катушки и подвижного диска в мультякорной системе больше, чем в ИДМ традиционной компоновки.

Что касается скорости разгона. В мультякорной системе скорость подвижных элементов будет меньше: если диск не связан с катушкой – его импульс меньше, чем у ИДМ традиционной компоновки; если диск и катушка единое целое, то скорость будет определяться суммарной массой движущихся элементов (диска с ударным элементом и массой катушки). Предварительный анализ (по значению максимального значения импульса) показывает, что скорость диска и катушки в мультякорной системе приближается к скорости движения диска в ИДМ традиционной компоновки только в том случае, когда масса диска и ударника много больше массы катушки. Для всех остальных вариантов скорость движения якоря в мультякорной системе меньше, чем в традиционной.

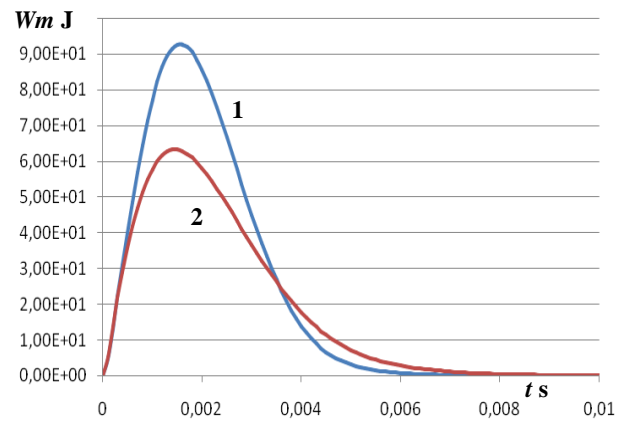
Данные по электромагнитной силе, действующей на подвижные элементы первой и второй системы, показаны на рис. 5. Наибольшее значение электромагнитной силы наблюдается в ИДМ традиционной компоновки. Необходимо отметить, что и отрицательное значение силы в этом случае наибольшее, однако, как правило, к этому времени (отрицательное значение силы) подвижные элементы системы успевают отойти от катушки на достаточное расстояние и замедление на подвижных элементах сказывается незначительно.



1 – подвижная катушка в мультякорной ИДМ;  
2 – подвижный диск в мультякорной ИДМ;  
3 – диск в традиционной ИДМ;  
4 – суммарная сила, действующая на подвижные части ИДМ с мультякорной системой

Рис. 5. Значение электромагнитной силы

Последним расчетом было определение суммарной магнитной энергии систем.



1 – традиционная ИДМ с одним диском и неподвижной катушкой; 2 – мультякорная система с подвижной катушкой и двумя дисками

Рис. 6. Суммарная магнитная энергия системы

Как следует из рис. 6, энергия, запасаемая в магнитном поле системы для традиционной конструкции ИДМ больше, что и обуславливает большую электромагнитную силу.

### Выводы

1. Проведенные расчеты показывают, что по суммарным тепловым потерям две системы практически эквивалентны.
2. При одной и той же массе подвижного диска квадрат импульса силы в традиционной конструкции ИДМ больше, чем в мультякорной примерно в 1,9 раза, что определяет большую скорость движения.
3. Если имеется несимметричность расположения катушки между дисками, то на подвижную катушку в начальные моменты времени действует сила, направление которой зависит от соотношения расстояний до дисков.
4. Электромагнитная сила, действующая на подвижный диск, в ИДМ традиционной конструкции больше по величине и длительней по воздействию, чем в мультякорной системе.
5. Электромагнитная энергия поля (производная от которой по величине перемещения и определяет электромагнитную силу) так же больше для ИДМ традиционной конструкции.
6. Подвижная катушка является одним из самых ненадежных элементов конструкции, так как на неё и токоподводы к ней действует ускорение сотни единиц ускорения свободного падения. Особенно подвержены силовому воздействию места крепления выводов к катушке.
7. Мультякорная система не имеет особых преимуществ перед ИДМ традиционной конструкции, по крайней мере, для исследуемой модели.

### Список литературы

1. Болух В.Ф., Кашанский Ю.В., Щукин И.С. Влияние геометрических параметров индуктора и якоря на показатели линейного импульсного электромеханического преобразователя электродинамического типа. *Электротехника і електромеханіка*, – 2019. – №3. – С. 11–17. doi: 10.20998/2074-272X.2019.3.02.
2. Байда Е.И. Математическое моделирование индукционно-динамических систем. *Электротехника і електромеханіка*, 2009. – №5. – С. 13–16. doi: 10.20998/2074-272X.2009.5.02.

3. WeijieWen, YulongHuang, Member, IEEE, MohmmadAl-Dweikat, Zu'anZhang, TiehanCheng, ShutongGaoandWeidongLiu. Research on Operating Mechanism for Ultra-fast 40.5kV Vacuum Switches. IEEE Power & Energy Society, 24 March 2015. P. 2553–2560. doi: **10.1109/TPWRD.2015.2409122**.
4. Теория электрических аппаратов. Учебник для вузов по спец. "Электрические аппараты" / Г.Н. Александров, В.В. Борисов, В.А. Иванов и др. Под ред. проф. Г.Н. Александрова. – М.: Высшая школа, 1985. 312 с.
5. В.Ф. Болюх, А.И. Кочерга, И.С. Шукин. Электромеханические процессы в линейном импульсно-индукционном электромеханическом преобразователе с подвижным индуктором и двумя якорями. *Электротехника і електромеханіка*, – 2018. – № 2. – С. 11–17. doi: **10.20998/2074-272X.2018.2.02**.
6. Рамо С., Уинерри Дж. Поля и волны в современной радиотехнике. Перевод с английского. Москва, ОГИЗ, 1948. 631 с.
2. BaidaE.I. *Matematicheskoe modelirovanie induktsionno-dinamicheskikh sistem*. [Mathematical modeling of induction-dynamic systems]. *Elektrotehnika i elektromekhanika*, 2009. №5, p.p. 13–16.
3. Weijie Wen, Yulong Huang, Member, IEEE, Mohmmad Al-Dweikat, Zu'an Zhang, Tiehan Cheng, Shutong Gao and Weidong Liu. *Research on Operating Mechanism for Ultra-fast 40.5kV Vacuum Switches*. [Research on Operating Mechanism for Ultra-fast 40.5kV Vacuum Switches]. IEEE Power & Energy Society, 24 March 2015, p.p. 2553–2560. doi:10.1109/TPWRD.2015.2409122.
4. *Teoriya elektricheskikh apparatov. Uchebnik dlia vtuzov po spets. "Elektricheskie apparaty"*. [Theory of electrical apparatus. Textbook for high schools on special. "Electrical apparatus"]. G.N. Aleksandrov, V.V. Borisov, V.A. Ivanov i dr. Pod red. prof. G.N. Aleksandrova. – Moscow: Vysshiaia shkola, 1985. 312 p.
5. V.F. Bolyuh, A.I. Kocherga, I.S. Schukin. *Elektromehaniicheskie protsessy v lineynom impulsno-induktsionnom elektromehaniicheskom preobrazovatele s podvizhnyim induktorom i dvumyayakoryami*. [Electromechanical processes in a linear pulse-induction electromechanical converter with a movable inductor and two armatures]. *Elektrotehnika i elektromekhanika*, – 2018. – № 2. – P. 11–17. doi: **10.20998/2074-272X.2018.2.02**.
6. Ramo S., UinerriDzh. *Poliavolny v sovremennoi radiotekhnike*. [Fields and waves in modern radio engineering]. *Perevod s angliiskogo*. Moscow, OGIZ, 1948. 631 p.

#### References (transliterated)

1. Boliukh V.F., Kashanskii Iu.V., Shchukin I.S. *Vlianie geometricheskikh parametrov induktora i iakoria na pokazateli lineinogo impul'sno goelektromekhanicheskogo preobrazovatelja elektrodinamicheskogo tipa*. [The influence of the geometric parameters of the inductor and the armature on the performance of a linear pulse electromechanical transducer of electrodynamic type]. *Elektrotehnika i elektromekhanika*, – 2019. – № 3. – P. 11–17. doi: 10.20998/2074-272X.2019.3.02

Поступила (received) 15.04.2021

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Байда Євген Іванович (Байда Евгений Иванович, Baida Evgen Ivanovich)** – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідуючий кафедрою електричних апаратів, м. Харків, e-mail: baida.kpi@gmail.com.

**Король Олена Геннадіївна (Король Елена Геннадьевна, Korol Olena Gennadiivna)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; e-mail: korolelgn@gmail.com

*Є.І. БАЙДА, О.О. ЧЕПЕЛЮК*

### УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ СТАЛОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ПОСТІЙНОЇ ЧАСУ НАГРІВУ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ

У статті запропоновано удосконалення методу визначення сталої температури нагріву струмоведучих частин електричного апарату і його постійної часу нагріву в разі реальних вимірів значень температури, виконаних з деякою помилкою. У відповідності із зазначеним методом при відомій температурі навколишнього середовища проводиться включення апарату з вимірюванням температури його нагріву через однакові проміжки часу; за даними вимірів будується графік похідної від температури за часом; за даними графіка визначається стала температура і постійна часу нагріву. Показано, що неточності вимірювання температури можуть істотно спотворювати отримувані для визначення постійної часу та сталої температури нагріву залежності і для правильної оцінки параметрів необхідно вид апроксимуючої функції похідною температури за часом знати априорі - лінійна функція. Даний метод дозволяє істотно скоротити час випробувань електричних апаратів на нагрів в тривалому режимі роботи. Зазначений метод проілюстровано на прикладі визначення нагріву котушки в часі методом вимірювання активного опору. На підставі отриманих і оброблених експериментальних даних визначаються також коефіцієнти перевантаження по потужності в тривалому режимі роботи, а також у короткочасному та повторно-короткочасному режимах, що дозволяє правильно експлуатувати електричний апарат.

**Ключові слова:** електричний апарат, температура нагріву, постійна часу нагріву, режим роботи, коефіцієнт перевантаження.

*Е.И. БАЙДА, А.А. ЧЕПЕЛЮК*

### УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСТАНОВИВШЕЙСЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В статье предложено усовершенствование метода определения установившейся температуры нагрева токоведущих частей электрического аппарата и его постоянной времени нагрева в случае реальных измерений значений температуры, выполненных с некоторой ошибкой. В соответствие с указанным методом при известной температуре окружающей среды производится включение аппарата с замером температуры его нагрева через одинаковые промежутки времени; по данным измерений строится график производной от температуры по времени; по данным графика определяется установившаяся температура и постоянная времени нагрева. Показано, что неточности измерения температуры могут существенно исказить получаемые для определения постоянной времени и установившейся температуры зависимости и для правильной оценки параметров необходимо вид аппроксимирующей функции производной температуры по времени знать априори - линейная функция. Данный метод позволяет существенно сократить время испытаний электрических аппаратов на нагрев в продолжительном режиме работы. Указанный метод проиллюстрирован на примере определения нагрева катушки во времени методом измерения активного сопротивления. На основании полученных и обработанных экспериментальных данных определяются также коэффициенты перегрузки по мощности в длительном режиме работы, а также в кратковременном и повторно-кратковременном режимах, что позволяет правильно эксплуатировать электрический аппарат.

**Ключевые слова:** электрический аппарат, температура нагрева, постоянная времени нагрева, режим работы, коэффициент перегрузки.

*E.I. BAIDA, O.O. CHEPELIUK*

### ADVANCED METHOD FOR DETERMINING THE STEADY TEMPERATURE AND CONSTANT HEATING TIME OF ELECTRIC APPARATUS

The article proposes an improvement in the method for determining the steady-state heating temperature of current-carrying parts of an electrical apparatus and its time constant in the case of real measurements of temperature values made with some error. In accordance with the specified method, at a known ambient temperature, the apparatus is turned on with the measurement of its heating temperature at regular intervals; based on the measurement data, a graph of the temperature derivative is plotted over time; according to the data of the graph, the steady-state temperature and the constant heating time are determined. It is shown that inaccuracies in temperature measurement can significantly distort the dependences obtained for determining the time constant and the steady-state heating temperature, and for a correct estimation of the parameters, the form of the approximating function of the temperature derivative with respect to time must be known a priori - a linear function. This method can significantly reduce the time for testing electrical devices for heating in continuous operation. This method is illustrated by the example of determining the heating of the coil over time by measuring the active resistance. On the basis of the obtained and processed experimental data, the power overload coefficients are also determined in the long-term operation mode, as well as in the short-term and intermittent modes, which makes it possible to correctly operate the electrical apparatus.

**Key words:** electric apparatus, heating temperature, heating time constant, operating mode, overload coefficient.

**Введение.** Функцией электрических аппаратов является защита людей, животных, имущества и окружающей среды от губительного воздействия электрической энергии [1]. Одним из проявлений таких функций является нагрев токоведущих частей при протекании по ним электрического тока. При этом, защищая людей, животных, имущество и окружающую среду электрический аппарат не должен и сам перегреваться в процессе работы (температура частей аппарата не должна превышать допустимых значений) [2]. Поэтому сам аппарат также должен проходить тепловые испытания по определенной методике [2].

Помимо определения температуры в продолжительном режиме работы, электрические аппараты должны проходить проверку на термическое воздействие токов перегрузки и короткого замыкания (проверка на термическую стойкость) [3]. При этом нельзя измерить установившуюся температуру нагрева устройства. Можно говорить лишь о допустимом значении интеграла Джоуля, который определяет тепловое воздействие тока за определенный промежуток времени [1]. В этом случае для расчетов температуры удобнее воспользоваться значением постоянной времени нагрева, определяющей скорость нагрева электрического аппарата.



Одним из способов определения температуры токоведущих частей электрических аппаратов, в частности – их обмоток, является метод определения температуры методом измерения активного сопротивления в установившемся тепловом режиме [2]. Недостатками такого метода является невозможность определения постоянной времени нагрева и длительность испытаний. Тепловым режимом считают установившимся, если температура отдельных частей аппарата не изменяется более чем на 1°C в течение 1 часа [2]. Иногда такой процесс может длиться несколько часов и даже суток. Кроме этого, неопределенность постоянной времени нагрева не дает возможность определить допустимую термическую стойкость электрического аппарата.

**Метод определения установившейся температуры и постоянной времени процесса нагрева.** Метод приведен в литературе [4] и заключается в следующем: при известной температуре окружающей среды производится нагрев аппарата с замером температуры его нагрева через одинаковые промежутки времени; по данным измерения строится график производной от температуры по времени; по данным графика определяется установившаяся температура и постоянная времени нагрева (рис. 1).

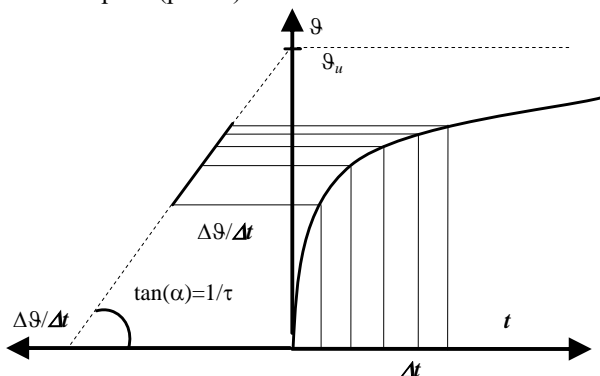


Рис. 1. Определение установившейся температуры и постоянной времени графическим методом

В [4] показано, что функция  $\Theta' = f(\Theta)$  – прямая линия, но непонятно, что будет, если при построении графика  $\Theta = \varphi(t)$  значения температур будут измерены с некоторой ошибкой? Очевидно, что в случае неточных значений температур (ошибки в измерении) линия  $\Theta' = f(\Theta)$  может значительно отличаться от линии, показанной на рис. 1 за счет увеличения ошибки при вычислении производной.

Поэтому целью статьи является усовершенствование метода определения установившейся температуры нагрева и его постоянной времени в случае реальных измерений значений температуры выполненных с некоторой ошибкой.

**Теоретическая часть.** Известно [4], что динамика изменения температуры нагрева тела может быть описана уравнением

$$\Theta = (\Theta_u - \Theta_0) \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + \Theta_0, \quad (1)$$

где  $\Theta_u$  – установившаяся температура;  $\Theta_0$  – начальная температура;  $\tau$  – постоянная времени.

Производная от (1) по времени будет определять

скорость нагрева устройства

$$\Theta' = \frac{(\Theta_u - \Theta_0)}{\tau} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (2)$$

где  $\Theta'$  – производная от температуры по времени.

Определив из (1)  $e^{-\frac{t}{\tau}}$  и подставив это значение в (2) получим значение производной в функции температуры

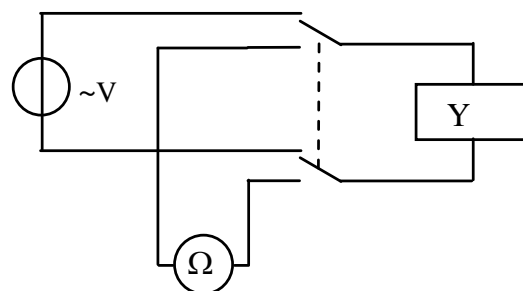
$$\Theta' = \frac{\Theta_u}{\tau} - \frac{\Theta}{\tau}. \quad (3)$$

Дальнейшая задача сводится к определению температуры устройства. Измерение температуры может проводиться методом термодпар, методом сопротивлений [2], также измерение температуры может проводиться пирометрами и др.

Термодпары (если они не встроены внутрь устройства) измеряют температуру поверхности объекта. Кроме того, необходимо учитывать ошибку в измерении за счет отвода термодпарой тепла. Такая ошибка может быть значительной [6]. Пирометры сложны в использовании, измеряют среднюю температуру поверхности и требуют определенной настройки. Потому для токоведущих частей электрических аппаратов, в частности их обмоток, более подходящим является определение температуры методом сопротивлений, с помощью которого можно определить среднюю по объёму температуру.

Схема для измерения активного сопротивления катушки переменного тока достаточно проста – рис. 2.

Последовательность измерений: 1) при известной температуре окружающей среды измеряется начальное сопротивление катушки; 2) катушка подключается к источнику напряжения; 3) измерение сопротивления производится через равные промежутки времени. Так как измерения сопротивления проводятся в течение 1...2 секунд, то время измерения практически не сказывается на точности измерения температуры катушки.



~V – источник переменного напряжения; Ω – омметр; Y – катушка

Рис. 2. Схема измерения сопротивления

Предположим, что за время измерений температура окружающей среды не изменилась, тогда рассчитать температуру по измеренным значениям сопротивлений можно по формуле

$$\Theta = \frac{R_{\Theta} - R_0}{\alpha} + \Theta_0, \quad (4)$$

где  $R_{\vartheta}$  – сопротивление при температуре  $\vartheta$ ;  $R_0$  – сопротивление при температуре  $\vartheta_0$ ;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления равный для меди 1/235.

**Пример расчетов температуры.** В качестве примера приведен расчет нагрева катушки электромагнита переменного тока в притянутом положении якоря при напряжении источника питания 220 В. Температура окружающей среды равнялась 20 °С. Интервал времени измерения – 5 мин.

Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты измерения сопротивления, вычисления температуры и её производной

$t$ , мин	$R_{\vartheta}$ , Ом	$\vartheta$ , °С	$\vartheta'$ , °С/мин
0	43,8	20	
5	44,4	23,22603	0,645205
10	44,8	25,37671	0,430137
15	45,2	27,5274	0,430137
20	45,5	29,14041	0,322603
25	45,8	30,75342	0,322603
30	46	31,82877	0,215068
35	46,2	32,90411	0,215068

Обработка данных при помощи электронных таблиц Excel показана на рис. 3-4.

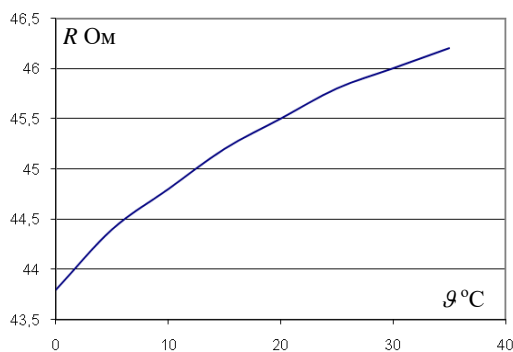


Рис. 3. Значение активного сопротивления катушки в функции температуры

Как видно из графика, в результате неточностей измерения, полученная зависимость имеет волнистый характер.

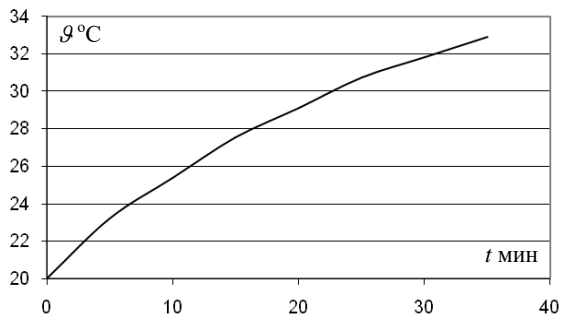


Рис. 4. Значение средней по объёму температуры катушки в функции времени

График температуры, как и график изменения сопротивления, имеет волнистый характер, что связано с неточностями измерения. На рис. 5 показан график производной от температуры.

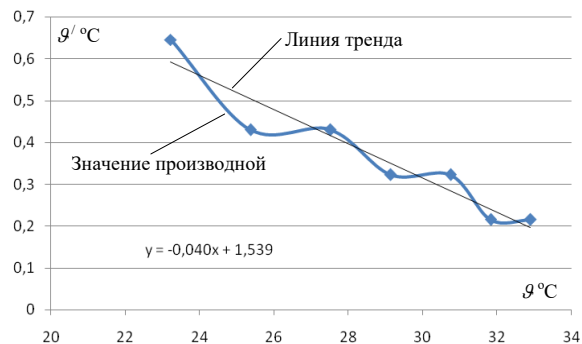


Рис. 5. Значение производной от температуры катушки в функции температуры

Как видно из рис. 5, ошибки измерения температуры приводят с существенному искажению теоретической зависимости  $\vartheta' = f(\vartheta)$ , по значению производной сложно определить вид аппроксимирующей функции.

На полученном участке лучшую аппроксимацию с точки зрения сглаживания данных (но **неправильную**) даёт и экспоненциальная и логарифмическая зависимость. Поэтому вид линии тренда надо знать заранее (3).

Функция линии тренда показана на графике рис. 5

$$y = -0,04 \cdot x + 1,539 = k \cdot \vartheta + b. \quad (5)$$

Сопоставляя (3) и (5) можно заметить

$$\tau = -\frac{1}{k} = 25 \text{ [min]}, \quad \vartheta_u = -\frac{b}{k} = 38,5 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (6)$$

Как видно из табл. 1, измерения были проведены за 35 мин, а время достижения температурой установившегося значения равно  $4,6 \cdot \tau = 115$  мин.

Полученные экспериментальные данные позволяют приближенно определить целый ряд важных параметров работы катушки в различных тепловых режимах.

**Определение допустимой тепловой мощности по допустимой температуре нагрева.** При известной установившейся температуре нагрева и постоянной времени уравнение нагрева выглядит, как показано в формуле (1). Если исследовать зависимость установившейся температуры от выделяемой тепловой мощности в небольшом диапазоне (мощность тепловых источников незначительно меняется с температурой) [4], то можно положить

$$\theta_m = m^2 \cdot \theta_u, \quad (7)$$

где  $\theta_m$  – установившееся превышение температуры при выделяемой тепловой мощности в  $m^2$  больше номинальной;  $m$  – кратность напряжения или тока источника;  $\theta_u$  – установившееся превышение температуры при номинальной тепловой мощности. В этом случае уравнение (1) примет вид

$$\vartheta_m = m^2 \cdot (\vartheta_u - \vartheta_0) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + \vartheta_0. \quad (8)$$

В том случае, если  $\vartheta_u$  больше или меньше допустимой температуры для изоляции [5], можно определить значение кратности  $m$  соответствующее этой допустимой температуре.

Пусть катушка включена на номинальное напряжение  $U=220$  [В], а постоянная времени  $\tau=25$  [мин]. Необходимо определить кратность (напряжения сети или тока) для следующих случаев 1)  $\vartheta_m > \vartheta_u$  и 2)  $\vartheta_m < \vartheta_u$ .

На рис. 6 показаны графики соответствующие этим случаям ( $\vartheta_m$  – допустимая температура изоляции).

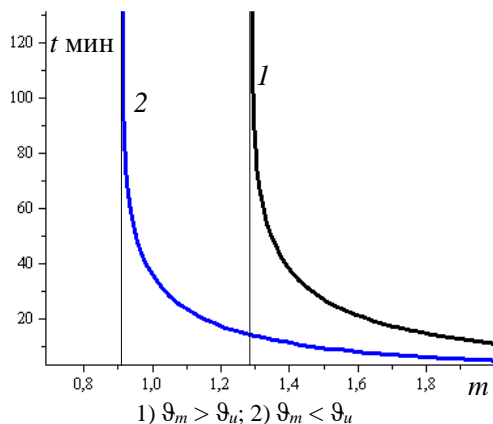


Рис. 6. Определение коэффициента кратности в длительном режиме работы

Очевидно, что в первом случае катушка недогружена и коэффициент кратности равен 1,29. Во втором случае – катушка перегрета и коэффициент кратности равен 0,9. По графикам можно ориентировочно определить за какое время произойдет нагрев до допустимой температуры при заданном коэффициенте кратности. Для исследуемой катушки нагрев до средней температуры 80 °С произойдет при кратности напряжения 1,8, что соответствует напряжению 396 В. Что практически совпадает с её номинальным напряжением – 380 В.

**Расчет теплового режима в кратковременном и повторно-кратковременном режимах работы.** Уравнения (1), (8) определяют температуру нагрева аппарата в длительном режиме работы (время нахождения аппарата под нагрузкой таково, что его температура успевает достигнуть своего установившегося значения). В этом режиме

$$t_J > 4,6 \cdot \tau, \tag{9}$$

где  $t_J$  – время работы.

Если режим работы аппарата кратковременный

$$\begin{aligned} t_J < 4,6 \cdot \tau; \\ t_p > 4,6 \cdot \tau, \end{aligned} \tag{10}$$

где  $t_p$  – время паузы.

Тогда коэффициент перегрузки по мощности будет [1, 4]

$$k = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_J}{\tau}}}. \tag{11}$$

Для повторно-кратковременного режима работы [1, 4]

$$\begin{aligned} t_J < 4,6 \cdot \tau; \\ t_p < 4,6 \cdot \tau. \end{aligned} \tag{12}$$

В этом случае

$$k = \frac{\frac{T}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}}}{1 - e^{-\frac{t_J}{\tau}}}, \tag{13}$$

где  $T = t_J + t_p$ ,  $T$  – длительность цикла.

Примеры значений коэффициентов перегрузки по мощности показаны на рис. 7.

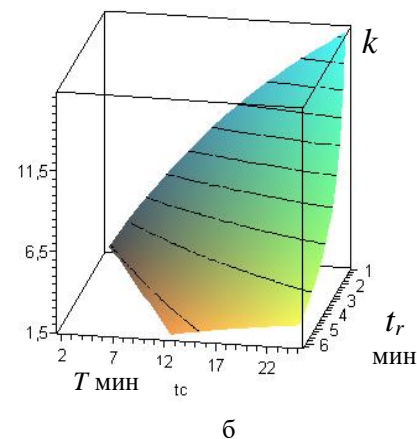
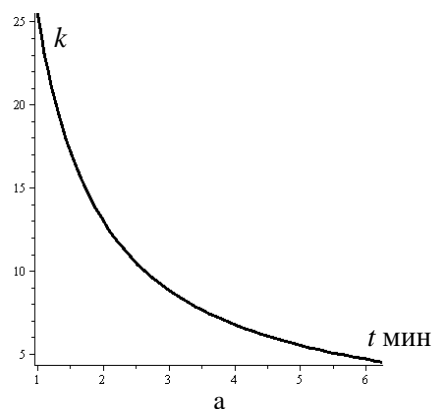


Рис. 7. Примеры значений коэффициентов перегрузки по мощности: а – кратковременный режим; б – повторно кратковременный режим

**Выводы.**

1. Получено простое доказательство вида функции  $\vartheta' = f(\vartheta)$ .
2. Показано, что неточности измерения температуры могут существенно исказить получаемые для определения постоянной времени нагрева и установившейся температуры зависимости и для правильной оценки параметров, необходимо вид аппроксимирующей функции производной температуры по времени знать априори – линейная функция.
3. На основании полученных и обработанных экспериментальных данных можно достаточно просто определить коэффициенты перегрузки по мощности в длительном режиме работы, а также в кратковременном и повторно-кратковременном режимах, что позволяет правильно эксплуатировать электрический аппарат.
4. Данный метод позволяет существенно сократить время испытаний электрических аппаратов на нагрев в продолжительном режиме работы.

## Список литературы

1. Клименко Б. В. Электричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: навчальний посібник (видання друге; допрацьоване та доповнене). – Харків: Вид-во «Точка», 2013. – 400 с.
2. ГОСТ 8024-90. Аппараты и электротехнические устройства переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Нормы нагрева при продолжительном режиме работы и методы испытаний. – 19 с.
3. ГОСТ 30323-95. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания. – 58 с.
4. Таев И.С. Электрические аппараты цепей управления. – М.: Высшая школа, 1984. – 224 с.
5. ГОСТ Р МЭК 60085-2011. Электрическая изоляция. Классификация и обозначение по термическим свойствам. – 12 с.
6. Гарсия В. Измерение температуры: теория и практика. Доступен на <http://www.zimbeton.ru/info/3.pdf>. (Доступ 08.03.2021 г.).

## References (transliterated)

1. Klimenko B.V. Elektrichni aparati. Elektromekhanichna aparatura komutacii, keruvannya ta zakhistu. Zagal'nij kurs: navchal'nij posibnik (vidannya druge; doprac'ovane ta dopovnene). – Kharkiv: Vid-vo «Tochka», 2013. – 400 p.
2. GOST 8024-90. Apparaty i ehlektrotekhnicheskie ustrojstva peremennogo toka na napryazhenie svyshe 1000 V. Normy nagreva pri prodolzhitel'nom rezhime raboty i metody ispytanij. – 19 s.
3. GOST 30323-95. Korotkie zamykaniya v ehlektroustanovkakh. Metody rascheta ehlektrodinamicheskogo i termicheskogo dejstviya toka korotkogo zamykaniya. – 58 p.
4. Taev I.S. Ehlektricheskie apparaty cepej upravleniya. – Moscow: Vysshaya shkola, 1984. – 224 p.
5. GOST R MIEK 60085-2011. Ehlektricheskaya izolyaciya. Klassifikaciya i oboznachenie po termicheskim svojstvam. – 12 p.
6. Garsiya V. Izmerenie temperatury: teoriya i praktika. Dostupen na <http://www.zimbeton.ru/info/3.pdf>. (Dostup 08.03.2021 g.).

Поступила (received) 12.04.2021

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Байда Євген Іванович (Байда Евгений Иванович, Baida Evgen Ivanovich)** – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідуючий кафедрою електричних апаратів, м. Харків, e-mail: [baida.kpi@gmail.com](mailto:baida.kpi@gmail.com)

**Чепелюк Олександр Олександрович (Чепелюк Александр Александрович, Chepeliuk Oleksandr Oleksandrovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4522-9821>; e-mail: [chep1@i.ua](mailto:chep1@i.ua)

*Є.Ю. ЗОРИН, О.О. ЧЕПЕЛЮК, Ю.С. ГРИЩУК, В.М. ЛЕЩЕНКО*

## АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ БІСТАБІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ РЕЛЕ

В статті наведено класифікацію бістабільних електромагнітних реле. Виділено такі ознаки класифікації вищезазначених реле як: конструктивне виконання, тип фіксації контактів, схема контактів реле, рід струму та величина керуючої напруги котушки, кількість котушок, характер навантаження, що комутується за допомогою реле; потужність, що споживається котушкою, тощо. Проведена класифікація систематизує інформацію щодо конструктивних, технічних і функціональних особливостей та параметрів таких реле і демонструє сучасний рівень технічного розвитку вищезазначених реле. Авторами зроблений висновок про тенденції та напрямки розвитку особливостей бістабільних електромагнітних реле в майбутньому.

**Ключові слова:** бістабільне електромагнітне реле, поляризоване бістабільне реле, неполяризоване бістабільне реле, категорія застосування, котушка, електромагніт, навантаження, постійний струм, змінний струм.

*Е.Ю. ЗОРИН, А.А. ЧЕПЕЛЮК, Ю.С. ГРИЩУК, В.М. ЛЕЩЕНКО*

## АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ БИСТАБИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ РЕЛЕ

В статье приведена классификация бистабильных электромагнитных реле. Выделены такие признаки классификации вышеупомянутых реле как: конструктивное исполнение, тип фиксации контактов, схема контактов реле, род тока и величина управляющего напряжения катушки, количество катушек, характер нагрузки, коммутируемой с помощью реле; мощность, потребляемая катушкой, и тому подобное. Проведенная классификация систематизирует информацию о конструктивных, технических и функциональных особенностях и параметрах таких реле и демонстрирует современный уровень технического развития вышеупомянутых реле. Авторами сделан вывод о тенденции и направления развития особенностей бистабильных электромагнитных реле в будущем.

**Ключевые слова:** бистабильное электромагнитное реле, поляризованное бистабильное реле, неполяризованное бистабильное реле, категория применения, катушка, электромагнит, нагрузка, постоянный ток, переменный ток.

*Y.Y. ZORIN, O.O. CHEPELYUK, Y.S. HRYSHCHUK, V.M. LESHCHENKO*

## ANALYSIS OF BISTABLE ELECTROMAGNETIC RELAYS DESIGN FEATURES

This paper pays attention to a classification of bistable electromagnetic relays. The following signs of the classification of mentioned relays are emphasized, such as: design, type of contact fixation, relay contact diagram, type of current and value of the control voltage of the coil, the number of coils, nature of the load switched by the relay; the power consumed by the coil, and others. The undertaken classification systematizes information on the design, technical and functional features and parameters of such relays and demonstrates the current level of technical development of relays that are mentioned above. A conclusion is made concerning tendencies and directions of bistable electromagnetic relays capabilities developing in the future by the authors.

**Key words:** bistable electromagnetic relay, polarized bistable relay, non-polarized bistable relay, application category, coil, electromagnet, load, direct current, alternating current.

**Вступ.** Реле являє собою тип пристрою автоматичного управління, який викликає включення або виключення керованого електричного вихідного кола, коли вхідна величина (величина збудження) досягає певного значення. В останні роки, завдяки швидкому розвитку технологій, виникли тенденції до зменшення розмірів реле, покращення компактності їх конструкцій і зменшення рівня споживаної ними потужності.

Електромеханічні реле використовуються в якості інтерфейсних модулів між пристроями введення/виведення з одного боку, і обладнанням для управління і сигналізації з розімкненим/замкнутим контуром з іншого, для здійснення гальванічної розв'язки між колами з різними рівнями струмів і напруги.

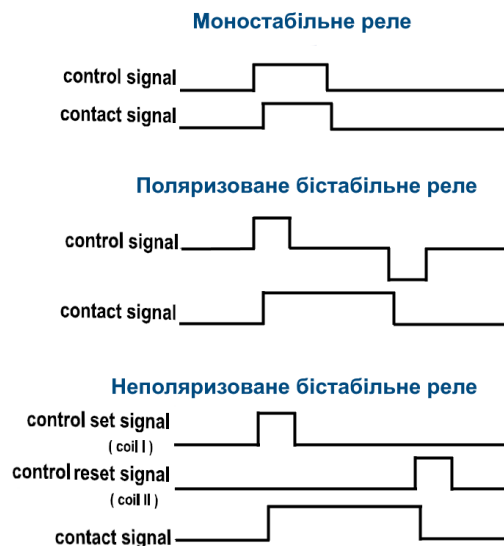
По суті, електромеханічні реле можна розділити на дві основні групи: моностабільні і бістабільні реле.

У моностабільних реле постійного або змінного струму контакти автоматично повертаються в стан відключення при відключенні струму збудження котушки. У разі бістабільних реле контакти залишаються в своєму поточному положенні перемикачів при відключенні струму збудження котушки.

На рис. 1 представлена порівняльна діаграма роботи моностабільних та бістабільних електромагнітних реле.

У багатьох застосуваннях для споживача важливо економити електроенергію. Один із підходів до енергозберігання в електричній системі є використання реле, які не потребують постійного живлення котушки для підтримання стану контактів.

У закордонній літературі та інших джерелах можна зустріти такі терміни, як: bistable relay, latching relay, step relay – що перекладаються, як бістабільне реле, реле із зачіпкою, крокове реле відповідно. Всі ці терміни означають одне і те саме. Тобто можна підсумувати, що «Бістабільні реле» – це загальний термін, що використовується для опису реле, яке зберігає своє контактне положення після відключення керуючого живлення.



control signal – сигнал управління; contact signal – сигнал на контактах; control set signal – управляючий сигнал установки; control reset signal – управляючий сигнал скидання; coil I – котушка 1; coil II – котушка 2

Рис. 1. Діаграми сигналів силового кола та кола керування бістабільних електромагнітних реле у порівнянні із моностабільними

Бістабільні реле дозволяють керувати колом, просто подаючи один імпульс на коло керування реле.

Бістабільні реле також бажані до використання, коли користувачу необхідно мати реле, що зберігає положення контактів силового кола після відключення електроенергії.

В даній статті велику увагу приділено огляду, технічним особливостям, а також класифікації бістабільних електромагнітних реле.

**Мета роботи** полягає в огляді технічних особливостей та проведенні класифікації бістабільних електромагнітних реле для систематизації інформації щодо конструктивних, технічних і функціональних особливостей таких реле.

**Ознаки класифікації бістабільних електромагнітних реле.** Бістабільні електромагнітні реле зазвичай використовуються при необхідності низького енергоспоживання або при високих температурах, де подача живлення на котушку впродовж тривалого часу не може бути забезпечена із-за потужності, що споживається чи самонагріву котушки.

На закордонному електротехнічному ринку та ринку України представлені бістабільні електромагнітні реле у конструктивних виконаннях:

- реле з механічною фіксацією;
- реле з магнітною фіксацією.

Номенклатура вищезазначених реле представлена як вітчизняними так і закордонними виробниками і на тепер є досить різноманітною, як за технічними характеристиками, так і за способом технічної реалізації, конструктивними виконаннями, тощо [1-17].

За результатами проведеного аналізу різновидів та сучасної номенклатури бістабільних електромагнітних реле [1-17], їх можна класифікувати за наступними особливостями:

- за типом конструктивного виконання;

- за типом фіксації силових контактів;
- за схемою контактів реле;
- за родом струму та величиною керуючої напруги котушки;
- за кількістю керуючих котушок;
- за характером кола, що комутується за допомогою реле;
- за потужністю, що споживається котушкою;
- за іншими ознаками.

Як було зазначено вище, бістабільне електромагнітне реле – реле, що спрацьовує під дією одиночного імпульса струму у котушці і залишається у такому стані після закінчення дії цього імпульсу, тобто, блокується [3].

Бістабільні реле призначені для використання у тих випадках, коли є потреба у комутації навантаг під дією одиничних імпульсних сигналів керування, підвищена стійкість до вібрацій та ударів, для виключення постійного споживання енергії джерела живлення, як елементи пам'яті тощо [3].

На рис. 2 показана типова конструкція бістабільних електромагнітних реле.

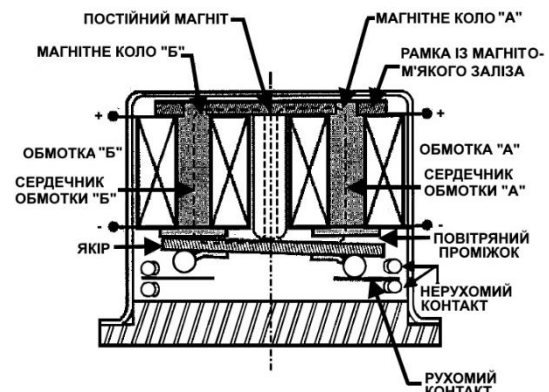
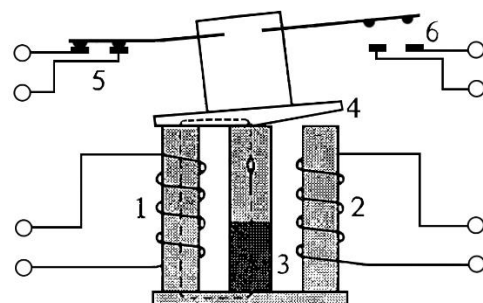


Рис. 2. Типова конструкція бістабільних електромагнітних реле [3]

Магнітні системи бістабільних електромагнітних реле сконструйовані так, щоб максимально спростити конструкцію реле та зменшити його габарити.

У таких реле використовується схема магнітного кола із якорем, що гойдається, яка широко застосовується не тільки у мікромініатюрних реле, але і реле великих розмірів, що призначені для промислового застосування та для електроенергетики (рис. 3) [3, 8].



1, 2 – котушки; 3 – постійний магніт; 4 – якір; 5 – ліві контакти; 6 – праві контакти

Рис. 3. Варіант схеми магнітного кола, що широко використовується у виробництві як мініатюрних, так і великогабаритних реле

В цьому реле якір притягується до тієї котушки, до якої підведена напруга у даний момент часу і залишається у такому положенні до тих пір, поки не буде подана напруга на другу котушку. При цьому якір притягується до цієї другої котушки і залишається у такому положенні до тих пір, поки знову не з'явиться напруга на першій котушці.

Компанії-виробники відмічають високу стійкість таких реле до вібрацій та ударів [3].

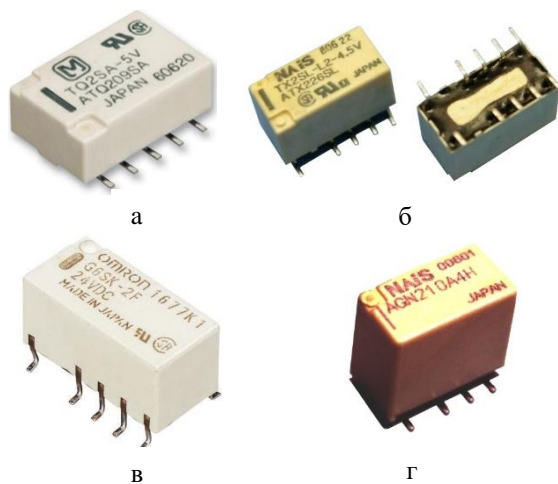
Розглянемо різновиди бістабільних електромагнітних реле у відповідності до зазначених ознак класифікації. Згадка деяких серій бістабільних реле в даній статті буде використана виключно в якості прикладів [1, 2]. Повна номенклатура проаналізованих в статті бістабільних реле і їх виробників на сучасному ринку значно ширше зазначених.

**За типом конструктивного виконання** розрізняють:

- реле для монтажу на друковані плати (PCB Relay);
- реле втичного типу (Plug-In Relay);
- реле модульної конструкції для стаціонарного монтажу на DIN-рейку у розподільному щиті;
- для монтажу на спеціалізовані панелі;
- для монтажу до розподільчих коробок.

Перший тип реле (рис. 4, рис. 5), що монтується на друковану плату розділяються на мікромініатюрні реле [3], які монтується поверхнево (SMD) на друковану плату та мініатюрні електромагнітні реле, що монтується на друковану плату у отвори.

Як правило реле для SMD монтажу бувають двообмотковими низькопрофільними з розмірами  $D \times Ш \times В \leq 20$  мм; або однообмотковими у корпусі із розмірами  $D \times Ш \times В \leq 10$  мм. Такі реле показані на рис. 4.



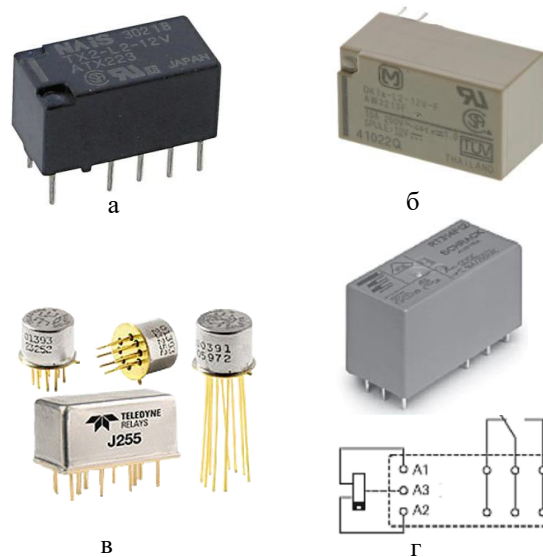
а – ATQ209SA [15] (Panasonic, Японія); б – ATX2SL-L2 [15] (Panasonic, Японія); в – G6SK-2F [14] (Omron, Японія); г – AGN210A4H [15] (Panasonic, Японія)

Рис. 4. Приклади бістабільних електромагнітних реле поверхневого монтажу на друковану плату (SMD)

Мініатюрні реле для монтажу у отвори на друковані плати по аналогії із мікромініатюрними реле можуть бути двообмотковими та однообмотковими. Виконуватись у різних корпусах, що як правило більші за розмірами від реле для SMD монтажу. Однак є і виключення як, наприклад, бістабільні електромагнітні реле

компанії Teledyne для застосування у військовій галузі, які є одними з найменших у світі. Для їх компоновки можуть використовуватись металеві корпуси малопотужних транзисторів – реле 732-5 у корпусі TO-5 (рис. 5, в)

Приклади бістабільних електромагнітних реле для монтажу на друковані плати у отвори, представлені на рис. 5.



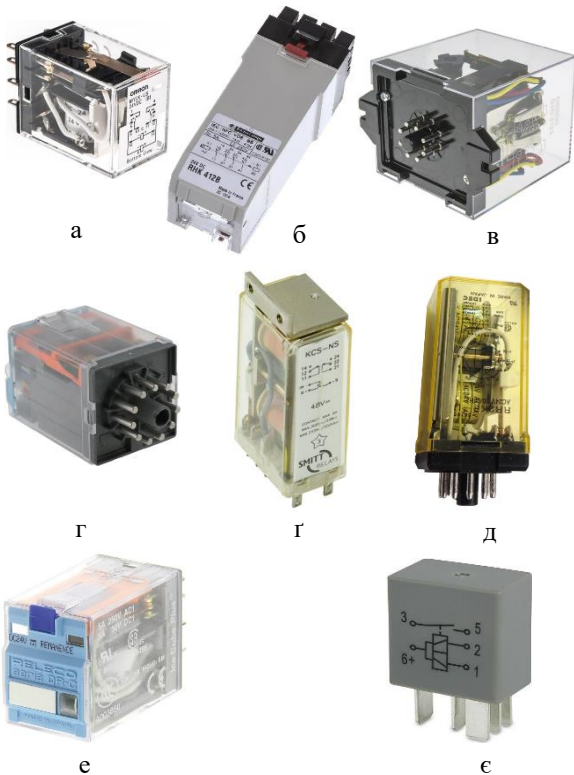
а – TX2-L2-12V [15] (Panasonic, Японія); б – AW3213F [15] (Panasonic, Японія); в – J255 у корпусі Centigrad, 732-5 у корпусі TO-5 та інші [3] (Teledyne Relays, США); г – RT314F12 зі схемою його підключення (Schrack Technik, Австрія)

Рис. 5. Приклади бістабільних електромагнітних реле для монтажу на друковану плату у отвори

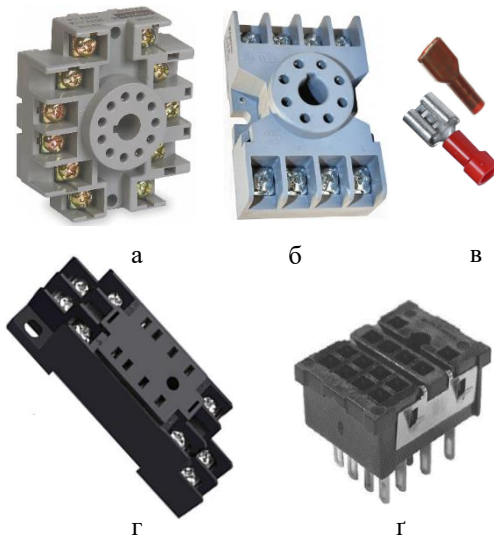
До ще одного типу реле за ознаками класифікації відносяться бістабільні електромагнітні реле втичного типу (Plug-In). Такі реле вставляються у спеціальну колодку або, як автомобільні реле – у спеціальний роз'єм. Дані колодки можуть бути призначені для монтування на DIN-рейках або на друкованих платах.

Стандартними у вищезазначених колодках є кругові 8-ми контактні або 11-ти контактні гнізда, а також гнізда під плоскі штирі (Quick Connect) 0,187 дюйма (4,7 мм). Також з'єднання із виводами реле можна робити за допомогою затискачів Quick Connect.

Приклади конструктивного виконання бістабільних електромагнітних реле втичного типу представлені на рис. 6, а колодки для їх встановлення на рис. 7.



а – MY2K-US [14] (Omron, Японія); б – RHK 412B [13] (SE, Франція); в – G4Q-212S [14] (Omron, Японія); г – C3R20 (Comat Releco, Швейцарія); ґ – KCS-NS [6] (Mors Smitt, США); д – RR2K (IDEC, Японія); є – QR-C (Comat Releco, Швейцарія); є – 4RC 933 364-021 (Hella, Германия)  
Рис.6. Приклади бістабільних електромагнітних реле втичного типу (Plug-In)



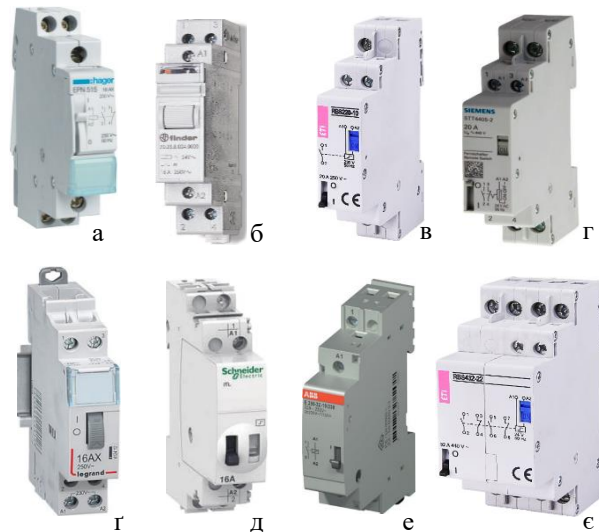
а – 11-ти контактне гніздо; б – 8-ми контактне гніздо; в – затискачі Quick Connect 0.187"; г – колодка для встановлення на DIN-рейку із гніздами під штири Quick Connect 0.187"; ґ – колодка для монтажу на друковану плату із гніздами під штири Quick Connect 0.187"

Рис. 7. Колодки для бістабільних електромагнітних реле втичного типу (Plug-In)

Одним із різновидів бістабільних електромагнітних реле є модульні реле, що встановлюються на DIN-рейку. Зазвичай такі реле виконані конструктивно по

схемі із механічною фіксацією (рис. 12), але зустрічаються моделі з магнітною фіксацією.

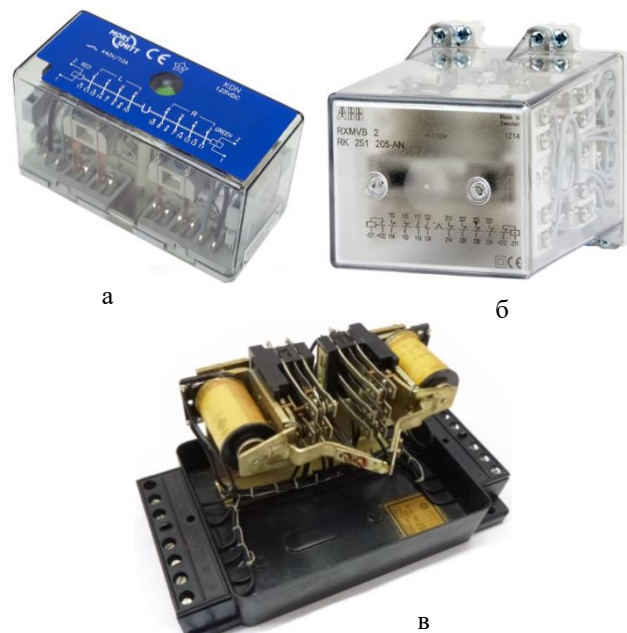
Приклади таких реле представлені на рис. 8.



а – EPN 515 [10] (Hager, Германия); б – 20.23.8.230.0000 [11] (Finder, Італія); в – RBS220-10 [9] (ETI, Словенія); г – 5TT4405-2 (Siemens, Германия); ґ – CX<sup>3</sup> (Legrand, Франція); д – Acti 9 [13] (Schneider Electric, Франція); е – E290 [8] (ABB, Швейцарія); є – RBS432-22 [9] (ETI, Словенія)  
Рис. 8. Приклади бістабільних електромагнітних реле, що встановлюються на DIN-рейку

Бістабільні електромагнітні реле можуть монтуватися на спеціалізовані монтажні панелі. Такі реле зазвичай використовуються в електроенергетиці для побудови систем релейного захисту та автоматики.

Приклади вищевказаних реле представлені на рис. 9.



а – KDN [6] (Mors Smitt, США); б – RHv (Pagus, Германия); в – RXMVB 2 [8] (ABB, Швейцарія)

Рис. 9. Приклади бістабільних електромагнітних реле, що встановлюються на спеціалізовані панелі



За конструктивним виконанням зустрічаються бістабільні електромагнітні реле, які встановлюються до розподільчої коробки або довільно у корпус електроприладу. Одним із таких реле є Finder 27.25.8.230 [11] (рис. 10).



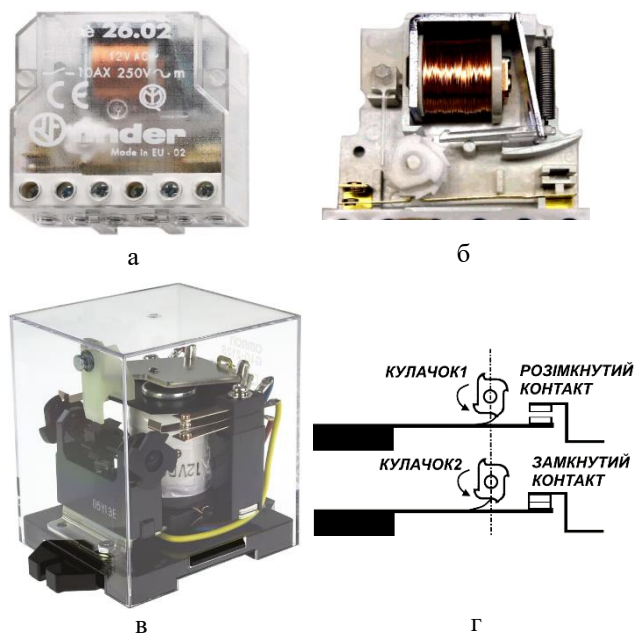
Рис. 10. Реле [11], що монтується до розподільчої коробки або довільно у корпусі електроприладу

За типом фіксації силових контактів, як було вже зазначено у бістабільних електромагнітних реле, фіксація контактів може бути механічною та магнітною.

Різновидом реле із механічною фіксацією контактів є реле крокової дії. Всі реле цього типу мають храповий або фіксаторний механізм (із собачкою), завдяки якому контакти реле змінюють свій стан (кожен раз на один крок) при подачі імпульсів, що повторюються на одну й ту саму котушку. Зазвичай, але не завжди один імпульс замикає одну групу контактів, а інший їх розмикає і так далі. Ці зміни замкнутих та розімкнутих станів можна використати різними способами. Для зміни стану реле тривалість імпульса повинна складати приблизно 50 мс. Коли на котушку подається імпульс напруги, якір переміщує важіль, який в свою чергу повертає храповик та кулачок перше положення послідовності. В цьому положенні реле залишається до тих пір, поки на котушку не буде поданий наступний імпульс. Реле містить, по меншій мірі 2 системи контактів (рис. 11, в), що дозволяє контактам змінювати конфігурацію розімкнутих і замкнутих станів з приходом кожного імпульса на котушку. Наприклад, у двополосній комбінації з приходом першого імпульса один полюс розімкнутий, і другий замкнутий.

Другий імпульс може змінити стан контактів на протилежний, третій імпульс може привести всі контакти у замкнутий стан, четвертий у розімкнутий. В цьому прикладі можуть бути й інші послідовності, в залежності від кількості зубів на храповику і кількості виступів на кулачках. На рис. 11, г показаний приклад того, як розташування на кулачках контактних елементів може змінювати стан контактів при обертанні кулачків за допомогою храповика [3].

На рис. 11 приведені можливі конструкції реле крокової дії.



а – 26.02 [11] (Finder, Італія); б – 26.02 без захисної оболонки [11] (Finder, Італія); в – G4Q-212S (Omron, Японія); г – контактна схема реле [3]

Рис. 11. Реле крокової дії

Прикладом реле із механічною фіксацією контактів можна назвати однополюсні бістабільні електромагнітні реле, що встановлюються на DIN-рейку, наведеного на рис. 12.

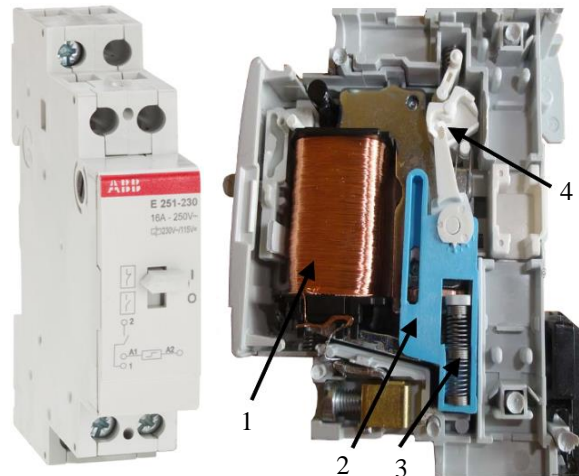


Рис. 12. Конструктивне виконання бістабільних електромагнітних реле E251 [5,8] (ABB, Швейцарія), що встановлюються на DIN-рейку

Як видно із рис. 12 такі реле мають одну котушку 1 із сердечником та якорем. При подачі імпульсу на котушку якір притягується та діє на штовхаючу ланку 2. В свою чергу елемент 2 діє на систему важелів та собачки 4, які змінюють стан контактів. Після зняття напруги із котушки 1 якір повертається у початкове положення, а штовхаючий елемент 2 теж повертається під дією поворотних пружин 3, але контакти залишаються зафіксовані за допомогою механізму 4.

Коли необхідно змінити стан контактів, потрібно

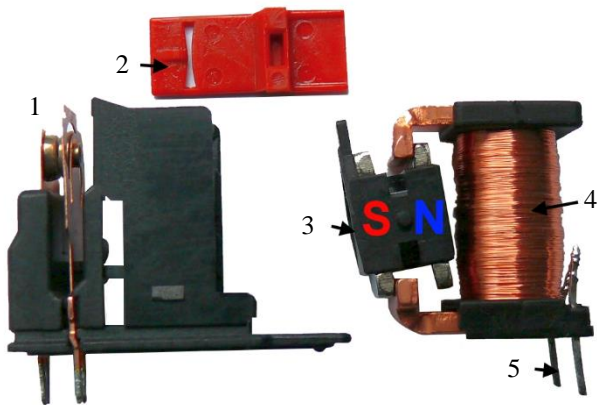
знову подати імпульс на котушку 1 і послідовність операцій повториться у тому порядку, як описано вище. Однак собачка у механізмі 4 буде повернута у інше положення, таким чином і контакти будуть зафіксовані у іншому положенні.

У якості прикладу реле із магнітною фіксацією можна зазначити реле на рис. 4-6 та рис. 9. Такі реле виконані по конструкції як з однією котушкою (поляризовані) так і з двома котушками (неполяризовані). Поляризовані реле містять у своїй конструкції постійний магніт для забезпечення фіксації контактів. В неполяризованих реле фіксація контактів здійснюється за рахунок залишкової намагніченості магнітопроводу реле.

Реле з однією котушкою по принципу дії являє собою поляризоване реле з нейтральним налаштуванням [3]. При нейтральному налаштуванні реле після відключення струму в обмотці якір та рухомий контакт залишаються у тому положенні, в яке вони перемістились при спрацьовуванні реле, тобто або у правому положенні або у лівому. Для перемикання у інший початковий стан необхідно подати на обмотку напругу зворотної полярності у випадку реле з однією котушкою. У випадку реле із двома котушками (рис. 3), для перемикання реле у інший (початковий) стан, напругу потрібно подати на другу котушку.

При такому виконанні немає необхідності у використанні поворотної пружини, що сприяє підвищенню чутливості реле.

Приклад конструктиву поляризованого бістабільного реле представлений на рис. 13.



1 – контакти вихідного кола; 2 – важіль; 3 – постійний магніт; 4 – котушка; 5 – виводи кола керування

Рис. 13. Приклад конструктиву поляризованого бістабільного реле [12]

**За схемою контактів реле.** Нормально розімкнуті (або NO) контакти підключають коло при спрацьовуванні реле; коло відключається, коли реле неактивно. Цей тип контакту реле також називається контактом «форма А» або «закриваючим» контактом».

Нормально замкнуті (або NC) контакти розмикають коло при спрацьовуванні реле; коло підключене, коли реле неактивно. Цей тип контакту реле також згадується як «форма В» або «розмикаючий» контакт.

Переключаючі (або двоходові) контакти керують

двома колами: одним нормально розімкненим контактом і одним нормально замкнутим контактом із загальною клемою. Цей тип контакту реле також називається контактом «форма С» або «перемикаючим». Це також іноді називають «розривом перед установкою». Зворотній, контакт «установка перед розривом» - що називається «формою D».

На додаток до вищезазначених зазвичай зустрічаються й інші типи реле:

Однополюсне однонаправлене (SPST) – цей тип реле має дві клеми, які можна підключати або відключати. Включаючи дві клеми для котушки, цей тип реле має всього чотири клеми. Неясно, чи нормально контакт розімкнутий або нормально замкнутий. Терміни «SPNO» і «SPNC» використовуються для вирішення неоднозначності.

Однополюсне двонаправлене (SPDT) – загальний вивід підключається до будь-якого з двох інших. Включаючи дві клеми для котушки, у цього типу реле всього п'ять клем.

Двополюсне одно направлене (DPST) – цей тип реле має дві пари клем. Це еквівалентно двом реле SPST, керованих однією котушкою. Включаючи два виводи для котушки, у цього типу реле шість клем.

Double Pole Double Throw (DPDT) – цей тип реле має два ряди контактів, що переключаються. Це еквівалентно двом реле SPDT, керованим однією котушкою. Включаючи дві котушки, цей тип реле має вісім клем.

Quadruple Pole Double Throw (QTDP) – ці реле також можуть називатися Quad-Pole Double Throw або 4PDT. Це реле складається з чотирьох рядів переключаючих клем і еквівалентно чотирьом реле SPDT, що приводиться в дію однією котушкою або двом реле DPDT. Всього в реле чотирнадцять виводів [16].

**За родом струму та величиною керуючої напруги котушки.** Як і моностабільні електромагнітні реле, бістабільні реле випускаються на такі ж класи керуючих напруг.

За родом струму використовуються котушки постійного та змінного струму. Зазвичай котушки постійного струму (DC Coil) використовуються у конструкціях поляризованих бістабільних електромагнітних реле; натомість у конструкціях неполяризованих реле можуть використовуватись як котушки постійного, так і котушки змінного струму (AC Coil).

Нижче охоплені основні діапазони напруг, що найбільш часто зустрічаються.

Номинальні напруги котушок постійного струму складають:

- 3, 5 В для мікромініатюрних реле;
- 5, 6, 9, 12, 24 В для чутливих котушок;
- 36, 48, 60, 110, 120, 220 В.

Номинальні напруги котушок змінного струму складають: 12, 24, 48, 60, 110, 115, 120, 220, 230, 240 В.

**За кількістю керуючих котушок;** Як було зазначено вище, при описі конструктиву поляризованих та неполяризованих реле, кількість керуючих котушок може бути одна або дві.

У двох котушковому варіанті реле може мати окремі виводи для кожної котушки.

У цих типів реле є три з'єднання котушки на стороні котушки. Крім загального виводу, є окремі виводи для «установки» і «скидання» (set і reset); вони управляються тільки короткими імпульсами. В результаті реле практично не нагріваються. Одночасне керування обома котушками не допускається.

Або застосовуються спільні виводи для обох котушок. В останньому випадку застосовуються котушки неполяризованого реле з двома зустрічними обмотками зі спільними виводами розташовані на одному середнику (біфлярна обмотка) [7].

**За характером кола, що комутується за допомогою реле.** Як і моностабільні електромагнітні реле, бістабільні електромагнітні реле випускаються на усі класи напруг та потужностей, комутованих за допомогою реле: від мікромініатюрних та мініатюрних реле для радіоелектронної апаратури, що мають контактну систему та виконання корпусу характерних для моностабільних реле того ж класу комутованої потужності до високовольтних реле розрахованих на великі струми.

За характером кола, що комутують бістабільні електромагнітні реле можна розділити на:

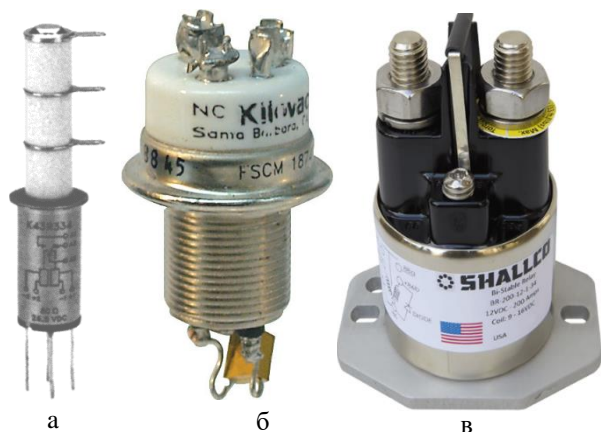
- реле, що комутують кола із малими та великими струмами навантаження;
- реле, що комутують низьковольтні та високовольтні навантаження.

До реле, котрі комутують малі струми можна віднести бістабільні електромагнітні реле, які розраховані на струм від 0.5 до 50 А.

Зазвичай реле, що комутують струми від 0.5 до 2 А – це реле для поверхневого монтування на друковані плати загального застосування або сигнальні реле.

Низьковольтними вважаються реле, що комутують навантаги з напругою до 500 В.

Зустрічаються високовольтні реле, що комутують навантаги напругою до 10 кВ [17] (рис. 14а-14б). Для ефективного гасіння електричної дуги на контактах таких реле використовується вакуумне середовище або спеціальне газонаповнене середовище (зазвичай SF<sub>6</sub>).



а – K43R [17] (TE Connectivity, США); б – K44P [17] (TE Connectivity, США); в – BR-200-12-1-34 (SHALLCO, США)  
Рис. 14. Приклад бістабільних реле, що розраховані на високі напруги та великі струми навантаження

Бістабільні електромагнітні реле, що найбільш часто зустрічаються можуть бути розраховані на наступні категорії застосування:

AC1 – комутація неіндуктивних або малоіндуктивних навантажень на змінному струмі;

AC15 – керування електромагнітними навантаженнями великої потужності на змінному струмі (>72 ВА);

DC1 – комутація неіндуктивних або малоіндуктивних навантажень на постійному струмі;

DC13 – керування електромагнітними постійного струму [4].

За частотою комутації вихідного кола реле можна розділити на:

- високочастотні;
- низькочастотні.

Високочастотні реле – такі реле, що призначені для комутації постійного або змінного струму вихідного кола із частотою вище за 1МГц.

Низькочастотні реле – такі реле, що призначені для комутації постійного або змінного струму вихідного кола із частотою нижчу за 1МГц [7].

**За потужністю, що споживається котушкою.** Вхідна потужність є одним із важливих факторів при виборі реле. Вхідна потужність кожного реле вказана в таблиці даних котушки каталогу виробника конкретного реле. В залежності від роду струму котушки потужність може бути вказана у Вт або у ВА.

Вхідна потужність котушки бістабільних електромагнітних реле приведена нижче:

- реле великої потужності 1,2 до 5.2 Вт [6];
- реле середнього і малого струму загального призначення від 0,7 Вт до 0,2 Вт;
- слабкострумове реле загального призначення від 0,6 Вт до 0,15 Вт.

Приведені вище значення потужності котушок реле, що зустрічаються найбільш часто.

#### Висновки.

1. Проведена класифікація бістабільних електромагнітних реле за основними ознаками, такими як: конструктивне виконання, тип фіксації контактів, схема контактів реле, кількість котушок, рід струму та величина керуючої напруги котушки, потужність, що споживається котушкою, характер навантаження вихідного кола реле, частота комутації тощо.

2. На основі даних виробників бістабільних електромагнітних реле проведено систематизацію інформації щодо конструктивних, технічних і функціональних особливостей таких реле, а також продемонстровано сучасний стан і рівень технічного розвитку цих реле.

3. На підставі проведеної класифікації також можна зробити висновок, що вище розглянуті бістабільні електромагнітні реле розвиваються у напрямку спрощення конструкції, зменшення габаритних розмірів та збільшення величин напруги та струму, що здатні комутувати такі реле.

4. Поряд із розвитком напівпровідникових елементів силової електроніки бістабільні електромагнітні реле все ще залишаються актуальними й займають свою нішу на електротехнічному ринку.

## Список літератури

1. Чепелюк А.А. К вопросу классификации реле напряжения для защиты бытовых однофазных потребителей от недопустимых отклонений напряжения в питающей сети // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2014. – № 41. – С. 25-36.
2. Зорін Є.Ю. Класифікація однофазних реле контролю напруги побутових споживачів з огляду на тенденції їх розвитку/ Є. Ю. Зорін, О. О. Чепелюк, Ю. С. Гришук // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика: зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2020. – № 1. – С. 15-21.
3. Гуревич В.И. Электрические реле. Устройство, принцип действия и применения. Настольная книга электротехника. Серия «Компоненты и Технологии». – М.: СОЛОН-Пресс, 211. – 688с.
4. Клименко Б. В. Электричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс : навч. посібник / Б. В. Клименко. – Харків : Точка, 2012. – 340 с.
5. <https://cs-cs.net/abb-e251-inside>
6. <https://www.morssmitt.com/product-categories/400187/relays>
7. <https://relays.ru/files/pub/class.pdf>
8. <https://www.hitachiabb-powergrids.com>
9. [www.etigroup.eu/products-services/automation-signaling-and-control-devices/bistable-switches-and-relays](http://www.etigroup.eu/products-services/automation-signaling-and-control-devices/bistable-switches-and-relays)
10. <https://www.hager.ua>
11. <http://finder.in.ua/ua/>
12. <http://www.ncr.hk/a/Products/Relays/>
13. <https://www.se.com/ua/uk/>
14. <http://www.ia.omron.com/products/>
15. <https://na.industrial.panasonic.com>
16. <https://www.se.com/ww/en/faqs/FA212503/>
17. <https://www.te.com/usa-en/home.html>

## References (transliterated)

1. Chepeliuk A.A. K voprosu klassyfykatsii rele napriazhe-nyia dlia zashchity bitovikh odnofaznykh potrebytelei ot nedopustymykh ot-klonenyj napriazheniya v pytaishchej sety. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seria: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparatyv. Teoriia i praktyka. – 2014. – 41. – Pp. 25-36.
2. Zorin Ye.Yu., Chepelyuk O.O., Grishchuk Yu.S. Klasyfikaciya od-nofaznykh rele kontrolyu naprugi pobutovykh spozhivachiv z oglyadu na tendenciї ih rozvitku. Visnyk Nacional'nogo tekhnichnoho universytetu "HPI". Ser.: Problemy udoskonalyuvannya elektrychnykh mashyn i aparatyv. Teoriya i praktika: zb. nauk. pr. – Harkiv: NTU "HPI", 2020. – 1. – Pp. 15-21.
3. Gurevich V.I. Elektricheskie rele. Ustrojstvo, princip dejstviya i primeneniya. Nastol'naya kniga elektrotekhnik. Seriya «Komponenty i Tekhnologii». – M.: SOLON-Press, 211. – 688 p.
4. Klimentko B.V. Elektrichni aparaty. Elektromekhanichna aparatura komutatsii, keruvannya ta zahistu. Zagal'nij kurs: navch. posibnik. – Harkiv : Tochka, 2012. – 340 p.
5. <https://cs-cs.net/abb-e251-inside>
6. <https://www.morssmitt.com/product-categories/400187/relays>
7. <https://relays.ru/files/pub/class.pdf>
8. <https://www.hitachiabb-powergrids.com>
9. [www.etigroup.eu/products-services/automation-signaling-and-control-devices/bistable-switches-and-relays](http://www.etigroup.eu/products-services/automation-signaling-and-control-devices/bistable-switches-and-relays)
10. <https://www.hager.ua>
11. <http://finder.in.ua/ua/>
12. [http://www.ncr.hk/a/Products/Relays/PCB\\_Relays/](http://www.ncr.hk/a/Products/Relays/PCB_Relays/)
13. <https://www.se.com/ua/uk/>
14. <http://www.ia.omron.com/products/>
15. <https://na.industrial.panasonic.com>
16. <https://www.se.com/ww/en/faqs/FA212503/>
17. <https://www.te.com/usa-en/home.html>

Поступила (received) 30.09.2021

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Зорін Євгеній Юрійович (Зорин Евгений Юрьевич, Zorin Yevhenii Yur'yevich)** – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра електричних апаратів; тел.: (057) 707-68-64; м. Харків, Україна; e-mail: yevgeny.zorin@gmail.com.

**Чепелюк Олександр Олександрович (Чепелюк Александр Александрович, Chepelyuk Oleksandr Oleksandrovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів; тел.: (057) 707-68-64; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4522-9821>; e-mail: [chep1@i.ua](mailto:chep1@i.ua).

**Гришук Юрій Степанович (Гришук Юрий Степанович, Hryshchuk Yuriy Stepanovych)** – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри електричних апаратів; тел.: (057) 707-68-64; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7427-5419>; e-mail: [grisshukkpi@ukr.net](mailto:grisshukkpi@ukr.net).

**Лещенко Вячеслав Михайлович (Лещенко Вячеслав Михайлович, Leshchenko Viacheslav Mikhailovych)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедра автоматизації і управління в технічних системах; тел.: (057) 707-62-87; м. Харків, Україна; e-mail: [lvm@kpi.kharkov.ua](mailto:lvm@kpi.kharkov.ua)

*М.А. ЛЕЛЮК, В.В. ЛИТВИНЕНКО*

### ВАКУУМНИЙ ВИМИКАЧ СЕРЕДНІХ НАПРУГ З ПОФАЗНИМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПРИВОДОМ

В вакуумних вимикачах середніх напруг для досягнення рівномірного розподілу сили по всій довжині приводного валу приводний механізм роблять пофазним, тобто під кожним полюсом встановлюють окремий електромагніт. Проведено аналіз конструкцій та особливостей роботи вакуумних вимикачів з пофазним електромагнітним приводом. Виявлено недоліки в конструкціях цих приводів. Розглянуто конструкцію вакуумного вимикача з пофазним електромагнітним приводом та кінематичну схему роботи вакуумного вимикача з моностабільним поляризованим електромагнітом та поворотною пружиною при здійсненні операції включення. В якості пофазного приводу запропоновано використання трьох моностабільних поляризованих електромагнітів з поворотними пружинами, що дає змогу зменшити габаритні розміри не тільки приводного електромагніта а й вимикача. Причому поворотна пружина не входить до конструкції запропонованого електромагніта, а є частиною приводного механізму вимикача. Розроблено конструкцію корпусу вакуумного вимикача з пофазним приводом та синхронізуючим валом, який унеможливує одночасність замикання і розмикання головних контактів при виконанні комутаційних операцій. Проведено розрахунок моностабільного поляризованого електромагніта та підтверджена можливість його використання в якості пофазного приводу в вакуумних вимикачах середніх напруг.

**Ключові слова:** вакуумний вимикач середньої напруги, пофазний електромагнітний привод, моностабільний поляризований електромагніт, синхронізуючий вал, поворотна пружина.

*Н.А. ЛЕЛЮК, В.В. ЛИТВИНЕНКО*

### ВАКУУМНИЙ ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ СРЕДНИХ НАПРЯЖЕНИЙ С ПОФАЗНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРИВОДОМ

В вакуумных выключателях средних напряжений для достижения равномерного распределения силы по всей длине приводного вала приводной механизм делают пофазным, то есть под каждым полюсом устанавливают отдельный электромагнит. Проведен анализ конструкций и особенностей работы вакуумных выключателей с пофазным электромагнитным приводом. Выявлены недостатки в конструкциях этих приводов. Рассмотрены конструкция вакуумного выключателя с пофазным электромагнитным приводом и кинематическая схема работы вакуумного выключателя с моностабильным поляризованным электромагнитом и возвратной пружиной при осуществлении операции включения. В качестве пофазного привода предложено использование трех моностабильных поляризованных электромагнитов с возвратными пружинами, что позволяет уменьшить габаритные размеры не только приводного электромагнита, но и выключателя. Причем возвратная пружина не входит в конструкции предложенного электромагнита, а является частью приводного механизма выключателя. Разработана конструкция корпуса вакуумного выключателя с пофазным приводом и синхронизирующим валом, который делает невозможным одновременность замыкания и размыкания главных контактов при выполнении коммутационных операций. Проведен расчет моностабильного поляризованного электромагнита и подтверждена возможность его использования в качестве пофазного привода в вакуумных выключателях средних напряжений.

**Ключевые слова:** вакуумный выключатель среднего напряжения, пофазный электромагнитный привод, моностабильный поляризованный электромагнит, синхронизирующий вал, возвратная пружина.

*М.А. ЛЕЛЮК, В.В. ЛИТВИНЕНКО*

### MEDIUM VOLTAGE VACUUM CIRCUIT BREAKER WITH PER PHASE ELECTROMAGNETIC ACTUATOR

In medium voltage vacuum circuit breakers, in order to achieve an even distribution of force along the entire length of the drive shaft, the drive mechanism is made per phase, that is, a separate electromagnet is installed under each pole. The analysis of designs and features of operation of vacuum circuit breakers with a per phase electromagnetic drive is carried out. Deficiencies in the designs of these drives have been identified. The design of a vacuum circuit breaker with a per phase electromagnetic drive and a kinematic diagram of the operation of a vacuum circuit breaker with a monostable polarized electromagnet and a return spring during the closing operation are considered. As a per phase drive, it is proposed to use three monostable polarized electromagnets with return springs, which makes it possible to reduce the overall dimensions of not only the drive electromagnet, but also the vacuum circuit breaker. Moreover, the return spring is not included in the design of the proposed electromagnet, but is part of the circuit breaker drive mechanism. The design of the housing of the vacuum circuit breaker with a per phase drive and a synchronizing shaft has been developed, which makes it impossible for the non-simultaneous closing and opening of the main contacts when performing switching operations. The calculation of a monostable polarized electromagnet is carried out and the possibility of its use as a per-phase drive in a medium voltage vacuum circuit breaker is confirmed.

**Key words:** medium voltage vacuum circuit breaker, per phase electromagnetic drive, monostable polarized electromagnet, synchronizing shaft, return spring.

**Вступ.** Вакуумні вимикачі середньої напруги є найбільш популярними та затребуваними апаратами на сучасному ринку електромеханічної апаратури серед комутаційних та захисних пристроїв для мереж середніх напруг. Ці апарати повинні не тільки задовольняти експлуатаційним вимогам та вимогам надійності, але й мати привабливу для покупця вартість, що в поєднанні дає конкурентний продукт. В конструкціях вакуумних вимикачів крім головних контактів, які розташовані у вакуумних переривниках, системи ке-

рування, струмоведучих частин, дуже важливим елементом є привідна система, яка забезпечує спрацювання вимикача та виконання необхідних функцій.

В більшості моделей вакуумних вимикачів використовуються поляризовані електромагнітні приводи, які мають певні переваги у порівнянні з пружинно-моторними [1]. Поляризований електромагніт, що входить до складу таких приводів, встановлюється під середнім полюсом (вертикальний дизайн) або за ним (ранцевий дизайн) та з'єднується з привідним валом,

який в свою чергу, з'єднується з тягою рухомого контакту вакуумного переривника. У включеному положенні вимикача електромагніт повинен створювати силу, що відповідає силі контактного натискання головних контактів вакуумних переривників встановлених виробником [2]. Також слід зазначити, що значення цієї сили дається для одного полюса, а у вакуумного вимикача їх три. Тому для забезпечення вище зазначених умов по силі контактного натискання виробники вакуумних вимикачів встановлюють потужні поляризовані електромагніти, що мають значні габаритні розміри (рис. 1) [3, 4].

Особливість конструкції таких вимикачів полягає в тому, що електромагніт з'єднується з привідним валом в одній точці, а враховуючи значні зусилля (6000-8000 Н) це може призвести до його скручування [5] і як наслідок відхилення від вимог виробників вакуумних переривників відносно додаткового контактного кінцевого зусилля, зазору між головними контактами у відкритому положенні.

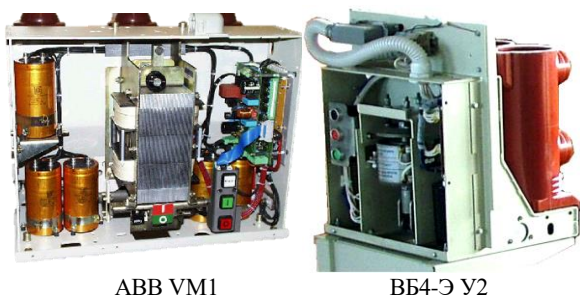


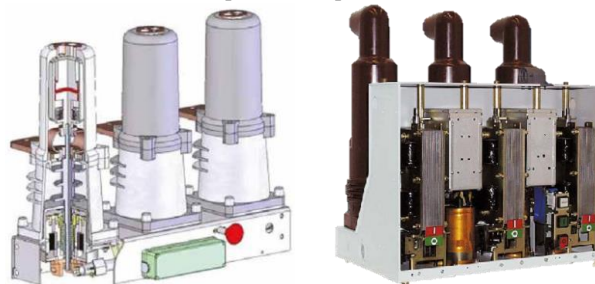
Рис. 1. Вакуумні вимикачі з одним поляризованим електромагнітом

Виходом з цієї ситуації може бути або збільшення перетину привідного валу, що призводить до збільшення масо-габаритних показників вимикача, або рівномірний розподіл сили по всій його довжині. Для досягнення рівномірного розподілу сили по всій довжині валу привідний механізм роблять пофазним, тобто під кожним полюсом встановлюють окремі поляризовані електромагніти (рис. 2) [3, 6-8].

В розглянутих вакуумних вимикачах є ряд недоліків, що стосуються конструкції пофазних приводів, а саме, у вимикачах ВВ/TEL-10 та ВВМ-СЭЩ-3-10-20/1000 контактна та поворотна пружини встановлені в корпусі електромагніта, що суттєво ускладнює його конструкцію та збільшує габаритні розміри. Особлива конструкція якоря електромагніта вимикачах ВВ/TEL-10 ускладнює можливість перевірки та регулювання провалу головних контактів вакуумного переривника. В електромагніті вимикача АBB VM1 встановлено дві однообмоткові котушки включення та відключення, що призводить до збільшення габаритних розмірів.



ООО «Таврида Електрик» ВВ/TEL-10



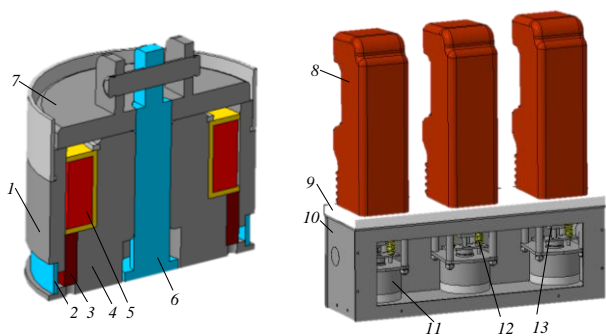
ОАО «Электрощит»  
ВВМ-СЭЩ-3-10-20/1000

ABB VM1

Рис. 2. Вакуумні вимикачі з трьома поляризованими електромагнітами (пофазний привідний механізм)

**Мета роботи** – розробка конструкції вакуумного вимикача середніх напруг з пофазним бістабільним поляризованим електромагнітним приводом.

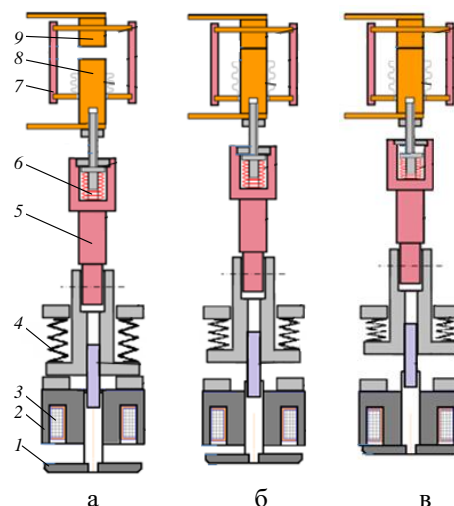
**Бістабільний поляризований електромагнітний привод вакуумного вимикача середніх напруг.** В існуючих моделях вакуумних вимикачів використовуються два типи поляризованих електромагнітів: моно та бістабільні. Особливість цих електромагнітів полягає в тому, що до їх складу входять постійні магніти на основі рідкоземельних металів, що дає змогу зменшити габаритні розміри та енергоспоживання. Для забезпечення бістабільного положення приводу вимикача може використовуватися або бістабільний поляризований електромагніт з окремими однообмотковими котушками включення та відключення [3, 8] або моностабільний поляризований електромагніт (МПЕ) з однією однообмотковою котушкою та поворотною пружиною [6, 7]. Саме використання останнього дає змогу зменшити габаритні розміри не тільки електромагніта а й вимикача. Причому, поворотна пружина не входить до конструкції електромагніта, а є частиною привідного механізму вимикача. На рис. 3 показано конструкцію МПЕ [9, 10] та вакуумного вимикача з пофазним приводом.



1 – корпус МПЕ; 2 – немагнітне кільце; 3 – постійний магніт; 4 – осердя; 5 – котушка; 6 – немагнітний шток;  
7 – яркір; 8 – вакуумна камера; 9 – ізоляційна плита;  
10 – корпус вимикача; 11 – МПЕ; 12 – поворотна пружина (встановлено дві на кожному полюсі); 13 – тяга вакуумної камери з тарілчастими пружинами підтискання

Рис. 3. Моностабільний поляризований електромагніт та вакуумний вимикач з пофазним приводом

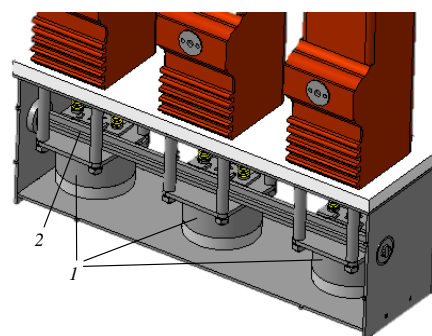
Особливість роботи МПЕ полягає в тому, що використовується одна однообмоткова котушка, яка виконує функції котушки включення та відключення і в залежності від того яка операція відбувається, включення або відключення вимикача, постійний струм, що подається на котушку, повинен протікати у певному напрямку [10]. Зазвичай в вакуумних комутаційних апаратах для виконання цих операцій використовується мікропроцесорна система керування [11]. Бістабільне положення приводного механізму забезпечується за рахунок дії постійних магнітів у включеному положенні та поворотної пружини у відключеному положенні. На рис. 4 показано кінематичну схему роботи приводного механізму вакуумного вимикача з МПЕ та поворотною пружиною для одного полюса. Розглянемо її роботу на прикладі виконання операції включення вакуумного вимикача. У відключеному положенні яркір 1 знаходиться на заданій відстані від осердя 2 (рис. 4, а), головні контакти 8 та 9 розімкнені і знаходяться на відстані, що відповідає повному ходу, поворотна пружина 4 знаходиться у підтиснутому стані і створює зусилля, що необхідне для підтримання контактів розімкненими при повному ході. При подачі струму на котушку 3 МПЕ яркір 1 починає притягуватися до осердя 2, рухомий контакт 8, через тягу вакуумної камери 5, рухається в напрямку замикання з нерухомим контактом 9, поворотна пружина 4 при цьому стискається. Головні контакти 8 та 9 замикаються, однак яркір 1 повністю не притягнувся до осердя 2 і знаходиться на відстані, що дорівнює ходу підтискання контактів (рис. 4, б). Яркір 1 повністю притягується до осердя 2 (рис. 4, в) при цьому стикаються тарілчасті пружини 6 створюючи додаткове контактне кінцеве зусилля значення якого залежить від номінального струму відключення вимикача при короткому замиканні [12].



1 – яркір; 2 – осердя; 3 – котушка; 4 – поворотна пружина;  
5 – ізолювана тяга; 6 – тарілчасті пружини; 7 – сільфон;  
8 – рухомий контакт; 9 – нерухомий контакт  
а – відключене положення; б – проміжне положення;  
в – включене положення

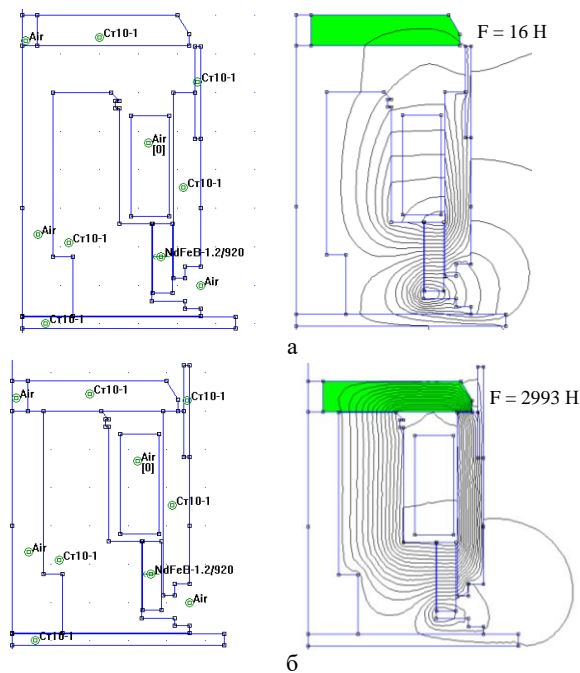
Рис. 4. Кінематична схема роботи вакуумного вимикача при виконанні операції включення для одного полюса

Враховуючи, що приводний механізм складається з трьох МПЕ, то є ймовірність неодновременності замикання і розмикання контактів при виконанні комутаційних операцій. Виробники вакуумних переривників чітко встановлюють, що це значення не повинно перевищувати 2 мс [13]. Для виконання цієї вимоги виробники вакуумних вимикачів з пофазним приводом встановлюють синхронізуючий вал [6, 7], який жорстко з'єднаний з електромагнітом. На рис. 5 показано конструкцію вакуумного вимикача з пофазним МПЕ приводом та синхронізуючим валом.



1 – моностабільний поляризований електромагніт;  
2 – синхронізуючий вал  
Рис. 5. Вакуумний вимикач з пофазним приводом та синхронізуючим валом

Важливим етапом при розробці та проектуванні приводного механізму вимикача є визначення сили, яку розвиває МПЕ при включенні вимикача та сили у включеному положенні, коли яркір притиснутий до осердя. Для даної конструкції МПЕ було розроблено ФЕММ модель [14] (рис. 6) та проведені відповідні розрахунки.



а – відключене положення; б – включене положення  
Рис. 6. Розрахункова FEMM модель моностабільного поляризованого електромагніта

У включеному положенні МПЕ якір притиснутий до осердя з силою 2993 Н. Цього цілком достатньо для надійного утримання головних контактів у замкненому положенні. У відключеному положенні сила тяжіння якоря до осердя становить 16 Н, враховуючи дію поворотної пружини, її не достатньо для того, щоб зменшити задану відстань між якорем та осердям, а від так і між рухомих та нерухомих контактом.

Результати розрахунку проведені для одного електромагніта пофазного приводу вакуумного вимикача не випадково, так як виробники вакуумних переривників зазначають електричні та механічні характеристики саме для одного полюсу. Враховуючи це сумарна сила трьох МПЕ буде становити 8979 Н, що цілком достатньо для використання пофазного приводу в вакуумних вимикачах середніх напруг.

**Висновки.** 1. Проведено аналіз конструкцій та особливостей роботи вакуумних вимикачів з пофазним електромагнітним приводом. Виявлено недоліки в конструкціях цих приводів.

2. Розглянуто конструкцію вакуумного вимикача з пофазним електромагнітним приводом.

3. Розглянуто кінематичну схему роботи вакуумного вимикача з моностабільним поляризованим електромагнітом та поворотною пружиною при виконанні операції включення.

4. В якості пофазного приводу запропоновано використання трьох моностабільних поляризованих електромагнітів з поворотними пружинами.

5. Розроблено конструкцію нового корпусу вакуумного вимикача з пофазним приводом та синхронізуючим валом, який унеможливує неодноразовість замикання і розмикання головних контактів при виконанні комутаційних операцій.

6. Проведено розрахунок моностабільного поляризованого електромагніта та підтверджено можливість його використання в якості пофазного приводу в вакуумних вимикачах середніх напруг.

#### Список літератури

1. Лелюк М.А. Аналіз роботи приводних механізмів вакуумних вимикачів середньої напруги / М.А. Лелюк, В.В. Литвиненко // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ «ХПІ». – 2020. – № 1. – С. 22-26.
2. Лелюк М.А. Бістабільний електромагнітний привод вакуумного вимикача середньої напруги / М.А. Лелюк, В.В. Литвиненко, О.В. Мішанина, А.В. Милашич // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XXIX міжн. наук.-практична конф. (microCAD-2021), 18-20 травня: тези доп. / Харків: НТУ «ХПІ». – 2021. – С. 25.
3. Dullni. E. A family of vacuum circuit-breakers with worldwide applications using common components / E. Dullni., H. Fink, M. Heimbach, C. Reuber // February 2001. DOI: 10.1049/cp:20010680. SourceIEEE Xplore. Conference: Electricity Distribution, 2001. Part 1: Contributions. CIRED. 16th International Conference and Exhibition on (IEE Conf. Publ No. 482) Volume: 1.
4. Выключатель вакуумный ВБ4-Э У2. <http://abm-amp.com/product/vyklyuchatel-vakuumnyj-vb4-e-u2>.
5. Байда Е.И. Исследование механических напряжений в приводном валу вакуумного выключателя средних напряжений / Е.И. Байда, Б.В. Клименко // Електротехніка і електромеханіка, – 2017, – № 1. – С. 10-15.
6. ВВ/TEL Вакуумный выключатель. Руководство по эксплуатации. Вакуумный выключатель ВВ/TEL-10. <https://www.tavrıda.com>;
7. Выключатели вакуумные серии ВВМ-СЭЦ-3(4)-10. Техническая информация. ТИ – 1 56 – 2009. <http://electroshield.ru>;
8. Carlo Cereda, Carlo Gemme, Christian Reuber. Synchronous medium voltage circuit breakers: ABB solution based on magnetic drive and electronic control. CIRED'99. 5th International Conference & Exhibition on ELECTRICITY DISTRIBUTION. NICE, 1/14.
9. Патент України № 117000 МПК: H01H 33/42, H01F 7/06 Електромагнітний привід / Бугайчук В.М., Клименко Б.В., Лелюк М.А. / № u201613627; заявл. 30.12.2016; опубл. 12.06.2017, Бюл. № 11. – 11 с.
10. Клименко Б.В. Електромагнітний актуатор для вакуумного контактора середніх напруг / Б.В. Клименко, М.А. Лелюк, В.М. Бугайчук, Я.Б. Форкун // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 32. – С. 27-33.
11. Клименко Б.В. Пристрій керування обмоткою актуатора вакуумного контактора / Б.В. Клименко, М.А. Лелюк // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XXVI міжн. наук.-практична конф. (microCAD-2018), 16-18 травня: тези доп. / Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – С. 78.
12. Перцев А.А. Особенности испытаний вакуумных выключателей током короткого замыкания / А.А. Перцев, А.Л. Петерсон, Л.А. Рылская // Електротехніка. – 2006, – №9, – С. 29-32.
13. Shaanxi Baoguang Vacuum Electric Device Co. Ltd. Vacuum Interrupter & Embedded Pole products. <http://www.baoguang.com.cn/en/product/enclosed/1/2795>.
14. Finite Element Method Magnetics. User's Manual 2006. Version 4.2 [Электронный ресурс] / D. Meeker // Режим доступа: <http://femm.berlios.de>.

#### References (transliterated)

1. Leliuk M.A., Lytvynenko V.V. Analiz roboty pryvidnykh mekhanizmv vakuumnykh vumykachiv sereidnoi napruhy. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "Kharkivskyi politekhnichnyi instytut". – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2020. – 1. – Pp. 22-26.
2. Leliuk M.A., Lytvynenko V.V., Mishanina O.V., Mylasyhch A.V. Bistabilnyi elektromahnitnyi pryvod vakuumnoho vumyacha sereidnoi napruhy. Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorov'ia: XXIX mizhn. nauk.-praktychna



- konf. (microCAD-2021), 18-20 travnia: tezy dop. Kharkiv: NTU «KhPI». – 2021. – Pp. 25.
3. Dullni. E., Fink H., Heimbach M., Reuber C. A family of vacuum circuit-breakers with world-wide applications using common components. February 2001. DOI: 10.1049/cp:20010680. SourceIEEE Xplore. Conference: Electricity Distribution, 2001. Part 1: Contributions. CIRED. 16th Inter-national Conference and Exhibition on (IEE Conf. Publ No. 482) Volume: 1.
  4. Vyiklyuchatel vakuumnyiy VB4-E U2. <http://abm-amp.com/product/vyiklyuchatel-vakuumnyj-vb4-e-u2>.
  5. Bayda E.I., Klimenko B.V. Issledovanie mehanicheskikh napryazheniy v privodnom valu vakuumnogo vyiklyuchatelya srednih napryazheniy. Elektrotehnika i elek-tromehaniika, – 2017, – 1. – Pp. 10-15.
  6. BB/TEL Vakuumnyiy vyiklyuchatel. Rukovodstvo po eks-pluatatsii. Vakuumnyiy vyiklyuchatel BB/TEL-10. <https://www.tavrda.com>;
  7. Vyiklyuchateli vakuumnyie serii VVM-SESch-3(4)-10. Tehnicheskaya informatsiya. TI – 1 56 – 2009. <http://electroshield.ru>;
  8. Carlo Cereda, Carlo Gemme, Christian Reuber. Synchronous medium voltage circuit breakers: ABB solution based on magnetic drive and electronic control. CIRED'99. 5th International Conference & Exhibition on ELECTRICITY DISTRIBUTION. NICE, 1/14.
  9. Patent Ukraini № 117000 MPK: H01H 33/42, H01F 7/06 El-ektromagnitnyy privid. Bugaychuk V.M., Klimenko B.V., Lelyuk M.A. u201613627; zayavl. 30.12.2016; opubl. 12.06.2017, Byul. 11.– 11 p.: 12 il
  10. Klimenko B.V., Lelyuk M.A., Bugaychuk V.M., Forkun Ya.B. Elektromagnitnyy aktuator dlya vakuumnogo kontaktora srednih naprug. Visnik Natsionalnogo tehnichnogo universitetu "Harkivskiy politehniichniy Institut". – Harkiv: NTU «HPI». – 2018. – 32.– Pp. 27-33.
  11. Klimenko B.V., Lelyuk M.A. Pristriy keruvannya obmotkoy aktuatora vakuumnogo kontaktora. Informatsiyni tehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya: XXVI mizhn. nauk.-praktichna konf. (microCAD-2018), 16-18 travnya: tezy dop. Harkiv: NTU «HPI». – 2018. – Pp. 78.
  12. Pertsev A.A., Peterson A.L., Ryilskaya L.A. Osobennosti ispytaniy vakuumnih vyklyuchateley tokom korotkogo zamyikaniya. El-ektrotehnika. – 2006. – 9. – Pp. 29-32.
  13. Shaanxi Baoguang Vacuum Electric Device Co. Ltd. Vacuum Interrupter & Embedded Pole products. <http://www.baoguang.com.cn/en/product/enclosed/1/2795>.
  14. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. User's Manual 2006. Version 4.2 [Elektronnyiy resurs]. Rezhim dostupa: <http://femm.berlios.de>.

Надійшла (received) 02.05.2021

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Лелюк Микола Анатолійович (Лелюк Николай Анатольевич, Leliuk Mykola Anatoliyovych)** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри електричних апаратів, м. Харків, e-mail: lelyuk.nik@gmail.com

**Литвиненко Вікторія Володимирівна (Литвиненко Виктория Владимировна, Lytvunenko Viktoriia Vladimirovna)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; e-mail: vikalitv21082@gmail.com.

*В.В. ГРЕБЕНИКОВ, Р.В. ГАМАЛІЯ, В.С. ПОПКОВ*

### ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОР З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ І ОСЬОВИМ МАГНІТНИМ ПОТОКОМ ДЛЯ ВІТРОУСТАНОВОК

Наведено результати чисельних і експериментальних досліджень електрогенератора з постійними магнітами і осьовим магнітним потоком для вітроустановок малої потужності. Щоб вітроустановки могли успішно конкурувати з джерелами автономного електропостачання на основі сонячної енергії необхідно знижувати питому вартість електрогенераторів. Одним з можливих способів зниження вартості вітроустановки є заміна тихохідного багатополісного генератора на високошвидкісний, що працює в парі з магнітним редуктором. У цьому випадку електрогенератор може бути спроектований на частоту обертання  $n = 1000 \div 3000$  об/хв. Саме для цього діапазону частоти обертання визначені оптимальна конфігурація і розміри магнітної системи досліджуваного електрогенератора, при яких досягається максимальне значення потужності. Проведено порівняння розрахункових і експериментальних характеристик генератора, гарний збіг яких підтверджує адекватність розроблених математичних моделей. Ці комп'ютерні моделі потім використовуються для дослідження залежності питомої потужності генератора від висоти пазів статора і перетину обмотувального дроту, виконаного з мідної стрічки. Показано, що при оптимальних геометричних параметрах магніторушійна сила обмотки статора повинна бути узгоджена з магніторушійною силою постійних магнітів. Тільки при певному діапазоні висоти пазів забезпечується максимум потужності при номінальному струмі. Розрахунок характеристик досліджуваних генераторів виконувався в програмному пакеті Simcenter MagNet.

**Ключові слова:** електрогенератор з осьовим магнітним потоком, постійні магніти, зубцовий момент, магнітний редуктор, вітроустановка

*В.В. ГРЕБЕНИКОВ, Р.В. ГАМАЛЕЯ, В.С. ПОПКОВ*

### ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОР С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ И ОСЕВЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ ДЛЯ ВЕТРОУСТАНОВОК

Приведены результаты численных и экспериментальных исследований электрогенератора с постоянными магнитами и осевым магнитным потоком для ветроустановок малой мощности. Чтобы ветроустановки могли успешно конкурировать с источниками автономного электропитания на основе солнечной энергии необходимо снижать удельную стоимость электрогенераторов. Одним из возможных способов снижения стоимости ветроустановки является замена тихоходного многополюсного генератора на высокоскоростной, работающий в паре с повышающим магнитным редуктором. В этом случае электрогенератор может быть спроектирован на частоту вращения  $n = 1000 \div 3000$  об/мин. Именно для этого диапазона частоты вращения определены оптимальная конфигурация и размеры магнитной системы электрогенератора, при которых достигается максимальное значение мощности. Проведены сравнения расчетных и экспериментальных характеристик генератора, хорошее совпадение которых подтверждает адекватность разработанных математических моделей. Эти компьютерные модели затем используются для исследования зависимости удельной мощности генератора от высоты пазов статора и сечения обмоточного провода, выполненного из медной ленты. Показано, что для оптимальных геометрических параметров магнитодвижущая сила обмотки статора должна быть согласована с магнитодвижущей силой постоянных магнитов. Только при определенном диапазоне высоты пазов обеспечивается максимум мощности при номинальном токе. Расчет характеристик исследуемых генераторов выполнялся в программном пакете Simcenter MagNet.

**Ключевые слова:** электрогенератор с осевым магнитным потоком, постоянные магниты, зубцовый момент, магнитный редуктор, ветроустановка

*V.V. GREBENIKOV, R.V. GAMALIA, V.S. POPKOV*

### PERMANENT MAGNET GENERATOR WITH AXIAL MAGNETIC FLOW FOR WIND PLANTS

The results of numerical and experimental studies of an electric generator with permanent magnets and axial magnetic flux for low-power wind turbines are presented. In order for wind turbines to successfully compete with sources of autonomous power supply based on solar energy, it is necessary to reduce the specific cost of electric generators. One of the possible ways to reduce the cost of a wind turbine is to replace a quiet-running multipole generator with a high-speed one, which is paired with a magnetic step-up gear. In this case, the electric generator can be designed for rotation frequency  $n = 1000 \div 3000$  rpm. It is for this range of rotational speed that the optimal configuration and dimensions of the magnetic system of the electric generator have been determined, at which the maximum power value is reached. Comparisons of the calculated and experimental characteristics of the generator are carried out, the good coincidence of which confirms the adequacy of the developed mathematical models. These computer models are then used to study the dependence of the specific power of the generator on the height of the stator slots and the section of the winding wire made of copper tape. It is shown that for optimal geometrical parameters the magnetomotive force of the stator winding must be matched with the magnetomotive force of permanent magnets. Only for a certain range of slot heights is the maximum power at the rated current ensured. The characteristics of the investigated generators were calculated using the Simcenter MagNet software package.

**Keywords:** electric generator with axial magnetic flux, permanent magnets, cogging torque, magnetic gear, wind turbine

**Введение.** В настоящее время ветрогенераторы малой мощности (1-5 кВт) применяются, как в качестве резервных источников питания, так и в случае электроснабжения автономных потребителей. При этом, для того чтобы ветроустановки могли успешно конкурировать с источниками автономного электроснабжения на основе солнечной энергии необходимо снижать удельную стоимость электрогенераторов. Для

ветрогенераторов как с горизонтальной так и вертикальной осью вращения частота вращения ветрогенератора при средней скорости ветра  $V = 5 \div 10$  м/с достаточно мала и составляет примерно  $n = 100 \div 300$  об/мин. Электрогенераторы на такую малую частоту вращения имеют много полюсов, достаточно большие размеры, а значит вес и стоимость. Одним из возможных способов снижения стоимости

© В.В. Гребеников, Р.В. Гамалия, В.С. Попков, 2021

ветроустановки является замена тихоходного многополюсного генератора на высокоскоростной, работающий в паре с повышающим магнитным редуктором (мультипликатором) [1-4]. В этом случае при использовании магнитного редуктора с коэффициентом редукции, например,  $G_r = 9 \div 9.6$  частота вращения вала электрогенератора будет равной  $n = 1000 \div 3000$  об/мин, а его размеры и масса будут примерно на порядок меньше по сравнению со случаем непосредственного соединения вала ветроротора и низкоскоростного генератора. Общая масса магнитного редуктора и высокоскоростного генератора может составлять примерно 50% от общей массы низкоскоростного генератора [5]. В последнее время для ветроустановок применяют электрогенераторы с постоянными магнитами, которые имеют цилиндрическую конфигурацию магнитной системы [6, 7] либо аксиальную [8, 9]. В данном разделе приведены исследования электрогенератора с постоянными магнитами и аксиальным магнитным потоком.

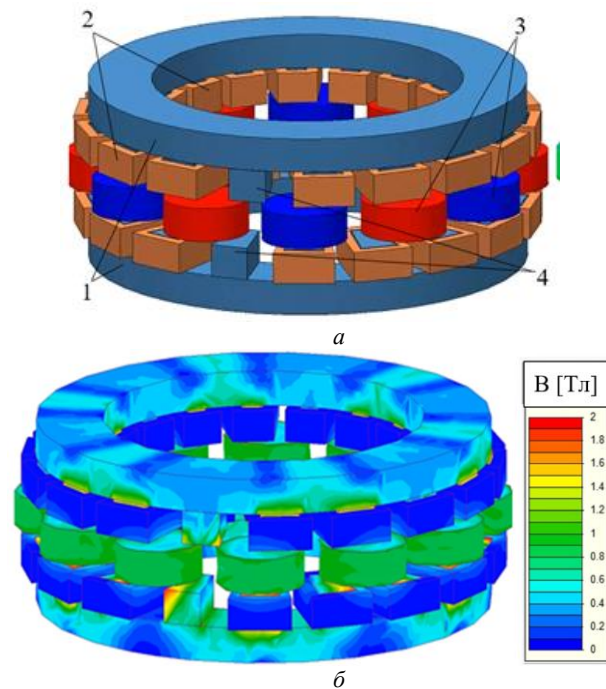
**Цель работы** – численные исследования электрогенератора с постоянными магнитами и аксиальным магнитным потоком и определение оптимальной конфигурации и размеров магнитной системы, при которой достигается максимальное значение мощности в заданном диапазоне частоты вращения, а также сравнение расчетных и экспериментальных значений характеристик генератора.

**Экспериментальные исследования.** На рис.1,*а* представлен общий вид магнитной системы исследуемого генератора. Статор состоит из двух симметрично расположенных частей и охватывает ротор с двух сторон. Каждая часть статора содержит магнитопровод 1, выполненный путем намотки тора из рулонной электротехнической стали, в котором затем фрезеруются открытые пазы для укладки обмоток 2. Обмотка на каждой части статора состоит из 18 катушек (6 катушек на одну фазу). Ротор состоит из двадцати цилиндрических постоянных магнитов 3, закрепленных на немагнитном основании, которое на рис. 1, *а* не показаны. Магнитопровод статора имеет зубцы 4, чтобы были видны зубцы статора две катушки на рис. 1,*а* не показаны. Размеры поперечного сечения зубцов таковы, что постоянные магниты диаметром  $D_{pm} = 25$  мм полностью их перекрывают. В предыдущих исследованиях [10] было показано, что применение магнитов цилиндрической формы в электрических машинах с аксиальным магнитным потоком предпочтительнее перед магнитами трапециевидальной формы, поскольку стоимость магнитов цилиндрической формы ниже стоимости магнитов трапециевидальной формы, а изготовление ротора с магнитами трапециевидальной формы требует большего количества металлообрабатывающих операций.

Для уменьшения зубцового момента обе части статора смещены друг относительно друга на определенный угол [10]. Зубцовый момент – это момент, действующий на ротор при отсутствии токов в обмотках, оказывающий отрицательное влияние на характеристики генератора (повышенные потери и вибра-

ции, дополнительный нагрев стали статора и пр.). В результате численных исследований для данного соотношения полюсов ротора и статора определен оптимальный угол смещения между двумя статорами, при котором значение зубцового момента (cogging torque) имеет минимальное значение. Оптимальное значение угла смещения равно  $\theta_{skew} = 5^\circ$ .

На рис. 1, *б* приведена картина магнитного поля исследуемого генератора. Анализируя картину магнитного поля, следует отметить, что спинки обеих частей статора не насыщены, индукция в них составляет 1.2÷1.4 Тл. Наблюдается некоторое насыщение в углах зубцов статора, максимальная индукция – 1.8 Тл.



1 – магнитопровод генератора; 2 – обмотки генератора; 3 – постоянные магниты; 4 – зубцы статора; *а* – общий вид магнитной системы; *б* – картина магнитного поля  
Рис. 1. Исследуемый генератор

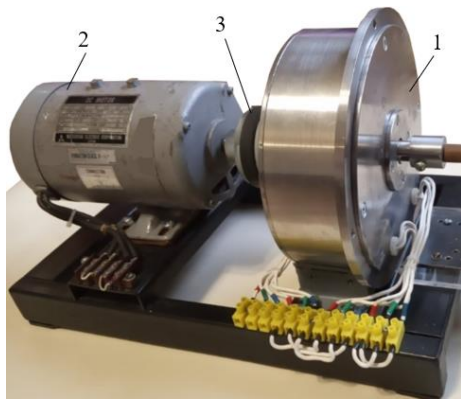
Расчет магнитной системы исследуемого генератора выполнялся в программном комплексе Simcentr Magnet при следующих условиях: материал статора магнитопровода – сталь электротехническая 2340; тип постоянных магнитов – N45SH; обмотки намотаны круглым проводом и соединены в «звезду», соединение обмоток каждой фазы – последовательное.

Основные параметры исследуемого генератора с аксиальным потоком приведены в табл. 1.

По результатам численного моделирования изготовлен экспериментальный образец исследуемого генератора, испытания которого проводились на экспериментальном стенде, показанном на рис. 2. На этом стенде экспериментальный образец генератора 1 с помощью приводного двигателя постоянного тока 2 приводится во вращение с заданной частотой. Вал приводного двигателя и испытуемого генератора соединены посредством муфты 3. Обмотки генератора соединяются в «звезду» и подключаются к выпрямительному мосту из шести диодов, который присоединяется к активному переменному резистору –  $R_{load}$ .

Таблица 1 – Основные параметры исследуемого генератора

Параметр	Значение
Наружный диаметр генератора $D_a$ , мм	140
Внутренний диаметр генератора $D_i$ , мм	82
Ширина паза $B_{slot}$ , мм	4.5
Высота паза $H_{slot}$ , мм	11
Число витков каждой обмотки $W$	9
Рабочий зазор $\delta$ , мм	2
Диаметр обмоточного провода без изоляции $d_{ins}$ , мм	1.4
Площадь паза $S_{slot}$ , мм <sup>2</sup>	49.5
Площадь провода $S_{wire}$ , мм <sup>2</sup>	1.54
Площадь меди $S_{cu}$ , мм <sup>2</sup>	13.85
Коэффициент заполнения паза медью, $k_{cu}$	0.28
Номинальная плотность тока в обмотке $J$ , А/мм <sup>2</sup>	5
Номинальный ток в обмотке $I_n$ , А	7.7



1 – исследуемый генератор; 2 – приводной двигатель; 3 – муфта  
Рис. 2. Экспериментальный стенд

По результатам расчетов и измерений были получены и сравнены характеристика холостого хода, а также внешние характеристики исследуемого генератора.

На рис. 3 показано сравнение расчетной и экспериментальной зависимости напряжения в нагрузке  $U_{load}$  от частоты вращения ротора генератора  $n$  (характеристика холостого хода). Среднее отклонение между расчетными и экспериментальными значениями для характеристики холостого хода составляет 2%.

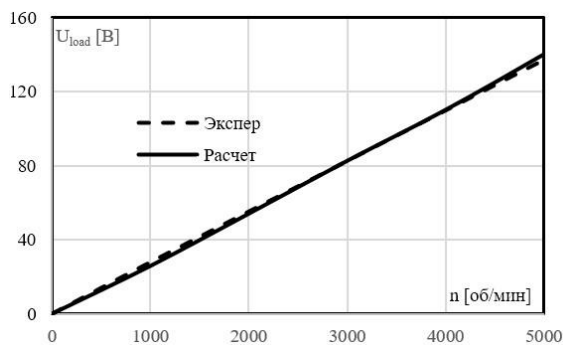


Рис. 3. Зависимость напряжения в нагрузке  $U_{load}$  от частоты вращения ротора генератора  $n$

На рис. 4 показано сравнение расчетной и экспериментальной зависимостей напряжения в нагрузке  $U_{load}$  от тока в нагрузке  $I_{load}$ . В процессе испытаний для нескольких значений активного сопротивления в нагрузке –  $R_{load}$  измеряется частота вращения ротора испытуемого генератора –  $n$ , фазное напряжение –  $U_{ph}$ , напряжение в нагрузке –  $U_{load}$ , ток в нагрузке –  $I_{load}$ . Среднее расхождение между расчетными и экспериментальными значениями составляет менее 4%.

Следует также отметить, что внешняя характеристика генератора довольно жесткая –  $\Delta U = (U_o - U_n)/U_n \times 100\% = 9\%$ , где  $U_o$  – напряжение холостого хода,  $U_n$  – номинальное напряжение.

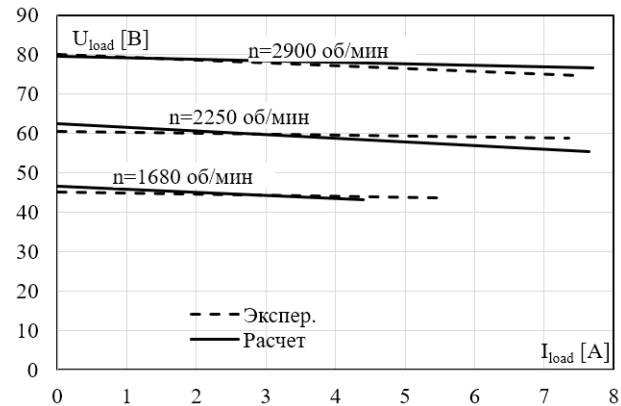


Рис. 4. Зависимость напряжения в нагрузке  $U_{load}$  от тока в нагрузке

На рис. 5 приведена зависимость мощности в нагрузке  $P_{load}$  от тока в нагрузке  $I_{load}$  для трех значений частоты вращения ротора. В данном опыте также достаточно хорошее совпадение между расчетными и экспериментальными зависимостями, расхождение не превышает 4%. Мощность в нагрузке соответствует выходной мощности генератора.

Сравнение характеристик, полученных при испытаниях экспериментального образца и характеристик, полученных в расчетной модели, показывает хорошее совпадение расчетных и экспериментальных зависимостей для нескольких значений частоты вращения ротора. Таким образом, расчетная модель адекватно описывает характеристики генератора данного типа и может быть использована в дальнейших исследованиях при вариации основных размеров магнитной системы.

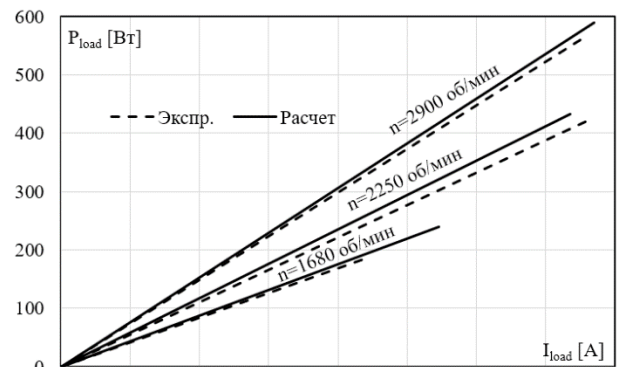


Рис. 5. Зависимость зависимости мощности в нагрузке от тока в нагрузке

**Численные исследования различных конфигураций магнитной системы электрогенератора.** На втором этапе были выполнены численные исследования характеристик генератора с аксиальным потоком при вариации высоты пазов статора для обмоток, намотанных из медной ленты. Использование медной ленты для намотки обмоток генератора с осевым магнитным потоком позволяет повысить коэффициент заполнения паза медью примерно вдвое, а значит, при тех же габаритах мощность генератора может быть существенно увеличена. В табл. 2 приведены основные параметры исследуемых моделей для трех значений ширины медной ленты, из которой намотаны обмотки статора:  $H_{\text{tape}} = 10$  мм;  $H_{\text{tape}} = 20$  мм;  $H_{\text{tape}} = 30$  мм. Наружный  $D_a$  и внутренний  $D_i$  диаметры магнитной системы для трех исследуемых моделей одинаковы и соответственно равны:  $D_a = 140$  мм,  $D_i = 82$  мм.

Таблица 2 – Основные параметры исследуемых моделей для трех значений ширины медной ленты

Номер варианта	1	2	3
Ширина (высота) медной ленты $H_{\text{tape}}$ , мм	10	20	30
Наружный диаметр генератора $D_a$ , мм	140	140	140
Внутренний диаметр генератора $D_i$ , мм	82	82	82
Ширина паза $B_{\text{slot}}$ , мм	4.5	4.5	4.5
Высота паза $H_{\text{slot}}$ , мм	11	21	31
Рабочий зазор $\delta$ , мм	2	2	2
Число витков каждой обмотки $W$	14	13	13
Толщина медной ленты $B_{\text{tape}}$ , мм	0.25	0.25	0.25
Толщина изоляции $B_{\text{ins}}$ , мм	0.1	0.1	0.1
Площадь паза $S_{\text{slot}}$ , мм <sup>2</sup>	49.5	94.5	139.5
Площадь одного провода $S_{\text{wire}}$ , мм <sup>2</sup>	2.5	5	7.5
Площадь меди $S_{\text{cu}}$ , мм <sup>2</sup>	35	65	97.5
Коэффициент заполнения паза медью $k_{\text{cu}}$	0.71	0.7	0.69
Номинальная плотность тока в обмотке $J$ , А/мм <sup>2</sup>	5	5	5
Номинальный ток в обмотке $I_n$ , А	12.5	25	37.5

Число витков обмоток статора для каждой из моделей выбиралось таким образом, чтобы коэффициент за-

полнения паза медью для всех вариантов был примерно одинаков. При равной плотности тока в обмотках статора равной  $J = 5$  А/мм<sup>2</sup> номинальный ток в обмотках пропорционален ширине медной ленты. Напряжение, генерируемое электрогенератором, пропорционально числу витков в обмотках генератора и частоте вращения ротора. Поэтому, число витков обмоток генератора подбиралось таким образом, чтобы при частоте вращения  $n = 1000 \div 3000$  об/мин напряжение после выпрямления было в диапазоне  $U_{\text{load}} = 80 \div 150$  В. Применение электронного регулятора напряжения позволит получить на выходе однофазное переменное напряжение 220 В или трёхфазное – 380В.

Расчет характеристик каждой из моделей в программном пакете Simcentr Magnet производился следующим образом. Фазы генератора соединялись в «звезду» и подключалось через выпрямительный мост к активному сопротивлению. Определялись ток и напряжение в фазах и в нагрузке в зависимости от времени, по осциллограмме фазного тока и напряжения определялось действующее значение тока и напряжения, а также мощность в нагрузке. Эти параметры были определены для следующих значений активного сопротивления нагрузки  $R_{\text{load}} = 1000$  Ом, 15 Ом, 10 Ом, 5 Ом, 3 Ом и 1 Ом.

Для уменьшения зубцового момента в каждой из моделей обе части статора смещены друг относительно друга на угол равный  $\theta_{\text{skew}} = 5^\circ$ , что позволило уменьшить максимальное значение зубцового момента в 2.7 ÷ 3 раза. Например, для модели с шириной медной ленты  $H_{\text{tape}} = 20$  мм при отсутствии смещения  $\theta_{\text{skew}} = 0^\circ$  максимальное расчетное значение зубцового момента составляет  $M_{\text{cog}} = 0,33$  Нм, при смещении  $\theta_{\text{skew}} = 5^\circ$  – максимальное значение зубцового момента соответственно равно  $M_{\text{cog}} = 0,12$  Нм.

Внешний вид расчетных моделей и картины магнитного поля для генератора с шириной обмотки (медной ленты):  $H_{\text{tape}} = 10$  мм;  $H_{\text{tape}} = 20$  мм;  $H_{\text{tape}} = 30$  мм приведены на рис. 6. Следует отметить, что насыщение магнитной системы не наблюдается, максимальная индукция в спинках статора – 1.2 Тл. Есть небольшое насыщение в зубцах статора, максимальное значение магнитной индукции при этом для модели с шириной магнитной ленты  $H_{\text{tape}} = 30$  мм составляет – 1.8 Тл.

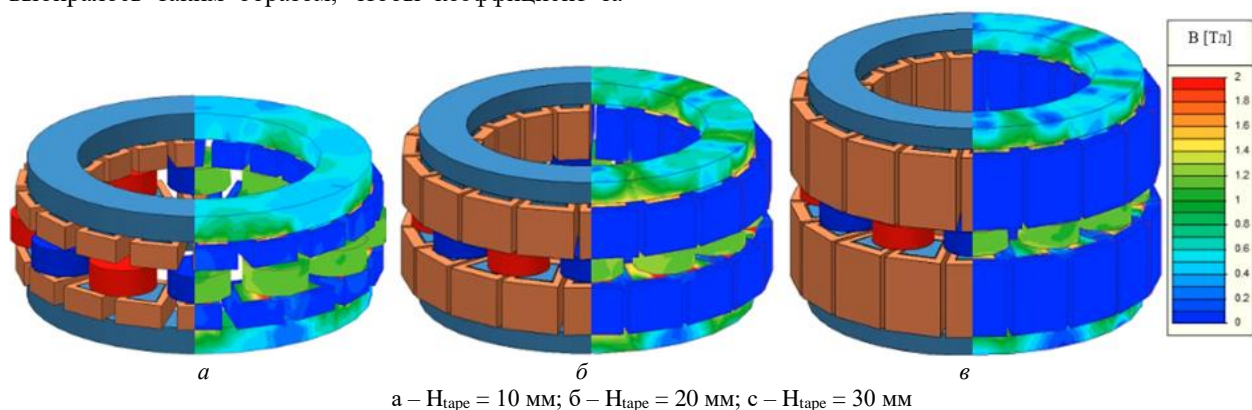
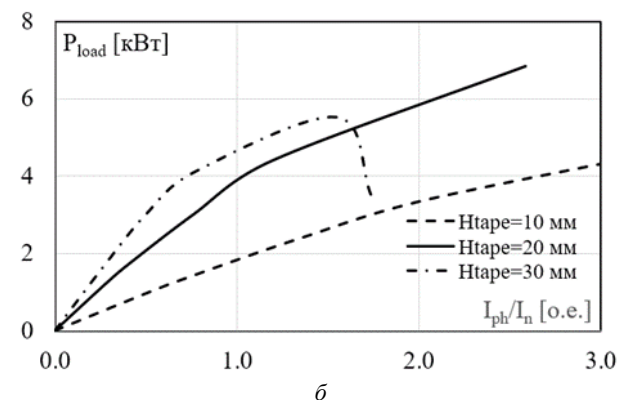
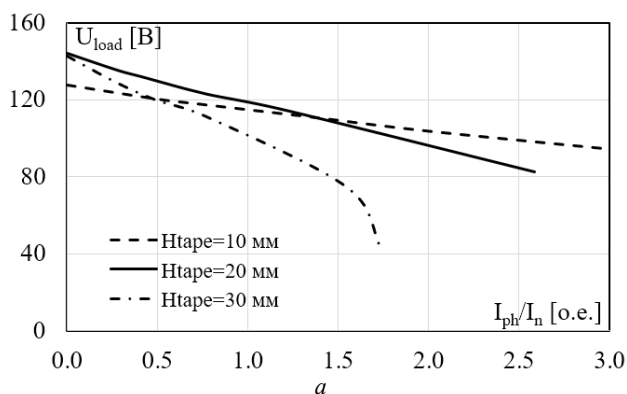


Рис. 6. Внешний вид и картины магнитного поля расчетных моделей генератора для трех значений ширины обмотки (медной ленты)

На рис. 7, а приведена зависимость напряжения в нагрузке от отношения фазного тока к номинальному ( $I_{ph}/I_n$ ) при частоте вращения ротора  $n = 2900$  об/мин, а на рис. 7, б – зависимость мощности в нагрузке от отношения фазного тока к номинальному.

Анализируя эти графики, следует отметить, что при ширине медной ленты  $H_{tape}=30$  мм напряжение имеет резко падающий характер и при  $I_{ph}/I_n = 1.7$  принимает нулевое значение, т. е. при нагрузке выше 1.7 от номинальной генератор неработоспособен. Для  $H_{tape}=10$  мм жесткость характеристики равна  $\Delta U = 10\%$ , для  $H_{tape}=20$  мм –  $\Delta U = 21\%$ .



а – зависимость напряжение в нагрузке от отношения фазного тока к номинальному; б – зависимость мощности в нагрузке от отношения фазного тока к номинальному  
Рис. 7. Расчетные зависимости электрогенератора с обмотками из медной ленты

Если проанализировать зависимость мощности в нагрузке от отношения фазного тока к номинальному, то следует отметить, что при  $H_{tape}=30$  мм и при  $I_{ph}/I_n = 1.7$  мощность имеет нулевое значение, т. е. при нагрузке выше 1.7 от номинальной генератор не в состоянии «взять» нагрузку. При номинальном токе и  $H_{tape}=10$  мм мощность генератора равна  $P_{load} = 1.9$  кВт, а при  $H_{tape}=20$  мм мощность генератора практически вдвое больше и равна  $P_{load} = 3.95$  кВт.

Приведенные выше характеристики позволяют сделать вывод, что увеличение поперечного сечения катушки не всегда означает увеличение его выходной мощности. Объясняется это следующим образом: обмотка с большим поперечным сечением имеет магнитодвижущую силу (МДС), сравнимую с МДС постоянных магнитов. Следовательно, увеличение поперечного сечения обмотки генератора возможно до

ограниченного значения, после чего характеристики генератора значительно ухудшаются.

На третьем этапе исследовалось влияние рабочего зазора на характеристики генератора. Для генератора с аксиальным магнитным потоком выполнить зазор менее 0.5 мм проблематично технологически, поскольку в результате взаимодействия магнитного поля магнитов с ферромагнитными частями статора на каждый из магнитов действуют осевые электромагнитные силы, которые, как показали результаты расчетов, имеют значение  $P_{PM} = 8 \div 10$  Н, а значит осевое усилие, действующее на весь ротор –  $P_r = 96 \div 120$  Н. Под действием этих осевых усилий ротор деформируется и при малом зазоре может соприкоснуться со статором, что может привести к разрушению магнитов. Были проведены расчеты основных характеристик исследуемого генератора для трех значений зазора между ротором и каждой из половин статора:  $G_{ap} = 0.5$  мм;  $G_{ap} = 1$  мм;  $G_{ap} = 2$  мм. На рис. 8 приведены зависимости напряжения в нагрузке и мощности в нагрузке от отношения фазного тока к номинальному при вариации величины рабочего зазора, а в табл.3 приведены основные характеристики исследуемого генератора в зависимости от величины рабочего зазора.

Таблица 3 – Основные характеристики исследуемого генератора в зависимости от величины рабочего зазора

Гар, мм	$U_o$ , В	$U_n$ , В	$\Delta U$ , %	$P_{load(1)}$ , кВт	$P_{load(2)}$ , кВт
0.5	178.0	154	15.6	4.4	7.8
1	171.2	146	17.3	4.3	7.7
2	144.3	120	20.2	3.8	5.4

В этой таблице обозначено:  $U_o$  – напряжение холостого хода;  $U_n$  – номинальное напряжение;  $\Delta U$  – жесткость внешней характеристики;  $P_{load(1)}$  – мощность в нагрузке при  $I_{ph}/I_n=1$ ;  $P_{load(2)}$  – мощность в нагрузке при  $I_{ph}/I_n=2$ .

Анализируя данные табл. 3 и рис. 8 следует отметить, что напряжение холостого хода и мощность при номинальном токе для зазора  $G_{ap}=0.5$  мм и  $G_{ap}=1$  мм отличаются примерно на 3%, для зазора  $G_{ap}=0.5$  мм и  $G_{ap}=2$  мм это различие более существенно и составляет 23% для напряжения холостого хода и 14.4% для мощности при номинальном токе и 31% – для мощности при токе вдвое больше номинального.

Таким образом, следует принять значение рабочего зазора равное  $G_{ap}=1$  мм оптимальным поскольку характеристики для зазора 0.5 мм и 1 мм отличаются не существенно, но при изготовлении генератора зазор  $G_{ap}=1$  мм выполнить технологически существенно проще. Удельные характеристики оптимального варианта генератора, следующие: для номинального тока –  $P_m = 0.41$  кВт/кг;  $P_v = 0.0017$  кВт/см<sup>3</sup>, для тока вдвое больше номинального (режим перегрузки) –  $P_m = 0.69$  кВт/кг;  $P_v = 0.0029$  кВт/см<sup>3</sup>

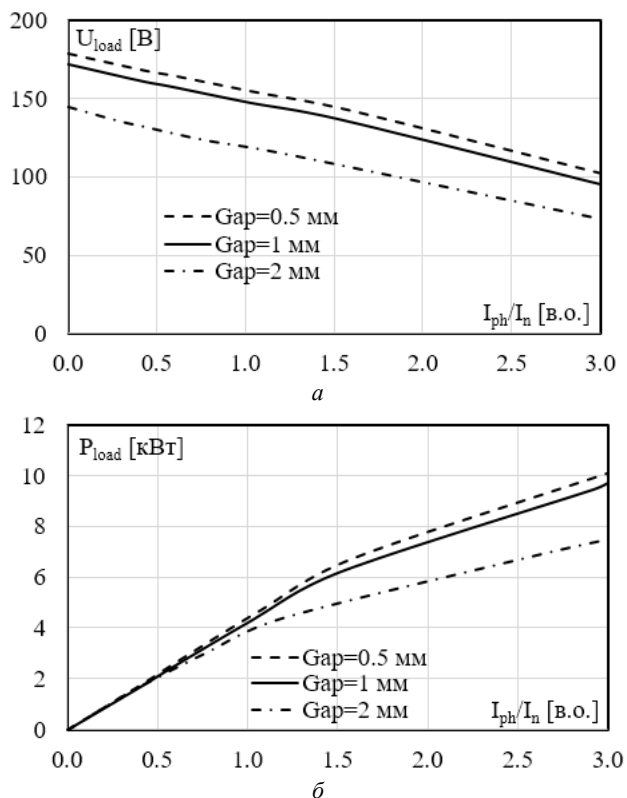


Рис. 8. Расчетные зависимости при вариации величины рабочего зазора: а – зависимость напряжение в нагрузке от отношения фазного тока к номинальному; б – зависимость мощности в нагрузке от отношения фазного тока к номинальному

### Выводы.

- для повышения удельных характеристик электрогенераторов с постоянными магнитами и аксиальным магнитным потоком разработаны параметрические модели с возможностью исследования рабочих характеристик электрогенератора при вариации основных размеров магнитной системы;

- проведены численные и экспериментальные исследования характеристик электрогенератора с постоянными магнитами и аксиальным магнитным потоком и получены хорошие совпадение расчетных и экспериментальных зависимостей для нескольких значений частоты вращения ротора. Расхождение между экспериментальными и расчетными значениями не превышает 4%. Таким образом, расчетная модель адекватно описывает характеристики генератора данного типа и может быть использована в дальнейших исследованиях при вариации основных размеров магнитной системы;

- в результате численных исследований электрогенератора установлено, что для обеспечения максимальных удельных показателей высота пазов и сечение обмоточного провода, то есть магнитодвижущая сила обмоток должна быть согласованы с магнитодвижущей силой постоянных магнитов. Только при определенном диапазоне высоты пазов обеспечивается максимум мощности при номинальном токе.

### Список літератури

1. Frank N. W., Toliyat H. A. Gearing ratios of a magnetic gear for

- wind turbines // IEEE International Electric Machines and Drives Conference. – 2009. – Pp. 1224-1230. doi:10.1109/iemdc.2009.5075359.
2. Bao G.Q., Mao K.F. A Wind Energy Conversion System with Field Modulated Magnetic Gear // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. – 2011. – Pp. 1-4. doi: 10.1109/APPEEC.2011.5748902.
3. Li K., Modaresahmadi S., Williams W. B., Bird J. Z., Wright J. D. Barnett D. Electromagnetic Analysis and Experimental Testing of a Flux Focusing Wind Turbine Magnetic Gearbox // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2019. – vol. 34, no. 3, Pp. 1512-1521. doi: 10.1109/TEC.2019.2911966.
4. Udalov S. N., Achitaev A. A., Pristup A. G. Investigations of a magnetic gear for application in wind turbines // 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST). – 2016. – Pp. 166-171, doi: 10.1109/IFOST.2016.7884219.
5. Гребеников В.В., Гамалея Р.В. Сравнительный анализ двух генераторов с постоянными магнитами для ветроустановок: низкоскоростного с внешним ротором; высокоскоростного с магнитным редуктором // Гідроенергетика України. – 2019. – №1-2, С. 66-71. [https://uhe.gov.ua/media\\_tsentr/zhurnal\\_hydroenerhetyka\\_ukrayiny/gidroenergetika-ukraini-2019-no1-2](https://uhe.gov.ua/media_tsentr/zhurnal_hydroenerhetyka_ukrayiny/gidroenergetika-ukraini-2019-no1-2).
6. Kumar R. R., Santosh K. Singh, Srivastava R. K. et al. Modeling of Airgap Fluxes and Performance Analysis of Five Phase Permanent Magnet Synchronous Generator for Wind Power Application // IEEE Access. – 2020. – vol. 8, Pp. 195472-195486. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3034268.
7. He C., Wu T. Analysis and design of surface permanent magnet synchronous motor and generator // CES Transactions on Electrical Machines and Systems. – 2019. – vol. 3, no. 1, pp. 94-100. doi: 10.30941/CESTEMS.2019.00013.
8. Wang X., Pang W., Gao P., Zhao X. Electromagnetic Design and Analysis of Axial Flux Permanent Magnet Generator With Unequal-Width PCB Winding // IEEE Access. – 2019. – vol. 7, Pp. 164696-164707. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2952893.
9. Sriram S. Laxminarayan, Manik Singh, Abid H. Saifee, Arvind Mitta. Design, modeling and simulation of variable speed Axial Flux Permanent Magnet Wind Generator // Sustainable Energy Technologies and Assessments. – 2017. – vol. 19, Pp. 114-124. doi.org/10.1016/j.seta.2017.01.004
10. Dobzhanskyi O., Eklas Hossain, Ebrahim Amiri, Gouws R., Grebenikov V., Mazurenko L., Prymak M., Gamaliia R. Axial-Flux PM Disk Generator With Magnetic Gear for Oceanic Wave Energy Harvesting // IEEE Access. – 2019. – vol. 7, P. 44813-44822. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2908348.

### References (transliterated)

1. Frank N.W., Toliyat H.A. Gearing ratios of a magnetic gear for wind turbines // IEEE International Electric Machines and Drives Conference. – 2009. – Pp. 1224-1230. doi:10.1109/iemdc.2009.5075359.
2. Bao G. Q., Mao K. F. A Wind Energy Conversion System with Field Modulated Magnetic Gear // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. – 2011. – Pp. 1-4. doi: 10.1109/APPEEC.2011.5748902.
3. Li K., Modaresahmadi S., Williams W. B., Bird J. Z., Wright J. D. Barnett D. Electromagnetic Analysis and Experimental Testing of a Flux Focusing Wind Turbine Magnetic Gearbox // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2019. – vol. 34, no. 3, Pp. 1512-1521. doi: 10.1109/TEC.2019.2911966.
4. Udalov S. N., Achitaev A. A., Pristup A. G. Investigations of a magnetic gear for application in wind turbines // 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST). – 2016. – Pp. 166-171, doi: 10.1109/IFOST.2016.7884219.
5. Grebenikov B.B., Gamaliia R.V. Sravnitelniy analiz dvuh generatorov s postoyannimi magnitami dlya vetroustanovok: nizkoskorostnogo s vneshnim rotorom; visokoskorostnogo s magnitnim reduktorom // Hidroenergetika Ukraini. – 2019. – no.1-2, Pp. 66-71. [https://uhe.gov.ua/media\\_tsentr/zhurnal\\_hydroenerhetyka\\_ukrayiny/gidroenergetika-ukraini-2019-no1-2](https://uhe.gov.ua/media_tsentr/zhurnal_hydroenerhetyka_ukrayiny/gidroenergetika-ukraini-2019-no1-2).
6. Kumar R. R., Santosh K. Singh, Srivastava R. K. et al. Modeling of Airgap Fluxes and Performance Analysis of Five Phase Permanent Magnet Synchronous Generator for Wind Power Application // IEEE Access. – 2020. – vol. 8, Pp. 195472-195486. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3034268.
7. He C., Wu T. Analysis and design of surface permanent magnet synchronous motor and generator // CES Transactions on Electrical

- Machines and Systems. – 2019. – vol. 3, no. 1, pp. 94-100. doi: 10.30941/CESTEMS.2019.00013.
8. Wang X., Pang W., Gao P., Zhao X. Electromagnetic Design and Analysis of Axial Flux Permanent Magnet Generator With Unequal-Width PCB Winding // IEEE Access. – 2019. – vol. 7, Pp. 164696-164707. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2952893.
  9. Sriram S. Laxminarayan, Manik Singh, Abid H. Saifee, Arvind Mitta. Design, modeling and simulation of variable speed Axial Flux Permanent Magnet Wind Generator // Sustainable Energy Technologies and Assessments. – 2017. – vol. 19, Pp. 114-124. doi.org/10.1016/j.seta.2017.01.004
  10. Dobzhanskyi O., Eklas Hossain, Ebrahim Amiri, Gouws R., Grebenikov V., Mazurenko L., Pryjmak M., Gamaliia R. Axial-Flux PM Disk Generator With Magnetic Gear for Oceanic Wave Energy Harvesting // IEEE Access. – 2019. – vol. 7, P. 44813-44822. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2908348.

Поступила (received) 30.04.21

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Гребеніков Віктор Володимирович (Гребеников Виктор Владимирович, Grebenikov Viktor Vladimirovich)** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут електродинаміки Національної академії наук України, провідний науковий співробітник, тел. (067) 441-73-72; e-mail: elm1153@gmail.com.

**Гамалія Ростислав Віталійович (Гамалея Ростислав Витальевич, Gamaliia Rostyslav Vitaliyovich)** – кандидат фізико-математичних наук, Інститут електродинаміки Національної академії наук України, старший науковий співробітник, тел. (067) 763-18-54; e-mail: rgamaleya@gmail.com.

**Попков Володимир Сергійович (Попков Владимир Сергеевич, Popkov Vladimir Sergeevich)** – Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАНУ, інженер, тел. (067) 440-13-05; e-mail: popkov2018@ukr.net.



*А.П. ЛИХОГУБ, М.А. КОВАЛЕНКО, І.В.ТКАЧУК, А.О. ГОНЧАРУК*

## ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ТОРЦЕВОГО МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА ІЗ ПОДВІЙНИМ СТАТОРОМ

Розроблено методологію для оптимізаційно-параметричного розрахунку геометричних параметрів конструкції торцевого магнітоелектричного генератора із постійними магнітами. Розроблену методологію можливо використовувати для розрахунку та оптимізації геометричних параметрів в автоматизованому режимі практично для будь-якого типу електромеханічного перетворювача енергії. Робота розробленої системи базується на взаємопов'язаних зв'язках між системою автоматизованого проектування, програмного комплексу та чисельного розрахунку електромагнітного поля із можливістю зворотного зв'язку та параметризації та обчислювального середовища типу Matlab. В роботі побудовано параметризовану геометричну модель на прикладі торцевого магнітоелектричного генератора із подвійним статором. В подальшому проведено параметричну оптимізацію геометричних параметрів, використовуючи розроблений алгоритм. Використання розробленого схемного рішення зменшує час, витрачений дослідником на розрахунок геометрії та оптимізацію. Параметризація проводиться на всіх етапах побудови окремої деталі, геометрію якої планується змінювати, та у кожній деталі збірок, якщо такі передбачені в конкретному випадку. Тобто, за допомогою розробленої моделі, можливо запрограмувати оптимізацію як окремого конструктивного елемента досліджуваної системи так і об'єкта в цілому. В процесі оптимізації змінювались основні геометричні параметри досліджуваного торцевого генератора із подвійним статором: ярмо статора, повітряний проміжок, зубцево-пазова зона статора, елементи корпусу. В результаті параметричної оптимізації геометрії прототипу ТМГПМ р подвійним статором вдалося зменшити геометричні розміри за рахунок оптимізації величини магнітної індукції на окремих ділянках магнітного осердя досліджуваного генератора. За рахунок застосування розробленого алгоритму вдалося досягти зменшення вартості генератора, а також об'єму магнітопровода на 18,1 %, та 24,3 % відповідно. Це свідчить про ефективність розробленого алгоритму та можливість використання даного алгоритму в подальших дослідженнях.

**Ключові слова:** торцевий генератор, магнітоелектричне збудження, параметрична оптимізація, постійні магніти, математичне моделювання.

*А.П. ЛИХОГУБ, М.А. КОВАЛЕНКО, И.В.ТКАЧУК, А.О. ГОНЧАРУК*

## ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТОРЦЕВОГО МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА С ДВОЙНЫМ СТАТОРОМ

Разработана методология для оптимизационно-параметрического расчета геометрических параметров конструкции торцевого магнитоэлектрического генератора с постоянными магнитами. Разработанную методологию можно использовать для расчета и оптимизации геометрических параметров в автоматизированном режиме практически для любого типа электромеханического преобразователя энергии. Работа разработанной системы базируется на взаимосвязанных связях между системой автоматизированного проектирования, программного комплекса и численного расчета электромагнитного поля с возможностью обратной связи и параметризации и вычислительной среды типа Matlab. В работе построено параметризованных геометрическую модель на примере торцевого магнитоэлектрического генератора с двойным статором. В дальнейшем проведено параметрическую оптимизацию геометрических параметров, используя разработанный алгоритм. Использование разработанного схемного решения уменьшает время, потраченное исследователем на расчет геометрии и оптимизацию. Параметризация проводится на всех этапах построения отдельной детали, геометрию которой планируется менять, и в каждой детали сборки, если таковые предусмотрены в конкретном случае. То есть, с помощью разработанной модели, можно запрограммировать оптимизацию как отдельного конструктивного элемента исследуемой системы и объекта в целом. В процессе оптимизации изменялись основные геометрические параметры исследуемого торцевого генератора с двойным статором: ярмо статора, воздушный промежуток, зубцево-пазовая зона статора, элементы корпуса. В результате параметрической оптимизации геометрии прототипа ТМГПМс двойным статором удалось уменьшить геометрические размеры за счет оптимизации величины магнитной индукции на отдельных участках магнитного сердечника исследуемого генератора. За счет применения разработанного алгоритма удалось достичь уменьшения стоимости генератора, а также объема магнітопровода на 18,1%, и 24,3% соответственно. Это свидетельствует об эффективности разработанного алгоритма и возможность использования данного алгоритма в дальнейших исследованиях.

**Ключевые слова:** торцевой генератор, магнитоэлектрическое возбуждение, параметрическая оптимизация, постоянные магниты, математическое моделирование.

*A.P. LYKHONUB, M.A. KOVALENKO, I.V.TKACHUK, A.O. HONCHARUK*

## PARAMETRIC OPTIMIZATION OF MAGNETOELECTRIC GENERATOR WITH DOUBLE STATOR

A methodology for the optimization-parametric calculation of geometric parameters of the design of an axial-flux permanent magnet generator has been developed. The developed methodology can be used to calculate and optimize geometric parameters in an automated mode for almost any type of electromechanical energy converter. The operation of the developed system is based on the interconnections between the computer-aided design system, software package, and numerical calculation of the electromagnetic field with the possibility of feedback and parameterization and a computing environment such as Matlab. The parameterized geometric model is constructed on the example of an axial-flux permanent magnet generator with a double stator. Subsequently, parametric optimization of geometric parameters was performed using the developed algorithm. The use of the developed solution reduces the time spent by the researcher on the calculation of geometry and optimization. Parameterization is performed at all stages of construction of a single part, the geometry of which is planned to change, and in each part of the assemblies if any in a particular case. That is, with the help of the developed model, it is possible to program the optimization of both a separate structural element of the studied system and the object as a whole. In the process of optimization, the main geometrical parameters of the investigated end generator with double side changed: stator yoke, air gap, gear-groove zone of the stator, housing elements. As a result of parametric optimization of the geometry of the prototype, it was possible to reduce the geometric dimensions by optimizing the magnitude of the magnetic induction in some areas of the magnetic core of the studied generator. Due to the application of the developed algorithm, it was possible to reduce the cost of the generator, as well as the volume of the magnetic circuit by 18.1% and 24.3%, respectively. This indicates the effectiveness of the developed algorithm and the possibility of using this algorithm in further research.

**Key words:** axial-flux generator, magnetolectric excitation, parametric optimization, permanent magnets, mathematical modeling.

**Вступ.** Торцеві магнітоелектричні генератори із постійними магнітами (ТМГПМ) широко використовуються в різноманітних галузях техніки [1, 2]. Вони застосовуються в якості тихохідних багатополосних

електрогенераторів або в якості високомоментних тягових двигунів. Магнітоелектричні торцеві синхронні генератори поєднують в собі переваги генераторів із постійними магнітами із можливістю регулювання вихідних величин за допомогою додаткової підмагнічу

© А.П. Лихогуб, М.А. Коваленко, І.В. Ткачук, А.О. Гончарук, 2021

вальної обмотки.

Традиційних методик для точного розрахунку основних розмірів таких генераторів не існує. Для розрахунку основних розмірів використовуються аналітичні методи або використовується досвід інженерів-конструкторів. Такий підхід не забезпечує оптимальні геометричні (а отже і електромагнітні) параметри розробленого генератора. Для пошуку оптимальних геометричних параметрів розробники використовують всі відомі чисельні та аналітичні методи [3]. Це збільшує час та вартість кінцевої розробки.

**Актуальність.** Актуальним напрямком є оптимізація геометрії досліджуваного торцевого магнітоелектричного генератора із подвійним статором. Параметрична оптимізація геометричних розмірів дозволить зменшити металоемність та кінцеву вартість готової конструкції генератора.

За наявності технічного завдання та методик розрахунку, вибір геометричних параметрів конструкції досліджуваного торцевого генератора здійснюється відповідно наведених рекомендацій відносно прототипу та за допомогою аналітичного або польового розрахунку. Відсутність технічного завдання та експлуатаційних характеристик торцевих магнітоелектричних генераторів із подвійним статором робить неможливим правильний вибір прототипу. В даній роботі вихідні геометричні параметри генератора обрані в результаті наближеного аналітичного розрахунку з урахуванням досвіду провідних інженерів-конструкторів електро-механічних пристроїв.

Ескіз досліджуваного генератора показано на рис. 1.

На рис. 1 показано: 1 – диск ротора; 2 – магнітне осердя статора; 3 – обмотка якоря; 4 – постійні магніти; 5 – підмагнічуючи обмотка; 6 – корпус генератора.

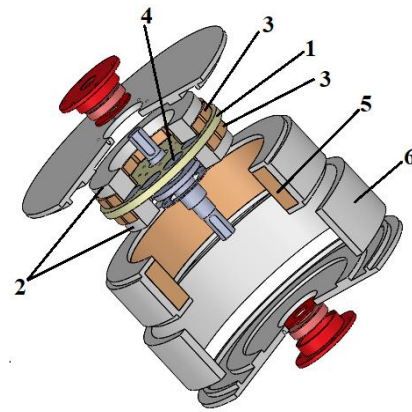


Рис. 1. Ескіз досліджуваного ТМГПМ

**Метою роботи** є розробка методики для оптимізаційно-параметричного розрахунку геометрії торцевого магнітоелектричного генератора із подвійним статором та оптимізації його геометричних параметрів.

Для пошуку оптимальних геометричних співвідношень індуктора та якоря, величини повітряного проміжку, необхідно розробити параметризовану модель, яка дозволяє змінювати геометрію під час електромагнітного розрахунку при мінімальних часових та людських ресурсах. Це прискорить подальше дослідження впливу геометричних співвідношень на досліджувані параметри в електромагнітному розрахунку.

**Математична модель.** На рис. 2-5 наведено принципову схему оптимізаційно-параметричного розрахунку геометрії ЕМПЕ, зокрема досліджуваного генератора. Використання даних схематичних рішень дозволяє зменшити час, витрачений дослідником на розрахунок та оптимізацію, а також значно розширити функціонал використаних пакетів прикладних програм, шляхом їх інтеграції в єдиний комплекс.

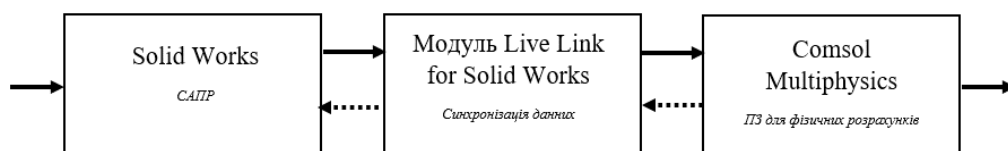


Рис. 2. Принципова схема оптимізаційно-параметричного розрахунку геометрії за допомогою двосторонньої інтеграції пакетів Comsol Multiphysics та Solid Works

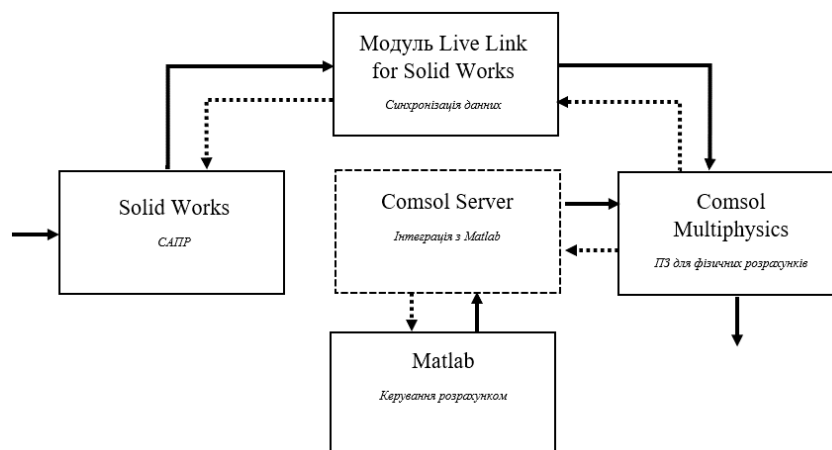


Рис. 3. Принципова схема оптимізаційно-параметричного розрахунку геометрії за допомогою пакетів Solid Works, Comsol Multiphysics та Matlab. Варіант 1.

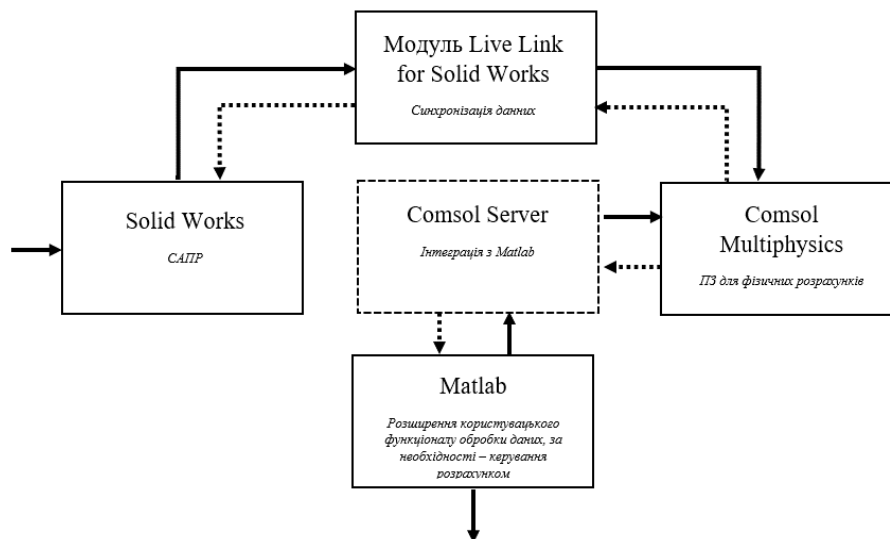


Рис. 4. Принципова схема оптимізаційно-параметричного розрахунку геометрії за допомогою пакетів Solid Works, Comsol Multiphysics та Matlab. Варіант 2.

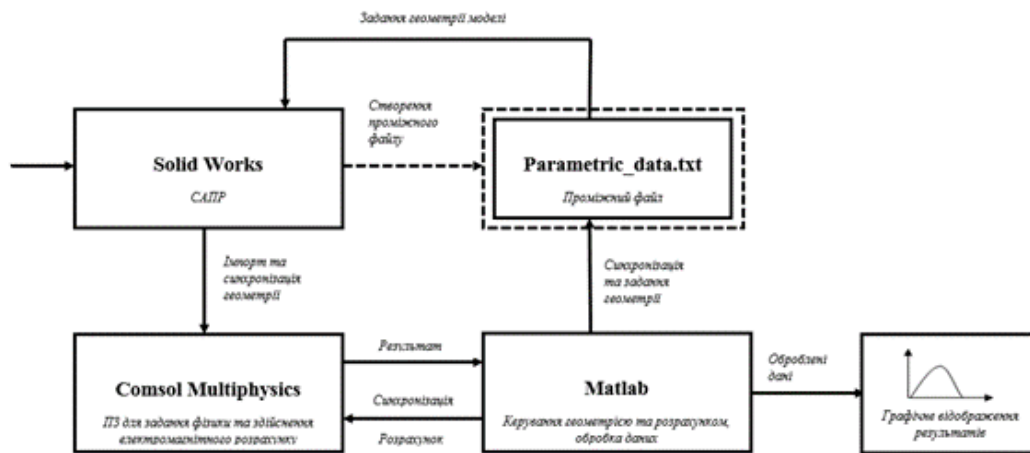


Рис. 5. Принципова схема оптимізаційно-параметричного розрахунку, що також може бути використана для моделей складної топології

Схема, наведена на рис. 5 може бути використана як для простої, так і для складної топології. Для реалізації розробленої структури та електромагнітного розрахунку параметризованої моделі використовуються наступні пакети прикладних програм:

- Solid Works – використовується для розробки параметризованої тривимірної моделі;

Comsol Multiphysics – використовується для розробки фізичної моделі, електромагнітного розрахунку та синхронізації геометрії з використанням модуля Live Link With Solid Works;

Comsol Multiphysics For Matlab – сервер для синхронізації даних Matlab та Comsol Multiphysics;

Matlab – використовується для розробки коду, який змінює значення геометричних параметрів моделі, обробляє отримані результати, виконує автоматичну синхронізацію геометрії Solid Works та Comsol Multiphysics при зміні геометричних параметрів у визначеному діапазоні;

Функціонування розробленої параметризованої моделі відбувається наступним чином:

Етап 1. Розробка 3D (2D)-моделі в САПР, наприклад, в середовищі Solid Works, з функціями параметризації (можливості зміни геометричних параметрів);

Етап 2. Задаються розміри та взаємозв'язки у розробленій моделі в САПР за допомогою глобальних змінних (Global Variables);

Етап 3. Розробляється зовнішній файл (наприклад, у форматі .txt) на який посилаються задані змінні в моделі САПР;

Етап 4. Синхронізація моделі Solid Works з Comsol Multiphysics за допомогою модуля Live Link With Solid Works та розробка польової математичної моделі для аналізу електромагнітного поля;

Етап 5. Запуск серверу Comsol Multiphysics For Matlab;

розробка коду синхронізації в середовищі Matlab для зміни файлів, запуску розрахунку та виведення результатів. За необхідності в системі Matlab проводиться обробка отриманих даних.

Згідно з рис. 2-5, розрахунок розробленої польової 3D або (2D)-моделі в Comsol Multiphysics здійснюється автоматично для різних конфігурацій геометрії моделі.

Наведена схема може змінюватися залежно від принципів побудови та параметризації моделі, мети розрахунку тощо.

На рис. 6 показано приклад параметризації ескізних розмірів для зубців магнітопровода статора.

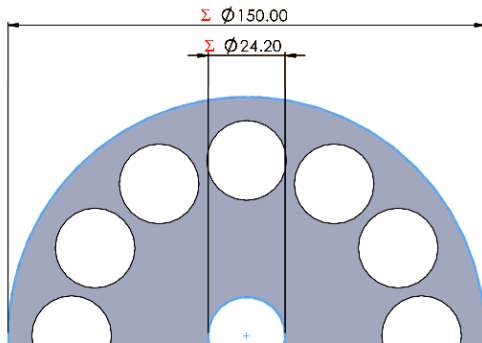


Рис. 6. Параметризація ескізних розмірів на прикладі зубців магнітопровода ротора ТМГПМ

По рис. 6 знак  $\Sigma$  означає прив'язку розміру до глобальних змінних (параметрів та основних розмірів генератора). Це можливо виконувати як для визначення розмірів між примітивами ескізу, так і для параметризації операцій моделювання (Boss-Extrude, Cut-Extrude тощо, в середовищі САПР). Одним із способів визначення глобальних змінних є використання інструменту Equations.

Параметризацію необхідно проводити на всіх етапах побудови окремої деталі, геометрію якої планується змінювати, та у кожній деталі збірок, якщо такі передбачені в конкретному випадку. Після визначення всіх змінних та прив'язування розмірів, виконується експорт даних у зовнішній файл (наприклад .txt) в якому відповідним чином задаються необхідні змінні, що відповідають за геометричні розміри досліджуваного об'єкта. Наприклад, зміст файлу, створений за допомогою операції експорту даних, за допомогою якого регулюється товщина спинки якоря, виглядає так, як показано на рис. 7.

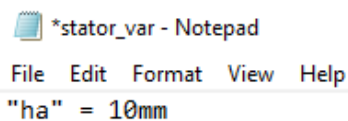


Рис. 7. Приклад файлу змінної для регулювання товщини спинки якоря

В файлі (на рис. 4) може задаватись як окрема змінна, так і масив змінних параметрів: параметри зубцевої зони статора та ротора, параметри магнітного осердя і таке інше.

Після параметризації моделі виконується її синхронізація зі середовищем Comsol Multiphysics за допомогою модуля Live Link For Solid Works. Використання даного модуля нівелює необхідність збереження конфігурацій 3D-моделі у вигляді окремих файлів з їх подальшим імпортом у Comsol Multiphysics.

Після формулювання задачі електромагнітного розрахунку в Comsol Multiphysics здійснюється запуск серверу Comsol Multiphysics With Matlab. У редакторі

Matlab створюється скрипт для налаштування та запуску розрахунку, синхронізації файлів та перезапису змінних відповідно до заданого діапазону.

Команди для керування розрахунком через Matlab містяться у спільному з Comsol Multiphysics вікні, що викликається командою "mphnavigator" у командному вікні Matlab. Також, у вікні "mphnavigator" відображається дерево розрахунку, аналогічне тому, що у Comsol Multiphysics. Окрім цього, реалізація такого схемного рішення в Matlab дозволяє перегляд геометрії та результатів графічної інтерпретації результатів розрахунків.

Даний алгоритм можливо використовувати для оптимізації геометрії, розробки нових конструкцій та дослідження фізичних процесів в ЕМП різноманітної конфігурації. Відповідно до мети розрахунку, схема може спростуватись.

На рис. 5 показано ескіз досліджуваного ТМГПМ, що використовується в якості прикладу в даній роботі.

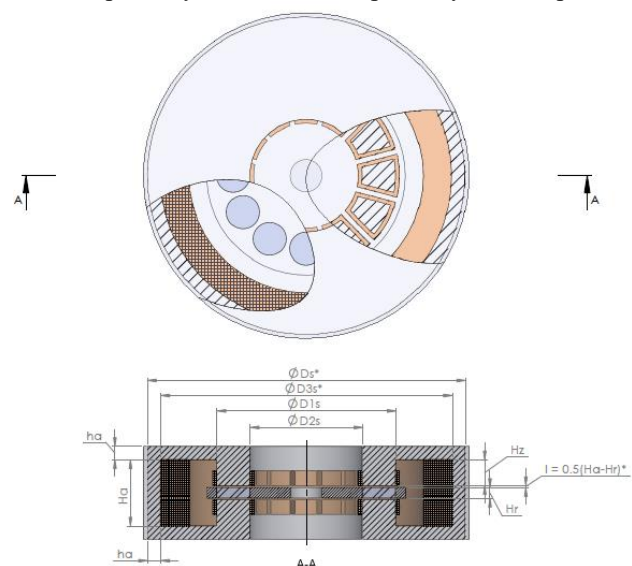


Рис. 8. Ескіз досліджуваного ТМГПМ параметризованими розмірами

Рис. 8 ілюструє параметризовані розміри, де знаком \* позначено ті, що є залежними від змінних, значення яких варіювалося під час дослідження.

**Результати моделювання.** На рис. 9 показано розподіл електромагнітного поля в об'ємі досліджуваного генератора для його вихідних геометричних параметрів. Розподіл магнітної індукції зображено для фрагменту ТМГПМ з метою спрощення розробленої тривимірної половини математичної моделі. Картина розподілу поля показана для режиму неробочого ходу генератора.

Згідно із рис. 9 середнє значення магнітної індукції в зубцях статора складає  $\approx 1,39$  Тл, в ярмі статора  $\approx 0,86$  Тл, в повітряному проміжку  $\approx 0,57$  Тл та в спинці корпусу  $\approx 0,5$  Тл. Оскільки ротор виготовлений із немагнітного матеріалу, його геометричні параметри визначаються виходячи із оптимальної механічної міцності, жорсткості та потужності генератора.

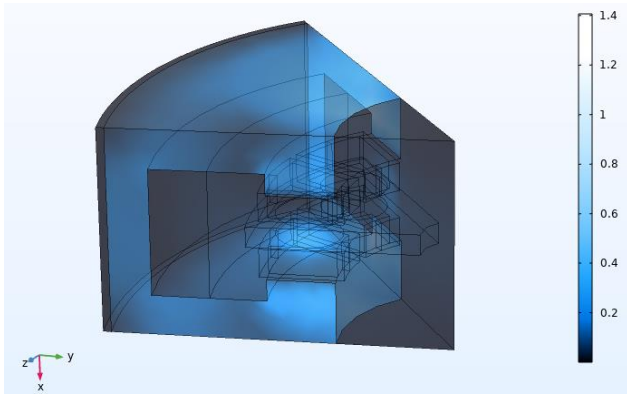


Рис. 9. Розподіл електромагнітного поля досліджуваного ТМГПМ, струм в підмагнічуючій обмотці  $I_p = 1$  А.

Результати первинного розрахунку електромагнітного поля (рис. 6) показали, що розміри досліджуваного генератора є не оптимальними. Про це свідчать значення магнітної індукції, що є заниженими для обраної електротехнічної холоднокатаної сталі. Завищені розміри є причиною підвищення вартості конструкції, матеріалоемності, об'єму, встановлювальних розмірів і т.ін.

Оптимізації підлягають наступні геометричні параметри, згідно з рис. 8, досліджуваного ТМГПМ: ярмо статора, повітряний проміжок, зубцево-пазова зона статора, елементи корпусу.

На рис. 10 показано розподіл електромагнітного поля для оптимізованої конструкції досліджуваного ТМГПМ.

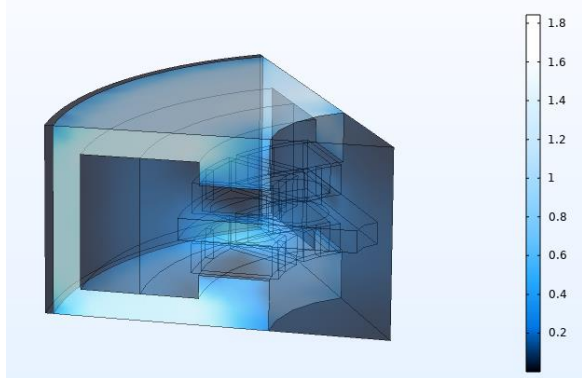


Рис. 10. розподіл магнітної індукції в оптимізованому варіанті ТМГПМ

В табл. 1 наведено порівняння значень магнітної індукції досліджуваного ТМГПМ до параметричної оптимізації та після.

Таблиця 1 – магнітна індукція в окремих ділянках досліджуваного ТМГПМ

Магнітна індукція в зоні	Значення параметру до оптимізації	Значення параметру після оптимізації
Повітряний проміжок	0.57 Тл	0.65 Тл
Ярмо магнітного осердя статора	0.76 Тл	1.45 Тл
Зубці статора	1.39 Тл	1.82 Тл
Корпус генератора	0.81 Тл	1.52 Тл

Кінець оптимізаційного розрахунку настає в момент, коли значення магнітних індукцій в оптимізаційних зонах набувають заданої величини. Оптимізація товщини корпусу досліджуваного генератора проводилась при подачі струму на додаткову підмагнічуючу обмотку величиною  $I_3=1$  А. Ця величина відповідає максимальній розрахунковій потужності підмагнічуючої обмотки. Величина повітряного проміжку оптимізувалась виходячи із міркувань максимально можливого значення електромагнітного моменту та мінімальних значень пульсацій та згинаючих осьових зусиль.

Наприклад, залежність величини магнітної індукції в поперечному перерізі зубця статора від його ширини (вираженої в кутах рис. 3) показано на рис. 11.

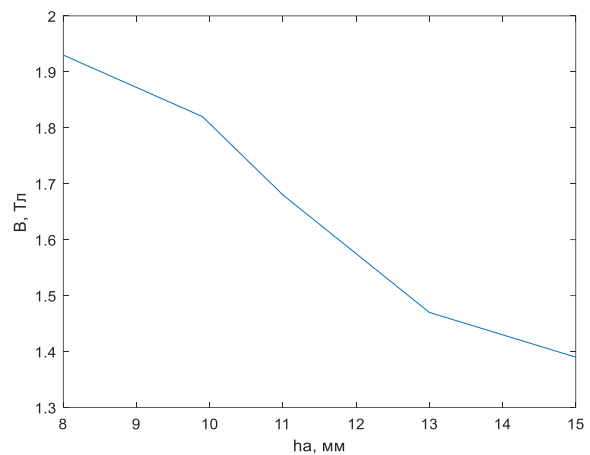


Рис. 11. Залежність магнітної індукції в зубці статора від його ширини

Виходячи з рис. 8, робоче значення індукції в зубцях лежить в межах 1.82...1.92 Тл. Використовуючи дану методологію параметричної оптимізації, аналогічно знаходяться оптимальні значення змінних  $d_p$ ,  $h_p$  та  $h_c$ .

В табл. 2 наведено повні результати розрахунку та параметричної оптимізації геометричних розмірів досліджуваного ТМГПМ.

Зниження об'єму конструкції генератора, його ваги та ціни досягається за рахунок зменшення ваги електротехнічної сталі після оптимізації. За результатами проведеної параметричної оптимізації можливо знизити вартість готової конструкції генератора на 18.1 %, вагу та об'єм магнітопровода на 33.1 %. Варто відмітити, що оптимізація параметрів обмотки якоря та додаткової обмотки підмагнічування в даній роботі не проводилась. Також не проводилась параметрична оптимізація форми та розмірів магнітів, оскільки для розробки даної конструкції генератора використовувались постійні магніти універсальної форми, що доступні на ринку.

Таблиця 2 – результати параметричної оптимізації геометричних параметрів ТМГПМ

Назва змінної	Призначення змінної	Початкове значення змінної	Значення змінної після оптимізації
$\delta$	Величина повітряного проміжку	0.5 мм	1.5 мм
ha	Висота ярма якоря	15 мм	9.9 мм
dp	Регулювання півширини пазів (зубців)	3.1 мм	3.1 мм
hp	Регулювання висоти зубців (глибини пазів)	13 мм	11 мм
hc	Регулювання ширини корпусу	15 мм	9.9 мм
V	Об'єм магнітопровода	21.27·10 <sup>-4</sup> м <sup>3</sup>	16.1·10 <sup>-4</sup> м <sup>3</sup>
m	Розрахункова вага магнітопровода	16.59 кг	12.55 кг
C	Розрахункова вартість матеріалів конструкції	610 \$	499 \$

**Висновки.** Розроблено методологію для параметричної оптимізації геометричних параметрів ТМГПМ. Розроблений алгоритм за умови внесення певних модифікацій можливо використовувати для оптимізації чи розрахунку геометрії будь-якого електромеханічного перетворювача енергії.

В результаті параметричної оптимізації геометрії прототипу ТМГПМ та подвійним статором вдалося зменшити геометричні розміри за рахунок оптимізації величини магнітної індукції на окремих ділянках магнітного осердя досліджуваного генератора.

За рахунок застосування розробленого алгоритму вдалося досягти зменшення вартості, ваги та об'єму магнітопровода досліджуваного генератора на 18.1 %, 24.3% відповідно.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Лихогуб Анна Павлівна (Лихогуб Анна Павловна, Anna Lykhhohub)** – випускниця кафедри електромеханіки Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ; тел.: +380958220519; <https://orcid.org/0000-0002-3380-0050>; e-mail: [anna.lykhhohub@gmail.com](mailto:anna.lykhhohub@gmail.com).

**Коваленко Михайло Анатолійович (Коваленко Михаил Анатольевич, Mykhaylo Kovalenko)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", доцент кафедри електромеханіки, тел.: (067) 656-36-51; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>; e-mail: [kovalenko\\_ma@i.ua](mailto:kovalenko_ma@i.ua).

**Ткачук Ігор Валерійович (Ткачук Игорь Валерьевич, Tkachuk Igor)** – аспірант, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5717-2458>; e-mail: [baja0073@gmail.com](mailto:baja0073@gmail.com).

**Гончарук Антон Олександрович (Гончарук Антон Александрович, Anton Goncharyk)** – магістр кафедри електромеханіки, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"; тел.: (097) 130-88-39; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0553-6931>; e-mail: [honcharukanton.sh@gmail.com](mailto:honcharukanton.sh@gmail.com).

Розроблену методологію можливо використовувати для оптимізації геометрії, розробки нових конструкцій та дослідження фізичних процесів в електромеханічних перетворювачах енергії різноманітної конфігурації.

#### Список літератури

1. L. Video, M. Gabsi "Homopolar and bipolar hybrid excitation synchronous machines" Proc. of Int. Conf on Electric Machines and Drives (IEMDC2005), San Antonio, Texas (USA), May, 2005, pp. 1212-1218.
2. Nobuyula Naoe, "Trial production of a hybrid excitation type synchronous machine," Proc. of Int. Conf on Electric Machines and Drives (IEMDC2001), (France), 2001, pp. 545-547.
3. Sahib Khan, Syed Sabir Hussain Bukhari, Jong-Suk Ro // IEEE Access. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8918177>.
4. Mehmet Recep Minaz, Design and Analysis of a new axial-flux coreless PMSG with three rotors and double stators [Електронний ресурс] / Mehmet Recep Minaz, Mehmet Celebi // Results in Physics 7. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: [https://www.researchgate.net/publication/312273824\\_Design\\_and\\_analysis\\_of\\_a\\_new\\_axial\\_flux\\_coreless\\_PMSG\\_with\\_three\\_rotors\\_and\\_double\\_stators](https://www.researchgate.net/publication/312273824_Design_and_analysis_of_a_new_axial_flux_coreless_PMSG_with_three_rotors_and_double_stators).

#### References (transliterated)

1. L. Video, M. Gabsi. Homopolar and bipolar hybrid excitation synchronous machines. Proc. of Int. Conf on Electric Machines and Drives (IEMDC2005), San Antonio, Texas(USA), May, 2005, pp. 1212-1218.
2. Nobuyula Naoe, "Trial production of a hybrid excitation type synchronous machine," Proc. of Int. Conf on Electric Machines and Drives (IEMDC2001), (France), 2001, pp. 545-547.
3. Sahib Khan, Syed Sabir Hussain Bukhari, Jong-Suk Ro Design and Analysis of a 4-kW Two-Stack Coreless Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine for Low-Speed Applications [Електронний ресурс]. IEEE Access. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8918177>.
4. Mehmet Recep Minaz, Mehmet Celebi Design and Analysis of a new axial-flux coreless PMSG with three rotors and double stators [Електронний ресурс]. Results in Physics 7. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: [https://www.researchgate.net/publication/312273824\\_Design\\_and\\_analysis\\_of\\_a\\_new\\_axial\\_flux\\_coreless\\_PMSG\\_with\\_three\\_rotors\\_and\\_double\\_stators](https://www.researchgate.net/publication/312273824_Design_and_analysis_of_a_new_axial_flux_coreless_PMSG_with_three_rotors_and_double_stators).

*Надійшла (received) 30.04.2021*

***В.В. МИХАЙЛЕНКО, В.А. СВЯТНЕНКО, Ю.М. ЧУНЯК, В.І. БАЧИНСЬКИЙ***

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ У ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З ЧОТИРИЗОННИМ РЕГУЛЮВАННЯМ НАПРУГИ І ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ**

Розроблено нові математичні моделі електромагнітних процесів у трифазних електричних колах напівпровідникових перетворювачів з багатоканальним зонним регулюванням фазних напруг без урахування енергетичних втрат у напівпровідникових комутаторах для швидкої оцінки впливу параметрів навантаження на рівень і форму вихідної напруги. У цій статті проведено аналіз електромагнітних процесів в електричних колах напівпровідниковими з комутаторами. Створено математичну модель для аналізу електромагнітних процесів в напівпровідникових перетворювачах з широтно-імпульсним регулюванням вихідної напруги. Наведено графіки, що відображають електромагнітні процеси у електричних колах. Стаття присвячена розвитку метода багатопараметричних функцій шляхом розробки нових математичних моделей та визначення функцій і алгоритмічних рівнянь для аналізу за підсистемними складовими електромагнітних процесів у розгалужених електричних колах з напівпровідниковими комутаторами і ланками з синусоїдальними, постійними і імпульсними напругами. Напівпровідникові комутатори можуть виконувати високочастотне зміння структури електричних кіл і широтно-імпульсну модуляцію фазних і лінійних напруг трифазної мережі електроживлення, виконуючи регулювання вихідних напруг напівпровідникових перетворювачів параметрів електричної енергії.

**Ключові слова:** електромагнітні процеси; вихідні напруга та струм; двигун постійного струму; метод багатопараметричних модулюючих функцій.

***В.В. МИХАЙЛЕНКО, В.А. СВЯТНЕНКО, Ю.М. ЧУНЯК, В.И. БАЧИНСКИЙ***

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ С ЧЕТИРЕЗОННЫМ РЕГУЛИВАНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ**

Разработано новые математические модели электромагнитных процессов в трехфазных электрических цепях полупроводниковых преобразователей с многоканальным зонным регулированием фазных напряжений без учета потерь в полупроводниковых коммутаторах для быстрой оценки влияния параметров нагрузки на уровень и форму выходного напряжения. В этой статье проведен анализ электромагнитных процессов в электрических цепях с полупроводниковыми коммутаторами. Создана математическая модель для анализа электромагнитных процессов в полупроводниковых преобразователях с широтно-импульсным регулированием выходного напряжения. Приведены графики, которые показывают электромагнитные процессы в электрических цепях. Статья посвящена развитию метода многопараметрических функций путем разработки новых математических моделей и определения функций и алгоритмических уравнений для анализа подсистемы составляющим электромагнитных процессов в разветвленных электрических цепях с полупроводниковыми коммутаторами и звеньями с синусоидальными, постоянными и импульсными напряжениями. Полупроводниковые коммутаторы могут выполнять высокочастотное изменение структуры электрических цепей и широтно-импульсную модуляцию фазных и линейных напряжений трехфазной сети электропитания, выполняя регулирование выходных напряжений полупроводниковых преобразователей параметров электрической энергии.

**Ключевые слова:** электромагнитные процессы; выходные напряжение и ток; двигатель постоянного тока; метод многопараметрических модулирующих функций.

***V.V. MYKHAILENKO, V.A. SVIATNENKO, J.M. CHUNIAK, V.I. BACHYNSKIY***

### **RESEARCH OF PROCESSES IN A CONVERTER WITH FOUR-ZONE VOLTAGE REGULATION AND ELECTROMECHANICAL LOAD**

The new mathematical models of the electromagnetic processes is designed in three-phase electric circuit of the semiconductor converters with many-server zoned regulation phases voltages disregarding losses in semiconductor commutator for quick estimation of the influence parameter loads on level and form of the output voltage. mathematical model of the semiconductor converter is also used for study of the connecting processes in semiconductor converter with actively-inductive load. Will develop the method multivariable function, what fall into algorithmic equations of the analysis formed and connecting processes in furcated electric circuit with semiconductor commutator and reactive element, toward account of the particularities of the use phase and linear voltages to network of the power supply. Analysis of the electromagnetic processes is organized beside this article in electric circuit with semiconductor commutator. Mathematical model is created for analysis electro-magnetic processes in semiconductor converter with width pulsed regulation of the output voltage. The broughted graphs, which reflect the electromagnetic processes in electric circuit. Method much parametric functions was used when performing calculation. The mathematical model of the converter is created for eleven zoned regulations of the output voltage. Article is devoted to the development of a method of multi-parametric modulating functions by means of working out of new mathematical models and definition of functions and the algorithmic equations for the analysis on sub-system components of electromagnetic processes in electric circuits of variable structure with sinusoidal, direct and pulsing voltage. Introduction of functions with discrete parameters in the algorithmic equations for analysis of processes in circuits with semiconductor commutators simplifies modeling on subsystem components. The mathematical model of steady-state processes and transients in electric circuits of semiconductor converters of modulation type with multi-channel zonal use of phase and line voltages of a three-phase network of power supplies is developed. The mathematical model of electric circuits of thyristor shapers of electro-discharge pulses for the analysis and the matching of capacitors charging modes with decrease several times of electric resistance of technological load is also created.

**Key words:** electromagnetic processes; the output voltage and current; the engine of the direct current; method multivariable modulating function.

**Вступ.** Перетворення електричної енергії, дозволяє використовувати в перетворювальних установках ланку високої частоти з частотою переключення вентилів значно більшої від частоти змінної напруги промислової мережі [1-10]. У роботах [1-4] показана доцільність використання структур перетворювачів частоти (ПЧ) з однократною модуляцією при побудові систем вторинного електропостачання для

комплексів діагностики електромеханічних пристроїв із різноманітним видом вхідної енергії. У даній роботі проводиться аналіз аспекту використання тієї ж структури ПЧ для електромеханічних комплексів із широтно-імпульсним регулюванням (ШІР) постійної напруги при чотиризонному керуванні.

**Метою роботи** є аналіз електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими

перетворювачами і розробка математичної моделі перетворювача з електромеханічним навантаженням.

**Аналіз електромагнітних процесів.** Узагальнена структурна схема перетворювача показана на рис. 1. На структурній схемі позначені: СМА, СМВ, СМС – силові модулятори (СМ) фазних А, В і С відповідно, ВВ – високочастотний випрямляч, Н – навантаження; D – двигун постійного струму. Сукупність СМ, підключених до енергетичної мережі паралельно і з’єднаних по виходу послідовно, представляє собою ланку високої частоти перетворювача.

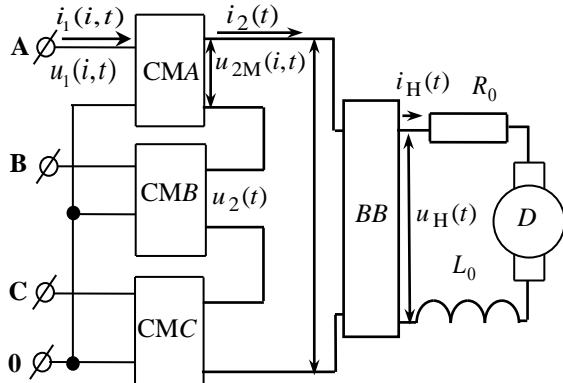


Рис. 1. Структурна схема НПП

Аналіз техніко-економічних показників різного виду виконавчих елементів слідкуючих систем на основі високомоментних двигунів постійного струму (ДПС) серій 2П та ПВ і трифазних асинхронних двигунів серії 4А, які випускаються промисловістю серійно [4], показують, що за умови однакових показників за масою та габаритами в діапазоні потужностей від 100 Вт до 500 кВт, у слідкуючих системах доцільніше використовувати ДПС.

При складанні математичної моделі перетворювача з комп’ютерною орієнтацією її застосування використаємо метод багатопараметричних модулюючих функцій [5], який передбачає попереднє представлення алгоритмічного рівняння перетворювача. При цьому приймемо такі припущення: вхідна енергетична мережа симетрична і її внутрішній опір дорівнює нулю, транзистори і діоди інверторів випрямленої напруги (ІВН) представляються ідеальними ключами, узгоджувальні трансформатори в кожній з зон регулювання вихідної напруги не мають втрат.

Проведення системного аналізу електромагнітних процесів у модуляційному НПП з багатозонним регулюванням вихідної напруги з навантаженням у вигляді ДПС з послідовним збудженням, з урахуванням таких ознак системного підходу до аналізу [4], як цілісність та вплив під час її руху зовнішніх і внутрішніх факторів.

Напругу на навантаженні НПП знаходимо з виразу виду

$$u_H(t) = \frac{1}{k_T} \sum_{n=1}^{N=4} \sum_{i=1}^3 u_1(i,t) \psi_B(i,t) \psi(n,N,t) \psi_{ВВ}(t), \quad (1)$$

де  $u_1(i, t)$  – миттєві значення фазних напруг мережі,  $\psi_B(i, t)$  – функції прямокутного синуса, що співпадають за часом з положенням відповідних фазних напруг.  $N = 1, 2, \dots, N = 4$  – номери зон регулювання;

$\psi(n, N, t)$  – множина еквівалентних модулюючих впливів  $i$ -х інверторів СМ;  $\psi_{ВВ}(t)$  – функція прямокутного синуса, що співпадає за часом з положенням напруги  $u_2(t)$ ;  $k_T$  – коефіцієнт трансформації.

ДПС, що задає вихідний струм НПП, описується системою алгебраїчних рівнянь [4]

$$\begin{pmatrix} i_{H_{k+1}}(t) \\ n_{k+1}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_{H_k}(t) + \frac{2(c(t) - \epsilon_{ch})}{a_1} - \frac{2\epsilon_a}{a_1} i_{H_k}(t) - \\ - \frac{2}{a_1} n_k(t) i_{H_k}(t) - \frac{2}{a_1 a_3} i_{H_k}^3(t); \\ n_k(t) + \frac{4(c(t) - \epsilon_{ch}) i_{H_k}(t)}{a_1 a_3} - \frac{2\epsilon_M}{a_3} n_k(t) + \\ + \frac{2}{a_3} i_{H_k}^2(t) - \frac{2}{a_1 a_3} i_{H_k}^2(t) n_k(t) - \frac{2\epsilon_{M0}}{a_3} \end{pmatrix} \quad (2)$$

де  $i_{H_k}(t)$ ,  $i_{H_{k+1}}(t)$ ,  $n_k(t)$ ,  $n_{k+1}(t)$  – струм якоря та кутова швидкість обертання ДПС на  $k$ -ому та в  $k+1$ -ому інтервалі відповідно;  $\epsilon_{ch}$ ,  $\epsilon_a$  – відносні падіння напруги на щітках і обмотці якоря;  $\epsilon_M$ ,  $\epsilon_{M0}$  – відносні моменти опору на валу;  $c(t) = \frac{u_H(t)}{E}$  – відносне значення напруги на якорі;  $u_H(t)$  та  $E$  – відповідно миттєві значення вихідної напруги НПП та проти ЕРС;  $a_1 = \epsilon_a + \frac{2T_{ab}}{\Delta t}$ ,  $a_3 = \epsilon_M + \frac{2T_M}{\Delta t}$ ;  $T_{ab}$  та  $T_M$  – електромагнітна та механічна постійні часу двигуна,  $\Delta t$  – інтервали часу, за якими проводяться розрахунки.

Система (2) вирішується за допомогою методу припасовування з попереднім записом початкових умов при  $t = 0$  та припущеннями відносно лінійної залежності моменту опору на валу двигуна від швидкості обертання [3] і лінеаризованої кривої намагнічування.

Діаграми струмів кола якоря ДПС для випадку чотиризонного регулювання вихідної напруги НПП наведені на рис. 2. Крива 1 відображає струм кола якоря в процесі пуску ДПС під дією максимальної величини напруги (3), а крива 2 – струм кола якоря в процесі пуску ДПС під дією напруги (3) з чотиризонним широтно-імпульсним регулюванням (ШІР) за лінійним законом.

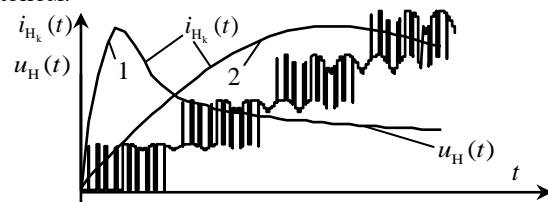


Рис. 2. Діаграми струмів кола якоря ДПС

Вихідний струм  $i_2(t)$  знаходимо з співвідношення

$$i_2(t) = i_{H_k}(t) \psi_{ВВ}(t). \quad (3)$$

Вхідні струми  $i_1(n, i, t)$  знаходимо з виразу

$$i_1(n, i, t) = \frac{i_2(t) \psi_B(i,t) \psi(n,N,t)}{k_T}, \quad (4)$$

Для визначення струмів  $i$ -х фаз мережі у всьому діапазоні регулювання вихідної напруги НПП підсумуємо вхідні струми ІВН, що беруть участь у процесі регулювання вихідної напруги в кожній з  $i$ -ї фази.



Загальний вираз для струмів  $i$ -х фаз мережі подамо у вигляді

$$i_1(i, t) = i_1(1, i, t) + i_1(2, i, t) + \dots + i_1(N, i, t), \quad (5)$$

де  $i_1(1, i, t)$ ,  $i_1(2, i, t)$ ,  $i_1(N, i, t)$  – вхідні струми інверторів  $i$ -х фаз на інтервалах першої, другої, та  $N = 4$ -ї зони регулювання.

Діаграми вхідних струмів та напруг, побудовані за (5), представлені на рис. 3.

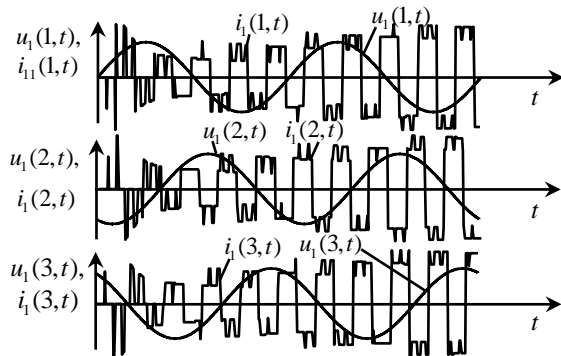


Рис. 3. Діаграми вхідних струмів  $i$ -х фаз мережі в координатах фазних напруг

**Висновки за результатами дослідження.** У цій роботі було виконано аналіз електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими перетворювачами. Було створено нові математичні моделі напівпровідникових перетворювачів з високочастотним широтноімпульсним регулюванням їх вихідної напруги при зміні параметрів навантаження в широких межах, які дозволили підвищити швидкодію електротехнологічних систем.

#### Список літератури

- 1 Макаренко М. П., Сенько В. І., Юрченко М. М. Системний аналіз електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах електроенергії модуляційного типу, К.: НАН України, ІЕД, 2005, 241 с.
- 2 Ivashchenko D.S., Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Analyzing Probabilistic Properties of Electrical Characteristics in the Circuits Containing Stochastic Load. *Proc. IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems IEPS-2016*. Kyiv, Ukraine, June 7–11, 2016. Pp. 45–48. DOI: 10.1109/IEPS.2016.7521887.
- 3 Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Electric Energy Loss at Energy Exchange Between Capacitors as Function of Their Initial Voltages and Capacitances Ratio. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 3. С. 9–11. DOI: <https://doi.org/10.15404/techned2016.03.009>
- 4 Nguyen P.K., Lee K.H., Kim S.I., Ahn K.A., Chen L.H., Lee S.M., Chen R.K., Jin S., Berkowitz A.E. Spark Erosion: a High Production Rate Method for Producing Bi<sub>0.5</sub>Sb<sub>1.5</sub>Te<sub>3</sub> Nanoparticles With Enhanced Thermoelectric Performance. *Nanotechnology*. 2012. Vol. 23. Pp. 415604-1 – 415604-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/23/41/415604>
- 5 Nguyen, P.K., Sungho J., Berkowitz A.E. MnBi particles with high energy density made by spark erosion. *J. Appl. Phys.* 2014. Vol. 115. Iss. 17. Pp. 17A756-1. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4868330>

- 6 Mykhailenko V.V.; Buryan S.O.; Maslova T.B.; Mikhnenko G.E.; J.M Chunyk; Tcharniak O.S. Study of Electromagnetic Processes in the Twelve-Pulse Converter with Eight-Zone Regulation of Output Voltage and Electromechanical Load. *Proc. 6th IEEE International Conference on. on Energy Smart Systems ESS-2019*. Kyiv, Ukraine, April 17–19, 2019. Pp. 43–46. DOI: 10.1109/ESS.2019.8764227.
- 7 Hossein Hojabri, Hossein Mokhtari and Luichen Chang. A Generalized Technique of Modeling, Analysis, and Control of a Matrix Converter Using SVD, *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, 2011, vol. 58, no. 3, pp. 949–959.
- 8 Hossein Hojabri, Hossein Mokhtari and Luichen Chang. Reactive power control permanent-magnet synchronous wind generator with matrix converter, *IEEE Trans. On Power Delivery*, vol. 28, no. 2, pp. 575–584.
- 9 Zarri, L., Mengoni, M., Toni, A. and Ojo, J.O. Range of the linear modulational in matrix converters, *IEEE Trans. On Power Electronics*, 2014, vol. 29, no. 6, pp. 3166-3178.

#### References (transliterated)

- 1 Makarenko N.P., Senko V.I., Yurchenko N.N. Systemnyi analiz elektromagnitnykh protsesiv u napivprovodnykovykh peretvoruvachah elektronergii modulatsiynogo typu [System analysis of electromagnetic processes in semiconductor converters of modulation type electricity], Kyiv.: National Academy of Science of Ukraine, Electrodynamics Institute, 2005, 241 p. [in Ukrainian].
- 2 Ivashchenko D.S., Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Analyzing Probabilistic Properties of Electrical Characteristics in the Circuits Containing Stochastic Load. *Proc. IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems IEPS-2016*. Kyiv, Ukraine, June 7–11, 2016. Pp. 45–48. DOI: 10.1109/IEPS.2016.7521887.
- 3 Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Electric Energy Loss at Energy Exchange Between Capacitors as Function of Their Initial Voltages and Capacitances Ratio. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 3. Pp. 9–11. DOI: <https://doi.org/10.15404/techned2016.03.009>
- 4 Nguyen P.K., Lee K.H., Kim S.I., Ahn K.A., Chen L.H., Lee S.M., Chen R.K., Jin S., Berkowitz A.E. Spark Erosion: a High Production Rate Method for Producing Bi<sub>0.5</sub>Sb<sub>1.5</sub>Te<sub>3</sub> Nanoparticles With Enhanced Thermoelectric Performance. *Nanotechnology*. 2012. Vol. 23. Pp. 415604-1 – 415604-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/23/41/415604>.
- 5 Nguyen, P.K., Sungho J., Berkowitz A.E. MnBi particles with high energy density made by spark erosion. *J. Appl. Phys.* 2014. Vol. 115. Iss. 17. Pp. 17A756-1. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4868330>.
- 6 Mykhailenko V.V.; Buryan S.O.; Maslova T.B.; Mikhnenko G.E.; J.M Chunyk; Tcharniak O.S. Study of Electromagnetic Processes in the Twelve-Pulse Converter with Eight-Zone Regulation of Output Voltage and Electromechanical Load. *Proc. 6th IEEE International Conference on. on Energy Smart Systems ESS-2019*. Kyiv, Ukraine, April 17–19, 2019. Pp. 43–46. DOI: 10.1109/ESS.2019.8764227.
- 7 Hossein Hojabri, Hossein Mokhtari and Luichen Chang. A Generalized Technique of Modeling, Analysis, and Control of a Matrix Converter Using SVD, *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, 2011, vol. 58, no. 3, pp. 949–959.
- 8 Hossein Hojabri, Hossein Mokhtari and Luichen Chang. Reactive power control permanent-magnet synchronous wind generator with matrix converter, *IEEE Trans. On Power Delivery*, vol. 28, no. 2, pp. 575–584.
- 9 Zarri, L., Mengoni, M., Toni, A. and Ojo, J.O. Range of the linear modulational in matrix converters, *IEEE Trans. On Power Electronics*, 2014, vol. 29, no. 6, pp. 3166-3178.

Поступила (received) 28.04.21

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Гребеніков Віктор Володимирович (Гребеников Виктор Владимирович, Grebenikov Viktor Vladimirovich)** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут електродинаміки Національної академії наук України, провідний науковий співробітник, тел. (067)441-73-72; e-mail: [elml153@gmail.com](mailto:elml153@gmail.com)

**Гамалія Ростислав Віталійович (Гамалея Ростислав Витальевич, Gamaliia Rostyslav Vitaliyovich)** – кандидат фізико-математичних наук, Інститут електродинаміки Національної академії наук України, старший науковий співробітник, тел. (067) 763-18-54; e-mail: [rgamaleya@gmail.com](mailto:rgamaleya@gmail.com)

**Попков Володимир Сергійович (Попков Владимир Сергеевич, Popkov Vladimir Sergeevich)** – Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАНУ, інженер, тел. (067) 440-13-05; e-mail: [popkov2018@ukr.net](mailto:popkov2018@ukr.net)

*I.V. ТКАЧУК, М.А. КОВАЛЕНКО*

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕДУКТОРЫ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В данный час из-за подорожания электроэнергетики ветрогенераторы малой мощности (1-5 кВт) часто используются для обеспечения потребителей электроэнергией. В этом случае используются ветрогенераторы как с горизонтальной, так и с вертикальной осями вращения, частота вращения которых при средней скорости ветра  $V = 5 \div 10$  м/с и достаточно низкой и составляет примерно  $n = 100 - 300$  об/мин. Низкоскоростной электрогенератор для ветрогенератора с такой скоростью вращения с прямым подключением вала ветрового ротора и электрогенератора имеет большое количество полюсов и достигает достаточно больших размеров. Поэтому увеличительные редукторы (мультиплексоры) часто используются и позволяют увеличить скорость вращения электрического генератора в несколько раз и, тем самым, уменьшить массу его активной части, поскольку электромагнитный момент пропорционален объему электрической машины. Однако механические коробки передач являются источником дополнительного шума, требуют довольно частого обслуживания и уменьшают долговечность ветрогенератора. В данной статье будут использованы редукторы на постоянных магнитах для ветрогенераторов, которые в отличие от механических редукторов, не создают дополнительных шумов, не требуют смазки, их долговечность выше, эксплуатационные расходы также значительно уменьшаются, тогда как магнитный редуктор можно интегрировать с электрическим генератором. Например, при мощности ветрового ротора  $P = 4$  кВт и частоте вращения  $n = 100-300$  об/мин, высокоскоростной электрический генератор и магнитный редуктор имеют примерно в 2 раза меньшую общую массу магнитов и в 1,7 раза меньше общую массу активных материалов (магнитный редуктор + электрический генератор), чем низко скоростной многополюсный внешний электрогенератор. Целью исследования является разработка и внедрение электромагнитного редуктора в электромеханических системах. Основой таких систем являются высококоэрцитивные магниты.

Для достижения этой цели ставят следующие задачи:

- литературно-патентный поиск по теме исследования;
- выбор прототипа магнитного редуктора и расчет его основных параметров;
- разработка графических и численных моделей для оценки эффективности разработанного прототипа;
- оптимизация конструкции магнитного редуктора;
- разработка системы преобразования механической энергии с низким потенциалом в электрическую;
- прототипирование и экспериментальные исследования системы преобразования механической энергии с низким потенциалом в электрическую.

**Ключевые слова:** магнитный редуктор, электромагнитный редуктор, высококоэрцитивные, низко потенциалные, мультиплексоры, ветрогенератор.

*I.V. ТКАЧУК, М.А. КОВАЛЕНКО*

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕДУКТОРЫ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В настоящее время из-за подорожания электроэнергии ветрогенераторы малой мощности (1-5 кВт) часто используются для снабжения потребителей электроэнергией. В этом случае используются ветрогенераторы как с горизонтальной, так и с вертикальной осями вращения, частота вращения которых при средней скорости ветра  $V = 5 \div 10$  м/с и достаточно низкой и составляет примерно  $n = 100 - 300$  об/мин. Низкоскоростной электрогенератор для ветрогенератора с такой скоростью вращения с прямым подключением вала ветрового ротора и электрогенератора имеет большое количество полюсов и достигает достаточно больших размеров. Поэтому увеличительные редукторы (мультиплексоры) часто используются и позволяют увеличить скорость вращения электрического генератора в несколько раз и, тем самым, уменьшить массу его активной части, поскольку электромагнитный момент пропорционален объему электрической машины. Однако механические коробки передач являются источником дополнительного шума, требуют довольно частого обслуживания и уменьшают долговечность ветрогенератора. В данной статье будут использованы редукторы на постоянных магнитах для ветрогенераторов, которые в отличие от механических редукторов, не создают дополнительных шумов, не требуют смазки, их долговечность выше, эксплуатационные расходы также значительно уменьшаются, тогда как магнитный редуктор можно интегрировать с электрическим генератором. Например, при мощности ветрового ротора  $P = 4$  кВт и частоте вращения  $n = 100-300$  об/мин, высокоскоростной электрический генератор и магнитный редуктор имеют примерно в 2 раза меньшую общую массу магнитов и в 1,7 раза меньше общую массу активных материалов (магнитный редуктор + электрический генератор), чем низко скоростной многополюсный внешний электрогенератор. Целью исследования является разработка и внедрение электромагнитного редуктора в электромеханических системах. Основой таких систем является высококоэрцитивные магниты.

Для достижения этой цели ставят следующие задачи:

- литературно-патентный поиск по теме исследования;
- выбор прототипа магнитного редуктора и расчет его основных параметров;
- разработка графических и численных моделей для оценки эффективности разработанного прототипа;
- оптимизация конструкции магнитного редуктора;
- разработка системы преобразования механической энергии с низким потенциалом в электрическую;
- прототипирование и экспериментальные исследования системы преобразования механической энергии с низким потенциалом в электрическую.

**Ключевые слова:** редуктор магнитный, редуктор электромагнитный, высоковольтный, низкочастотный, мультиплексоры, ветрогенератор.

*I.V. ТКАЧУК, М.А. КОВАЛЕНКО*

## ELECTROMAGNETIC REDUCERS IN ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

Currently, due to the rising cost of electricity, low-power wind turbines (1-5 kW) are often used to supply consumers with electricity. In this case, wind turbines are used with both horizontal and vertical axes of rotation, the speed of which at an average wind speed  $V = 5 \div 10$  m/s and is quite low, and is approximately  $n = 100 - 300$  rpm. A low-speed electric generator for a wind generator with such a speed of rotation with a direct connection of the wind rotor shaft and the electric generator has a large number of poles and reaches a fairly large size. Therefore, magnifying gears (multi-plexers) are often used and can increase the speed of the electric generator several times and, thus, reduce the mass of its active part, because the electromagnetic moment is proportional to the volume of the electric machine. However, manual transmissions are a source of additional noise, require frequent maintenance and reduce the durability of the wind turbine. This article will use permanent magnet reducers for wind turbines, which, unlike mechanical reducers, do not create additional noise, do not require lubrication, their durability is higher, operating costs are also significantly

© I.V. Tkachuk, M.A. Kovalenko, 2021

reduced, while the magnetic reducer can be integrated with an electric generator. at a wind rotor power  $P = 4$  kW and speed  $n = 100-300$  rpm, high-speed electric generator and magnetic reducer have approximately 2 times less total weight of magnets and 1.7 times less total weight of active materials (magnetic reducer + electric generator) than a low-speed multipole external generator. The aim of the study is to develop and implement an electromagnetic reducer in electromechanical systems. The basis of such systems are high-coercive magnets.

To achieve this goal, the following tasks are set:

- literary-patent search on the research topic;
- selection of a prototype of a magnetic reducer and calculation of its main parameters;
- development of graphical and numerical models to evaluate the effectiveness of the developed prototype;
- optimization of the design of the magnetic reducer;
- development of a system for converting mechanical energy with low potential into electricity;
- prototyping and experimental studies of the system of conversion of mechanical energy with low potential into electrical energy.

**Key words:** magnetic gear, electromagnetic reducer, high-coercive, low-potential, multiplexers, exhaust generator.

**Вступ.** Магнітні редуктори представляли інтерес з початку 20 століття, причому найперші конструкції були дуже простими для звичайних механічних зубчастих коліс із зубцями шестерні, замінені на магнітні аналоги [1, 2]. Однак цим конструкціям приділялося мало уваги, швидше за все, через низьку щільність крутного моменту, досягнуту внаслідок наявних на той час матеріалів з постійними магнітами (ПМ) (а

саме SmCo5). Новий інтерес виник у 1980-х роках з розробкою магнітного матеріалу з неодимового бору заліза (NdFeB), хоча конструкції все ще залежать від прямого механічного заміщення, що призводить до поганого використання ПМ і ніколи не досягає щільності крутного моменту, достатньої для конкуренції з традиційними механічними альтернативами. [3, 4]

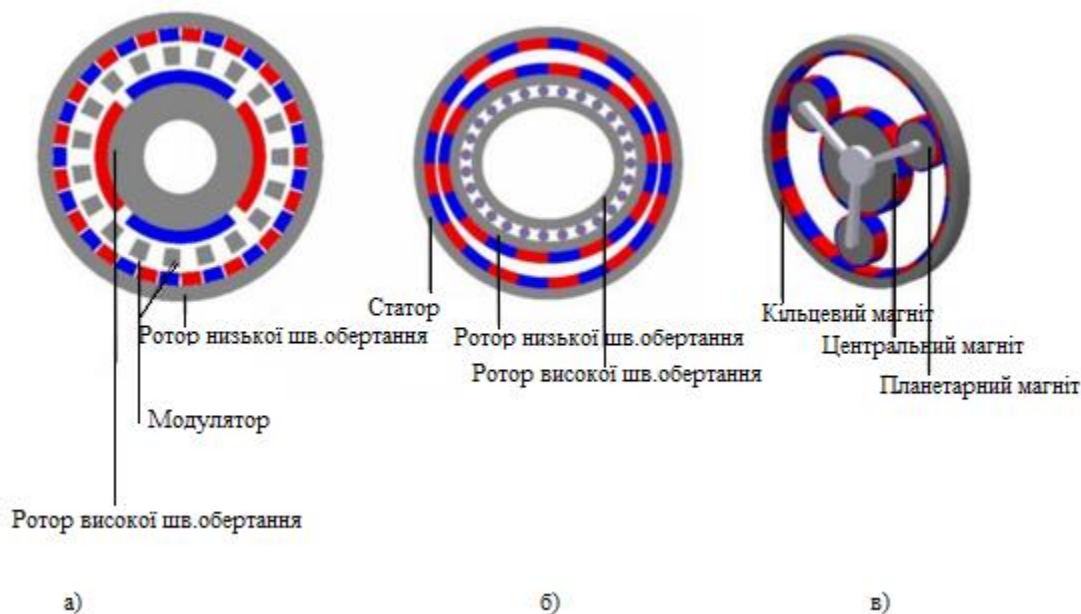


Рис. 1. а) Концентричний б) Гармонічний в) Планетарний магнітний редуктор [5]

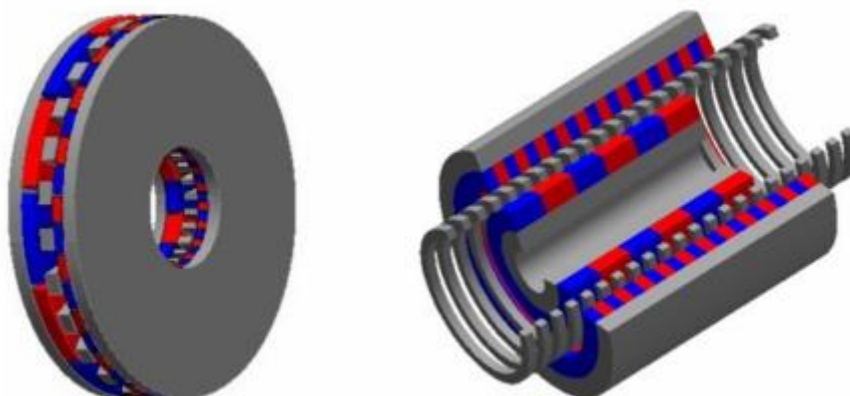


Рис. 2. Топології магнітних редукторів дискового типу та лінійного типу [5]

На момент переходу століть магнітні редуктори поділяються на три типи, які вважаються сучасними, оскільки мають щільність крутного моменту, порівнянну з щільністю звичайних механізмів ( $50-150$  кНм/м<sup>3</sup> для гвинтової передачі та  $100-200$  кНм/м<sup>3</sup> ци-

ліндрична передача). Це поля, модульовані потоком магнітного редуктора, гармонічні передачі та магнітні планетарні передачі, як показано на рис. 1.

**Актуальність.** В техніці та природних стихіях зустрічається велика кількість джерел низькопотенцій-

ної механічної енергії. Для її освоєння доцільно використовувати підвищуючі редуктори (мультиплікатори), що дозволяють збільшити швидкість обертання електричного генератора в кілька разів і, тим самим, зменшити масу його активної частини. Використання тихохідних електрогенераторів супроводжується значним збільшенням геометричних розмірів та кількості пар полюсів. Питома потужність таких генераторів має досить невелику величину.

Збільшити швидкість обертання ротора електрогенератора (а отже і підвищити його питому потужність) можливо за рахунок застосування мультиплікаторів, спеціальних ремінних передач або за рахунок використання магнітних редукторів. Актуальним напрямком є аналіз сучасних варіантів конструктивних виконань магнітних редукторів та вибір найбільш перспективних для подальших наукових досліджень та прототипів для практичної реалізації.

Редуктори на постійних магнітах (або магнітні редуктори) мають ряд переваг в порівнянні із механічними редукторами, а саме: вони не створюють додаткові шуми; не потребують змащення та регулярного технічного огляду; більш довговічні; мають нижчі експлуатаційні витрати; можливість інтеграції (гібридизації) із електрогенератором.

Хоча вони вважаються провідними моделями, інші конструкції знаходяться в стадії розробки, а також спеціальна, зроблена для недавньої розробки Дейва Роджерса та ін. [6], яка станом на 2015 р. розроблена версія звичайної черв'ячної та колісної трансмісії з гвинтовим магнітним розташуванням. Експерименти показали, що потенційне передавальне відношення перевищує 100:1, а напруженість в повітряному зазорі знаходиться в межах 485 кНм/м<sup>2</sup>. Було досягнуто успіху як в комп'ютерному моделюванні, так і в прототипній демонстрації, потрібна більш нова технологія для подальшої перевірки та демонстрації роботи.

Крім того, як черв'ячний редуктор, велика напруга зсуву буде локалізована на невеликій частині машини, а використання загального телевізійного матеріалу буде низьким. Гармонічна шестерня [7] показала дуже перспективні щільності крутного моменту в межах 150 кНм/м<sup>3</sup>. Незважаючи на свою привабливість завдяки своїй щільності крутного моменту, високим передавальним відношенням і плавній передачі крутного моменту, її важко спроектувати, і вона покладається на гнучкий низько швидкісний ротор для створення змінних у часі синусоїдальних змін в магнітному полі в повітряному зазорі між роторами. Передавальне відношення гармонічної передачі при  $p_l$  і  $p_w$  кількість полюсів на низько швидкісному роторі та кількість синусоїдальних циклів між низько швидкісним ротором та статором відповідно, а  $k$  являє собою різні асинхронні гармоніки, які пов'язані з кожною гармонікою магнітного поля постійних магнітів.

У 2001 р. Аталла та Хоу [8] запропонували провідну конструкцію для магнітних редукторів - концентричного магнітного редуктора. Хоча подібну конструкцію можна побачити у патенті Т.Г. Мартіна 1968 р. "Магнітна передача" [9], саме в роботі Аталли та Хоу були продемонстровані високі крутні можливості конструкції. Концентричні магнітні редуктори вико-

ристовують сегменти феромагнітних полюсів у повітряному зазорі між роторами для модуляції магнітного потоку, активного між роторами. Ця конструкція дозволила повною мірою використовувати весь матеріал постійних магнітів та призвела до високої щільності крутного моменту в діапазоні 70–150 кНм/м<sup>3</sup> при порівняно простій конструкції. Крім того, пропонуючи концентричний магнітний редуктор, Аталла продемонстрував дві інші форми цього магнітного редуктора, лінійну та осьову моделі поля [10, 11], як показано на рис. 2. Ця пристосованість робить конструкцію особливо корисною в морській енергетиці, де існує ряд залежно від того, як пристрій взаємодіє з припливними хвилями або припливними течіями. Існує два режими роботи з цим типом магнітного редуктора. Або феромагнітні полюси утримуються нерухомо, і зовнішньому та внутрішньому магнітному роторам дозволяється обертатися, або феромагнітним полюсам дозволяється обертатися одним з інших обертових роторів. Режими впливають на можливе передавальне число та напрямок обертання.

Також сфера застосування магнітних редукторів включає відносно нові концепції з поворотним типом, які працюють подібно до концепції механічних свинцевих гвинтів при перетворенні лінійного руху в обертальний із заміною різьбою на магнітному матеріалі (рис. 3). Ця форма магнітного редуктора дуже застосовна до хвильової енергії, оскільки типово низько швидкісний лінійний рух, скажімо, хвилеподібного перетворювача енергії буя не тільки збільшить швидкість, але може також дозволити більш традиційній електричній машині бути застосованою.

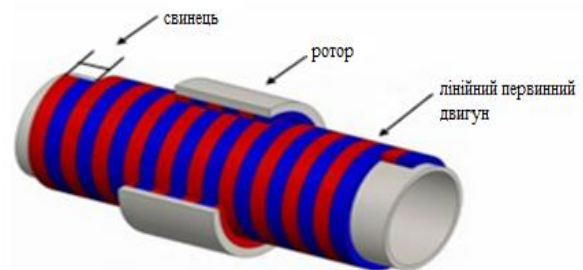


Рис. 3. Магнітний свинцевий гвинт

Хоча патент на магнітний гвинтовий пристрій був зареєстрований у 1997 р. [12], він був представлений у 2011 р. [13] були детально проаналізовані можливості високої щільності сили магнітного свинцевого гвинта. За допомогою цього аналізу було встановлено, що щільність сили тяги, що перевищує 10 МН/м<sup>3</sup>, можлива в моделях із зазорами повітря в діапазоні від 0,4 до 0,8 мм зі свинцем ( $\lambda$ ) > 7 мм. Завдяки цій функції, створеній у 2012 році, Пакделян та ін. [14] розробив цю концепцію, розробивши співвідношення швидкість-крутний момент, і конструкція та масштабування такого пристрою тепер зменшують навантаження магнітного редуктора. Тут передавальне число встановлюється як відношення кутової швидкості ротора до лінійної швидкості перетворювача  $\omega$  (рад/с) та  $V$  (м/с) відповідно.

Хоча даний тип має великий потенціал у гідро та вітроенергетиці, потреба у великій кількості магнітного матеріалу на лінійному переключачі робить пристрої дорогими. У нещодавній роботі [15] була розроблена та проаналізована нова свинцево-гвинтова передача з магнітною передачею, яка поєднує принципи лінійного магнітного редуктора та циліндричного.

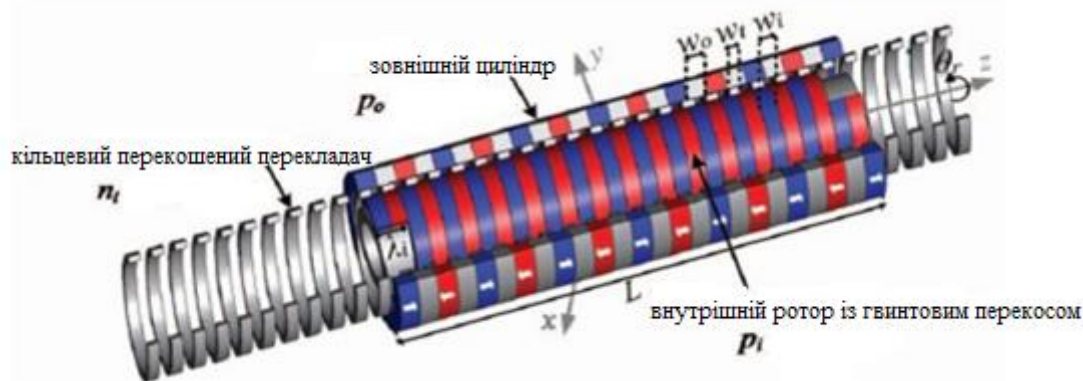


Рис.4. Свинцевий гвинт магнітного редуктора

На основі основних концепцій була проведена подальша робота щодо вдосконалення функціональності магнітного редуктора, головним досягненням якої є розробка конструкцій змінних передавальних відношень. Це потенційно важлива подія у застосуванні енергетичних технологій, оскільки морські та вітрові стани часто можуть сильно відрізнятися, а здатність змінювати передавальні числа забезпечує конструкторам більше контролю, наприклад, підтримання оптимальних швидкостей генератора з різних входів. Як уже зазначалося, планетарний тип магнітного редуктора здатний здійснювати три режими переходу [16], але була проведена подальша робота, щоб дозволити аналогічну адаптацію концентричного типу магнітного редуктора [17]. Принцип дії полягає в тому, що в типовій конструкції циліндричного магнітного редуктора, замість нерухомого ротора, дозволяється обертатися так, що швидкість зміни магнітного поля, яке бачать інші два ротори, регулюється до заданого співвідношення діапазонів. Ця концепція додатково вивчається з точки зору топології та застосування, а також використання не рідкісноземельних магнітів з можливістю зміни полюсів [18].

Останнім часом найбільший інтерес проявляється до конструкцій з використанням рідкісноземельних постійних магнітів типу NdFeB. Дані магніти володіють великим значенням коерцитивної сили, тому в конструкціях магніти мають геометрію з малою висотою магніту в порівнянні з шириною. Однак використання постійних магнітів неможливо в разі передачі великих потужностей. Постійні магніти великих розмірів складні у виготовленні і експлуатації. У цьому випадку використовується електромагнітне збудження. У таблиці 1 наведено об'ємна щільність переданого моменту різних варіантів магнітних і механічних передавальних механізмів. Видно що найбільший інтерес представляють магнітний співвісно-циліндричний, циклоїдальний редуктор і електродвигун з вбудованим магнітним редуктором. Дані редук-

Конструкція складається з трьох основних секцій: внутрішнього ротора зі спірально перекошеними, радіально намагніченими парами полюсів ( $p_i$ ), зовнішньої циліндричної конструкції, що складається з магнітних елементів, розташованих зі сталевими сегментами, що фокусують потік, і перетворювача з феромагнітних кільцевих скосів. ( $n_i$ ) (рис. 4).

тори мають найбільше значення об'ємної щільності моменту, порівнянне з характеристиками механічних передавальних пристроїв.

Таблиця 1 – Густина моменту різних передавальних пристроїв

Магнітний передавальний пристрій або електрична машина	Об'ємна щільність моменту, $\text{Н} \cdot \text{м} / \text{л}$	ККД, %
Черв'ячний редуктор	2	80-92
Прямокубний циліндричний редуктор	10-20	85-95
Синхронний електродвигун з постійними магнітами (повітряне охолодження)	20	92-98
Синхронний електродвигун з постійними магнітами (Рідинне охолодження)	30-80	87-95
Двоступеневий циклоїдальний редуктор (велике передавальне число)	75	н/д
Магнітний планетарний редуктор	45-90	н/д
Магнітний співвісно-циліндричний редуктор	70-100	80-95
Електродвигун з вбудованим магнітним редуктором	60-130	н/д
Циклоїдальний редуктор (один ступінь)	140-180	н/д

**Висновки.** Використання сучасних джерел магнітного поля (рідкоземельні постійні магніти), раціональне проектування магнітної системи за допомогою сучасних засобів комп'ютерного моделювання (методи кінцевих елементів, методи граничних елементів) дозволяють отримати конструкції магнітних передавальних механізмів з високими масогабаритними показниками, порівнянними з показниками механічних передач. При цьому магнітні передачі володіють такими достоїнствами, як безконтактність, малі шуми, збільшений ресурс роботи, можливість передачі моменту в герметичні середовища та через перешкоди.

Однак зубчатість зони робочого зазору викликає пульсації переданого моменту і сприяє появі явища «залипання» зубців ротора щодо зубців статора. Дані явища погіршують енергетичні, пускові і експлуатаційні характеристики магнітних передавальних пристроїв. Можливими шляхами покращення даних характеристик є профілізація і скіс зубців, а також раціональний вибір довжини робочого зазору. Представляють інтерес конструкції електричних двигунів з вбудованими магнітними редукторами, що виключають необхідність використання механічного редуктора і забезпечують компактну конструкцію приводу. Подібні механізми і пристрої становлять інтерес для таких областей, як вітроенергетика, екологічно чистий і гібридний автотранспорт, компресорна техніка (передача моменту в герметичні середовища з можливістю збільшення оборотів) і т.д.

#### Список літератури

1. *Armstrong, C.*: 'Power-transmitting device'. US Patent, 687,292, 26 November 1901. Available at <http://www.google.co.uk/patents/US687292>
2. *Faus, H.*: 'Magnet gearing'. US Patent, 353,472, 21 August 1941. Available at <https://patents.google.com/patent/US2243555A>
3. *Kikuchi, S., Tsurumoto, K.*: 'Design and characteristics of a new magnetic worm gear using permanent magnet', *IEEE Trans. Magn.*, 1993, 29, (6), pp. 2923–2925
4. *Kikuchi, K., Tsurumoto, S.*: 'Trial construction of a new magnetic skew gear using permanent magnet', *IEEE Trans. Magn.*, 1994, 30, (6), pp. 4767–4769
5. *Tlali, P., Wang, R.-J., Gerber, S.*: 'Magnetic gear technologies: a review'. *Int. Conf. On Electrical Machines (ICEM)*, 2014, 2014, pp. 544–550
6. *Rodgers, D., Lai, H.C., Outram, J.*: 'A novel lightweight wind turbine generator', *J. Chem. Inf. Model.*, 2013, 53, (9), pp. 1689–1699
7. *Rens, J., Atallah, K., Calverley, S.D., et al.*: 'A novel magnetic harmonic gear', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2010, 46, (1), pp. 206–212
8. *Atallah, K., Howe, D.*: 'A novel high-performance magnetic gear', *IEEE Trans. Magn.*, 2001, 37, (4 I), pp. 2844–2846
9. *Martin, T.B.Jr.*: 'Magnetic transmission'. US Patent 3,378,710, 16 April 1968. Available at <http://www.google.co.uk/patents/US3378710>
10. *Holehouse, R.C., Atallah, K., Wang, J.*: 'Design and realization of a linear magnetic gear', *IEEE Trans. Magn.*, 2011, 47, (10), pp. 4171–4174
11. *Mezani, S., Atallah, K., Howe, D.*: 'A high-performance axial-field magnetic gear', *J. Appl. Phys.*, 2006, 99, (8), pp. 97–100
12. *Hashimoto, J., Kubo, Y.*: 'A magnetic screw device'. US Patent, 5,687, 614, 1997
13. *Wang, J., Atallah, K., Barnes, J.*: 'Analysis and design of a high force density linear electromagnetic actuator'. *PCIM Europe Conf. Proc.*, 2012, vol. 47, no. 10, pp. 177–185
14. *Pakdelian, S., Frank, N.W., Toliyat, H.A.*: Analysis and Design of the TransRotary Magnetic' Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), *IEEE*, 2012, pp. 3340–3347
15. *Kouhshahi, M.B., Bird, J.Z.*: 'Analysis of A magnetically geared lead screw', *Electrical and Computer Engineering Faculty Publications and Presentations*, 2017, (421), pp. 1–8
16. *Huang, C.-C., Tsai, M.-C., Dorrell, D., et al.*: 'Development of a magnetic planetary gearbox', *IEEE Trans. Magn.*, 2008, 44, (3), pp. 403–412
17. *Wang, J., Atallah, K., Carvley, S.D.*: 'A magnetic continuously variable transmission device', *IEEE Trans. Magn.*, 2011, 47, (10), pp. 2815–2818
18. *Chen, M., Chau, K.-t., Lee, C., et al.*: 'Design and analysis of a NewaxialField magnetic variable gear using pole-changing permanent magnets', *Prog. Electromagn. Res.*, 2015, 153, no. pp. 23–32.

#### References (transliterated)

1. *Armstrong, C.*: 'Power-transmitting device'. US Patent, 687,292, 26 November 1901. Available at <http://www.google.co.uk/patents/US687292>
2. *Faus, H.*: 'Magnet gearing'. US Patent, 353,472, 21 August 1941. Available at <https://patents.google.com/patent/US2243555A>
3. *Kikuchi, S., Tsurumoto, K.*: 'Design and characteristics of a new magnetic worm gear using permanent magnet', *IEEE Trans. Magn.*, 1993, 29, (6), pp. 2923–2925
4. *Kikuchi, K., Tsurumoto, S.*: 'Trial construction of a new magnetic skew gear using permanent magnet', *IEEE Trans. Magn.*, 1994, 30, (6), pp. 4767–4769
5. *Tlali, P., Wang, R.-J., Gerber, S.*: 'Magnetic gear technologies: a review'. *Int. Conf. onElectricalMachines (ICEM)*, 2014, 2014, pp. 544–550
6. *Rodgers, D., Lai, H.C., Outram, J.*: 'A novel lightweight wind turbine generator', *J. Chem. Inf. Model.*, 2013, 53, (9), pp. 1689–1699
7. *Rens, J., Atallah, K., Calverley, S.D., et al.*: 'A novel magnetic harmonic gear', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2010, 46, (1), pp. 206–212
8. *Atallah, K., Howe, D.*: 'A novel high-performance magnetic gear', *IEEE Trans. Magn.*, 2001, 37, (4 I), pp. 2844–2846
9. *Martin, T.B.Jr.*: 'Magnetic transmission'. US Patent 3,378,710, 16 April 1968. Available at <http://www.google.co.uk/patents/US3378710>
10. *Holehouse, R.C., Atallah, K., Wang, J.*: 'Design and realization of a linear magnetic gear', *IEEE Trans. Magn.*, 2011, 47, (10), pp. 4171–4174
11. *Mezani, S., Atallah, K., Howe, D.*: 'A high-performance axial-field magnetic gear', *J. Appl. Phys.*, 2006, 99, (8), pp. 97–100
12. *Hashimoto, J., Kubo, Y.*: 'A magnetic screw device'. US Patent, 5,687, 614, 1997
13. *Wang, J., Atallah, K., Barnes, J.*: 'Analysis and design of a high force density linear electromagnetic actuator'. *PCIM Europe Conf. Proc.*, 2012, vol. 47, no. 10, pp. 177–185
14. *Pakdelian, S., Frank, N.W., Toliyat, H.A.*: Analysis and Design of the TransRotary Magnetic' Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), *IEEE*, 2012, pp. 3340–3347
15. *Kouhshahi, M.B., Bird, J.Z.*: 'Analysis of A magnetically geared lead screw', *Electrical and Computer Engineering Faculty Publications and Presentations*, 2017, (421), pp. 1–8
16. *Huang, C.-C., Tsai, M.-C., Dorrell, D., et al.*: 'Development of a magnetic planetary gearbox', *IEEE Trans. Magn.*, 2008, 44, (3), pp. 403–412
17. *Wang, J., Atallah, K., Carvley, S.D.*: 'A magnetic continuously variable transmission device', *IEEE Trans. Magn.*, 2011, 47, (10), pp. 2815–2818
18. *Chen, M., Chau, K.-t., Lee, C., et al.*: 'Design and analysis of a Newaxial Field magnetic variable gear using pole-changing permanent magnets', *Prog. Electromagn. Res.*, 2015, 153, no. pp. 23–32.

Надійшла (received) 19.04.2021

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Ткачук Ігор Валерійович (Ткачук Игорь Валерьевич, Tkachuk Igor)** – аспірант, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5717-2458>; e-mail: [baja0073@gmail.com](mailto:baja0073@gmail.com).

**Коваленко Михайло Анатолійович (Коваленко Михаил Анатольевич, Kovalenko Mykhailo)** – доцент кафедри електромеханіки факультету електроенергетичної та автоматичної, Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>; e-mail: [kovalenko\\_ma@i.ua](mailto:kovalenko_ma@i.ua).

**Е.В. ГОНЧАРОВ, Н.В. КРЮКОВА, В.С. МАРКОВ, И.В. ПОЛЯКОВ**

### ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОНЯТИЯ «РЕАКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ»

Определение понятия «реактивная мощность» нуждается в уточнении, так как в литературе зачастую оно дается крайне расплывчато, что вызывает трудности восприятия у студентов и не совсем понятно широкой публике. Анализ многочисленных источников показывает, что физический смысл этого понятия почти ускользает из приведенных в этих источниках определений. Причем, формула, по которой вычисляется реактивная мощность, нареканий не вызывает. Однако она не объясняет физический смысл понятия. Необходимость в емком и отражающем физический смысл определении давно назрела. Анализ литературных источников позволяет сделать вывод, что реактивной мощности, соответствует энергия, которая идет от источника к потребителю и возвращается обратно, причем, процесс круговорота этой энергии протекает без рассеивания. Эта энергия сохраняется в индукторах, поддерживая неизменное значение тока, и конденсаторами, потому что они заряжаются и разряжаются, поддерживая неизменное значение напряжения. Индуктивность и емкость цепи потребляют и возвращают реактивную мощность. Мощность, передаваемая индуктивности, сохраняется в магнитном поле, когда поле расширяется и возвращается к источнику, когда поле схлопывается. Мощность, подаваемая на емкость, сохраняется в электростатическом поле, когда конденсатор заряжается и возвращается к источнику, когда конденсатор разряжается. Эта мощность, подаваемая в цепь источником, не потребляется. Она вся возвращается к источнику. Таким образом, активная мощность, которая представляет собой потребляемую мощность, равна нулю. Мы знаем, что переменный ток постоянно меняется; таким образом, постоянно возникают циклы расширения и схлопывания магнитных и электростатических полей. Предложено следующее определение: нерассеиваемая электрическая энергия переменного тока, которая возбуждает магнитные или электрические поля, соответственно в индуктивных и емкостных элементах и, поступающая от них обратно в сеть, называется реактивной мощностью.

**Ключевые слова:** реактивная мощность, определение понятия «реактивная мощность».

**Є.В. ГОНЧАРОВ, Н.В. КРЮКОВА, В.С. МАРКОВ, І.В. ПОЛЯКОВ**

### ПРО ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТТЯ «РЕАКТИВНА ПОТУЖНІСТЬ»

Визначення поняття «реактивна потужність» потребує уточнення, так як в літературі часто воно дається вкрай розпливчато, що викликає труднощі сприйняття у студентів і не зовсім зрозуміло широкій публіці. Аналіз численних джерел показує, що фізичний зміст цього поняття майже вислизає з наведених в цих джерелах визначень. Причому, формула, за якою обчислюється реактивна потужність, нарікань не викликає. Однак вона не пояснює фізичний зміст поняття. Необхідність в ємному і відбиває фізичний зміст визначенні давно назріла. Аналіз літературних джерел дозволяє зробити висновок, що реактивної потужності, відповідає енергія, яка йде від джерела до споживача і повертається назад, причому, процес кругообігу цієї енергії протікає без розсіювання. Ця енергія зберігається в індукторі, підтримуючи постійний значення струму, і конденсаторами, тому що вони заряджаються і розряджаються, підтримуючи постійний значення напруги. Індуктивність і ємність ланцюга споживають і повертають реактивну потужність. Потужність, що передається індуктивності, зберігається в магнітному полі, коли поле розширюється і повертається до джерела, коли поле різко зменшується. Потужність, що подається на ємність, зберігається в електростатичному полі, коли конденсатор заряджається і повертається до джерела, коли конденсатор розряджається. Ця потужність, що подається в ланцюг джерелом, не споживається. Вона вся повертається до джерела. Таким чином, активна потужність, яка представляє собою споживану потужність, дорівнює нулю. Ми знаємо, що змінний струм постійно змінюється; таким чином, постійно виникають цикли розширення та зменшення магнітних і електростатичних полів. Запропоновано наступне визначення: електрична енергія змінного струму, яка не розсіюється та збуджує магнітні або електричні поля, відповідно в індуктивних і ємнісних елементах і, що надходить від них назад в мережу, називається реактивною потужністю.

**Ключові слова:** реактивна потужність, визначення поняття «реактивна потужність».

**E. V. HONCHAROV, N. V. KRUYKOVA, V. S. MARKOV, I. V. POLYAKOV**

### A DEFINITION OF THE "REACTIVE POWER" CONCEPT

A definition of the "reactive power" concept needs to be clarified, since in the literature it is often given extremely vaguely, which causes difficulties in students' perception and is not entirely clear to the general public. Analysis of numerous sources shows that the physical meaning of this concept almost escapes the definitions given in these sources. Moreover, the formula by which the reactive power is calculated raises no objections. However, it does not explain the physical meaning of the concept. The need for a capacious definition that reflects the physical meaning is long overdue. Analysis of literature sources allows us to conclude that reactive power corresponds to the energy that goes from the source to the consumer and returns back, moreover, the process of circulation of this energy proceeds without dissipation. This energy is stored in inductors, keeping the current constant, and in capacitors, because they charge and discharge, keeping the voltage constant. The inductance and capacitance of the circuit consume and return reactive power. The power transferred to the inductor is stored in the magnetic field when the field expands and returns to the source when the field collapses. The power supplied to the capacitor is stored in an electrostatic field when the capacitor is charged and returned to the source when the capacitor is discharged. This power supplied to the circuit by the source is not consumed. It all returns to the source. Thus, the active power, which is the consumed power, is zero. We know that alternating current is constantly changing; thus, cycles of expansion and collapse of magnetic and electrostatic fields constantly occur. The following definition is proposed: non-dissipated electrical energy of alternating current, which excites the magnetic or electric fields, respectively, in inductive and capacitive elements and, coming from them back to the network, is called reactive power.

**Key words:** reactive power, a definition of the "reactive power" concept

**Актуальность.** Понятие «реактивная мощность» остается одним из наиболее невнятных в электротехнике. Вызывает оно затруднение и у студентов, и полное непонимание самодеятельных горе-физиков и изобретателей, обитающих на бескрайних просторах

Интернета. Эти-то и делают умозаключения, как сказал классик, «космического масштаба и космической же глупости», которые рассчитаны на самую широкую аудиторию. Другими словами, определение понятия «реактивной мощности» является своеобразным «уз-

© Е.В. Гончаров, Н.В. Крюкова, В.С. Марков, И.В. Поляков, 2021

ким» местом электротехнике, что требует существенного уточнения.

**Постановка задачи.** Попытаемся дать емкое определение понятию «реактивная мощность», которое бы четко объясняло физическую сущность данного явления.

**Анализ.** Разберем это определение из доступных источников, начиная от Держстандарта України, а потом из различных учебных пособий. Цитаты будем выделять курсивом для удобства восприятия и брать в кавычки.

Из действующего на момент написания статьи Держстандарта України [1] узнаем, что «реактивна потужність синусоїдного струму двополюсника величина, яка дорівнює добутку діючої напруги, струму та синуса кута зсуву фаз між напругою і струмом».

Строго говоря, из определения мало что понятно. Зачем это самое произведение нужно? И каков его физический смысл? Попробуем разобраться, обратившись к разным источникам в их ретроспективной последовательности.

Один из основателей электротехнической школы в Советском Союзе Карл Адольфович Круг в своем классическом учебнике [2] написал следующее:

*«Реактивная мощность представляет собой произведение реактивной слагающей напряжения (проекция вектора напряжения на направление, перпендикулярное к направлению вектора тока) на ток*

$$P_r = UI \sin \varphi = U_r I$$

*Реактивная мощность является фиктивной величиной, так как индуктивность энергии не поглощает и средняя мощность в индуктивности равна нулю, реактивную мощность обозначают также иногда через букву Q.»*

Видим, что определение Держстандарта України практически повторяет вышеприведенное, а также, то, что в середине прошлого века обозначение реактивной мощности было несколько другим. Непонятно, о какой средней мощности говорится: полной, мгновенной или еще какой-то? Да и не является реактивная мощность величиной фиктивной, а вполне измеряемой с помощью ваттметра, подключенного в трехфазную цепь, что показано там же в [2].

Следующий источник из середины прошлого века от еще одного известного специалиста в области электротехники [3]:

*«Мерой скорости обмена энергией между генератором и цепью является реактивная мощность Q.»*

Данное определение само нуждается в подробном разъяснении, в частности, что имеется в виду под «мерой скорости обмена»?

Тот же автор, но спустя десятилетия [4]:

*«Энергию, которой обмениваются источник питания и цепь с индуктивным сопротивлением, характеризуют максимальным значением мгновенной мощности цепи и называют ее реактивной индуктивной мощностью.»*

*Реактивная мощность цепи с индуктивностью*

$$Q_L = UI = \omega LI^2 = \omega W_{L \max}$$

*Единица реактивной мощности – вольт-ампер реактивный (вар)».*

Здесь уже более понятное определение, но автор ограничивается только «реактивной индуктивной мощностью».

Вот определение от Г.И. Атабекова, автора одного из основных учебников по теоретическим основам электротехники в СССР в семидесятые-девяностые годы двадцатого века [5]:

*«При расчетах электрических цепей и на практике и эксплуатации пользуются также понятием реактивная мощность, которая вычисляется по формуле*

$$Q = UI \sin \varphi$$

*И является мерой потребления (или выработки) реактивного тока. Реактивная мощность положительна при отстающем токе (индуктивная нагрузка) и отрицательна при опережающем токе (емкостная нагрузка)».*

Здесь появляется понятие «реактивный ток», которое никак не поясняется, но зато уже вводится в определение понятие о знаке реактивной мощности.

В Энциклопедическом словаре [6] дается следующее определение:

*«Величина, характеризующая нагрузки, создаваемые в электротехнических устройствах колебаниями электромагнитного поля. Для синусоидального тока*

$$Q = UI \sin \varphi$$

*Здесь тоже не совсем ясное определение. Что же это за нагрузки, создаваемые колебаниями электромагнитного поля?*

В учебнике по общей электротехнике [7] указывается:

*«Переменная мощность, идущая на увеличение магнитного или электрического полей или поступающая обратно в сеть, называется реактивной мощностью. Ее амплитуда  $Q = UI \sin \varphi$ ».*

Это определение четко называет реактивную мощность переменной и связывает ее с увеличением магнитных и электрических полей.

В другом учебнике по электротехнике [8] определение вообще крайне расплывчато:

*«Для анализа энергетических процессов в цепи при неполном использовании энергетических возможностей источника вводится понятие о реактивной мощности источника, равной реактивной мощности пассивного двухполюсника*

$$Q = EI \sin \varphi = UI \sin \varphi = UI \sin(\psi_u - \psi_i)$$

Пособие по электротехнике [9], изданное в НТУ «ХПИ» в 21-м веке:

*« $Q = UI \sin \varphi$  – реактивная мощность всего участка цепи, которая характеризует колебательный процесс передачи энергии между сетью и этим участком.»*

Вообще-то процесс передачи энергии в цепи переменного тока не может быть не колебательным в принципе, так как произведение двух синусоид есть косинусоида плюс постоянная составляющая. Вот эта постоянная составляющая и есть активная мощность,



которая всегда имеет знак плюс, так как характеризует процесс рассеивания энергии в виде тепла на резистивных элементах.

Мгновенная мощность для цепи синусоидального тока, как известно,

$$p = ui = U_m \sin(\omega t + \psi_u) I_m \sin(\omega t + \psi_i).$$

Если принять начальную фазу тока равной нулю  $\psi_i = 0$  и с учетом того, что  $\varphi = \psi_u - \psi_i$ , то  $\varphi = \psi_u$ , тогда

$$p = ui = \frac{1}{2} U_m I_m [\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)]$$

Активная мощность на зажимах источника равна  $P = UI \cos \varphi$  или непосредственно на резистивном элементе  $P = R^2 I^2$ .

Значит, имеет смысл говорить о свойствах участка цепи, т.е. определить, что участок, о котором идет речь, обладает реактивными свойствами, что это индуктивный или емкостной элемент.

В [9] достаточно подробно математически разбирается реактивная мощность на индуктивном и емкостном элементах:

«Мгновенная мощность в идеальном индуктивном элементе

$$p = ui = \frac{1}{2} U_m I_m \left[ \cos \frac{\pi}{2} - \cos(2\omega t + \frac{\pi}{2}) \right] = UI \sin 2\omega t.$$

В данном случае средняя за период, т.е. активная мощность  $P=0$ , значит энергия в целом не расходуется, а происходит колебательный процесс если  $p>0$ , то энергия забирается из сети и запасается в магнитном поле; если  $p<0$ , то энергия возвращается в сеть.

Энергетический процесс оценивается амплитудой колебания мощности, которая обозначается  $Q_L$  и называется реактивной мощностью индуктивного элемента  $Q_L = U_L I$ , а с учетом того, что  $U_L = X_L I$ ,  $Q_L = X_L I^2$  ».

Аналогично в [9] показана реактивная мощность в идеальном емкостном элементе

$$\langle p = ui = \frac{1}{2} U_m I_m \left[ \cos(-\frac{\pi}{2}) - \cos(2\omega t - \frac{\pi}{2}) \right] = -UI \sin 2\omega t \rangle.$$

И в данном случае указывается, что «активная мощность  $P=0$ , а амплитуда колебания мощности – реактивная емкостная мощность  $Q_L = X_C I^2$  ».

Обратимся к Википедии [10] и позволим себе достаточно обширную цитату оттуда:

«Физический смысл реактивной мощности – это энергия, перекачиваемая от источника на реактивные элементы приёмника (индуктивности, конденсаторы, обмотки двигателей), а затем возвращаемая этими элементами обратно в источник в течение одного периода колебаний, отнесённая к этому периоду.

Когда устройство имеет положительную реактивную мощность, то принято говорить, что оно её потребляет, а когда отрицательную – то производит, но это чистая условность, связанная с тем, что большинство электропотребляющих устройств (например, асинхронные двигатели), а также чисто

активная нагрузка, подключаемая через трансформатор, являются активно-индуктивными.

Синхронные генераторы, установленные на электрических станциях, могут как производить, так и потреблять реактивную мощность в зависимости от величины тока возбуждения, протекающего в обмотке ротора генератора. За счёт этой особенности синхронных электрических машин осуществляется регулирование заданного уровня напряжения сети. Для устранения перегрузок и повышения коэффициента мощности электрических установок осуществляется компенсация реактивной мощности».

Из цитируемого участка можно сделать вывод, что реактивной мощности, соответствует энергия, которая идет от источника к потребителю и возвращается обратно, причем, процесс круговорота этой энергии протекает без рассеивания.

Обсуждая реактивную мощность, невозможно не сказать о полной мощности в цепи переменного тока, частью, которой реактивная мощность и является.

Под полной мощностью понимают произведение действующих (среднеквадратичных) значений тока и напряжения или квадратный корень из суммы квадратов активной и реактивной мощности, которое измеряется в вольт-амперах

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Снова обратимся к Википедии

«Полная мощность имеет практическое значение, как величина, описывающая нагрузки, фактически налагаемые потребителем на элементы подводящей электросети (провода, кабели, распределительные щиты, трансформаторы, линии электропередачи), так как эти нагрузки зависят от потребляемого тока, а не от фактически использованной потребителем энергии. Именно поэтому полная мощность трансформаторов и распределительных щитов измеряется в вольт-амперах, а не в ваттах».

Действительно, нагрузка на вторичной обмотке трансформатора может быть чисто активной, активно-индуктивной или активно-емкостной, а полная мощность показывает максимально возможное значение мощности устройства, определяемой номинальными значениями тока и напряжения, вне зависимости от характера нагрузки. Именно это плохо понимает широкая публика, в частности, самодеятельные физики и всякие «изобретатели вечных двигателей».

Теперь стоит обратиться и к зарубежным источникам. Начнем с наиболее авторитетного – Электронной [11], это своего рода стандарт от Европейской электротехнической комиссии (IEC – International Electrotechnical Commission).

Пункт 131-11-44 реактивная мощность (**reactive power**)

«for a linear two-terminal element or two-terminal circuit, under sinusoidal conditions, quantity equal to the product of the apparent power  $S$  and the sine of the displacement angle  $\varphi$

$$Q = S \sin \varphi$$

Note 1 to entry: The reactive power is the imaginary part of the complex  $S$

$$Q = ImS$$

Note 2 to entry: The coherent SI unit for reactive power is voltampere, VA. The special name var and its symbol var are also used.

Reactive power ( $Q$ ) is the power consumed in an AC circuit because of the expansion and collapse of magnetic (inductive) and electrostatic (capacitive) fields. Reactive power is expressed in volt-amperes-reactive (VAR).

В этом определении ничего особо нового нет, но упоминается расширение (*expansion*) и схлопывание (*collapse*) магнитных и электростатических полей, и говорится только о потреблении реактивной энергии в цепях переменного тока (*Reactive power is the power consumed in an AC circuit*).

Пункт 601-01-20 посвящен реактивной энергии (**reactive energy**):

*«in an AC system, the captive electrical energy exchanged continuously between the different electric and magnetic fields associated with the operation of the electrical system and of all the connected apparatus».*

Что в переводе означает:

*«в системе переменного тока захваченная электрическая энергия непрерывно обменивается между различными электрическими и магнитными полями, связанными с работой электрической системы и всех подключенных устройств».*

Нельзя признать это определение удачным, особенно прилагательное *«captive»* в данном контексте.

Рассмотрим также учебник по электротехнике, выпущенный Министерством энергетики США [12]:

*«Unlike true power, reactive power is not useful power because it is stored in the circuit itself. This power is stored by inductors, because they expand and collapse their magnetic fields in an attempt to keep current constant, and by capacitors, because they charge and discharge in an attempt to keep voltage constant. Circuit inductance and capacitance consume and give back reactive power. Reactive power is a function of a system's amperage. The power delivered to the inductance is stored in the magnetic field when the field is expanding and returned to the source when the field collapses. The power delivered to the capacitance is stored in the electrostatic field when the capacitor is charging and returned to the source when the capacitor discharges. None of the power delivered to the circuit by the source is consumed. It is all returned to the source. The true power, which is the power consumed, is thus zero. We know that alternating current constantly changes; thus, the cycle of expansion and collapse of the magnetic and electrostatic fields constantly occurs».*

Перевод данного отрывка:

*«В отличие от активной мощности, реактивная мощность не является полезной мощностью, потому что она запасается в самой цепи».*

*Эта энергия сохраняется в индукторах, потому что они расширяют и схлопывают свои магнитные поля, поддерживая неизменное значение тока, и конденсаторами, потому что они заряжаются и разряжаются, поддерживая неизменное значение напряжения. Индуктивность и емкость цепи по-*

*требляют и возвращают реактивную мощность. Реактивная мощность зависит от силы тока системы. Мощность, передаваемая индуктивности, сохраняется в магнитном поле, когда поле расширяется и возвращается к источнику, когда поле схлопывается. Мощность, подаваемая на емкость, сохраняется в электростатическом поле, когда конденсатор заряжается и возвращается к источнику, когда конденсатор разряжается. Эта мощность, подаваемая в цепь источником, не потребляется. Она вся возвращается к источнику. Таким образом, активная мощность, которая представляет собой потребляемую мощность, равна нулю. Мы знаем, что переменный ток постоянно меняется; таким образом, постоянно возникают циклы расширения и схлопывания магнитных и электростатических полей».*

Здесь достаточно подробно рассказано о взаимосвязи энергии и магнитных и электрических полей.

**Вывод.** Исходя из анализа отечественных и зарубежных источников, нами предлагается такое определение реактивной мощности:

нерассеиваемая электрическая энергия переменного тока, которая возбуждает магнитные или электрические поля, соответственно в индуктивных и емкостных элементах и, поступающая от них обратно в сеть, называется реактивной мощностью.

Считаем, что данное определение наиболее компактно, при этом достаточно полно разъясняет физический смысл реактивной мощности.

#### Список літератури

- 1 Державний стандарт України. Електротехніка. Основні поняття. Терміни та визначення. ДСТУ 2843-94.
- 2 К.А. Круг Основы электротехники в двух томах. Том второй. – М., Л.: Государственное энергетическое издательство, 1946.
- 3 В.С. Попов, Н.Н. Мансуров, С.А. Николаев Электротехника. – М., Л.: Государственное энергетическое издательство, 1954.
- 4 Попов В.С. Теоретическая электротехника: Учебник для техникумов/ Под ред. Б.Я. Жуковичского. – 3-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 544 с.
- 5 Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Ч1. Линейные электрические цепи, – М.: Энергия, 1970.
- 6 Советский энциклопедический словарь. Издательство «Советская энциклопедия», 1981.
- 7 Общая электротехника: Учеб. пособие для вузов/ под ред. д-ра техн. наук А.Т. Блажкина. – 4-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 592 с.
- 8 Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника: Учеб. Пособие для вузов – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 440 с.
- 9 Милых В.И. Электрические цепи: Учебное пособие. – Харьков. НТУ «ХПИ», 2002. – 159 с.
- 10 [https://ru.wikipedia.org/wiki/Электрическая\\_мощность#Реактивная\\_мощность](https://ru.wikipedia.org/wiki/Электрическая_мощность#Реактивная_мощность)
- 11 <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=131-11-44>
- 12 The DOE Fundamentals Handbooks have been prepared for the Assistant Secretary for Nuclear Energy, Office of Nuclear Safety Policy and Standards, by the DOE Training Coordination Program. This program is managed by EG&G Idaho, Inc.1992.

#### References (transliterated)

- 1 DSTU 2843-94. Derzhavnyi standart Ukrainy. Elektrotekhnika. Osnovni poniattia. Terminy ta vyznachennia.

- 2 K.A. Kruh *Osnovy elektrotekhniki v dvukh tomakh. Tom vtoroi.* – M., L.: Gosudarstvennoe enerhetycheskoe izdatelstvo, 1946.
- 3 V.S. Popov, N.N. Mansurov, S.A. Nikolaev *Elektrotekhnika.* – M., L.: Gosudarstvennoe enerhetycheskoe izdatelstvo, 1954.
- 4 Popov V.S. *Teoreticheskaia elektrotekhnika: Uchebnyk dlia tekhnikumov / Pod red. B.Ia. Zhukovytskoho.* – 3-e yzd. – Moscow: Enerhoatomyzdat, 1990. – 544 p.
- 5 Atabekov H.Y. *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki. Ch1. Lyneinye elektrycheskiye tsepy,* – Moscow: Enerhiya, 1970.
- 6 *Sovetskiyi entsyklopedicheski slovar. Yzdatelstvo «Sovetskaia entsyklopediya»,* 1981.
- 7 *Obshchaia elektrotekhnika: Ucheb. posobie dlia vuzov / pod red. d-ra tekhn. nauk A.T. Blazhkyna.*– 4-e yzd., pererab. y dop. – L.: Enerhoatomyzdat, 1986. – 592 p.
- 8 Kasatkyn A.S., Nemtsov M.V. *Elektrotekhnika: Ucheb. Posobie dlia vuzov - 4-e yzd., pererab. y dop.* – Moscow: Enerhoatomyzdat, 1983. – 440 p.
- 9 Milykh V.Y. *Elektrycheskiye tsepy: Uchebnoe posobie.* – Kharkov. NTU «KhPI», 2002. – 159 p.
- 10 [https://ru.wikipedia.org/wiki/Elektrycheskaia\\_moshchnost#Reaktivnaia\\_moshchnost](https://ru.wikipedia.org/wiki/Elektrycheskaia_moshchnost#Reaktivnaia_moshchnost)
- 11 <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=131-11-44>
- 12 The *DOE Fundamentals Handbooks* have been prepared for the Assistant Secretary for Nuclear Energy, Office of Nuclear Safety Policy and Standards, by the DOE Training Coordination Program. This program is managed by EG&G Idaho, Inc.1992.

*Поступила (received) 20.05.2021*

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Гончаров Євген Вікторович (Гончаров Евгений Викторович, Honcharov Yevgen Viktorovich)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри загальної електротехніки; м. Харків; тел.: (057) 707-64-27.

**Крюкова Наталія Валеріївна (Крюкова Наталья Валерьевна, Kruykova Nataliya Valeriivna)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри загальної електротехніки; м. Харків; тел.: (057) 707-64-27.

**Марков Владислав Сергійович (Марков Владислав Сергеевич, Markov Vladislav Sergeyevych)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри загальної електротехніки, тел.: (057) 707-64-27.

**Поляков Ігор Володимирович (Поляков Игорь Владимирович, Polyakov Igor Vladimirovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри загальної електротехніки, тел.: (057) 707-64-27.

**І.О. КОСТЮКОВ, Є.С. МОСКВІТИН**

### ЗМЕНШЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАЗИТНОЇ ІНДУКТИВНОСТІ ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ОБ'ЄКТА КОНТРОЛЮ НА ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ ЙОГО ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЄМНОСТІ

У цій роботі дається опис методики вимірювання, яка може бути використана на практиці для оцінки електричної ємності досліджуваного об'єкта із значною паразитною індуктивністю. Електрична ємність визначається як відношення середнього значення розрядного струму до середнього значення похідної за часом, взятої від напруги на невідомій ємності. Зменшення шкідливого впливу паразитної індуктивності на точність вимірювань досягається відповідним підбором тривалості проаналізованих сигналів. У запропонованому методі тривалість обмежена моментами часу, які відповідають максимальному значенню розрядного струму та завершенню перехідного процесу.

**Ключові слова:** аперіодичний розряд, паразитні параметри, точність вимірювань

**И.А. КОСТЮКОВ, Е.С. МОСКВИТИН**

### УМЕНЬШЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАЗИТНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ ИССЛЕДУЕМОГО ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ

В этой работе дается описание методики измерения, которая может быть использована на практике для оценки емкости исследуемого объекта со значительной паразитной индуктивностью. Электрическая емкость определяется как отношение среднего значения разрядного тока к среднему значению производной по времени, взятой от напряжения на неизвестной емкости. Уменьшения вредного влияния паразитной индуктивности на точность измерений достигается соответствующим подбором длительности проанализированных сигналов. В предложенном методе длительность сигналов ограничена моментами времени, которые соответствуют максимальному значению тока разряда и завершению переходного процесса.

**Ключевые слова:** аперіодический разряд, паразитные параметры, точность измерений.

**I. KOSTIUKOV, E. MOSKVITIN**

### THE DECREASING OF THE INFLUENCE OF PARASITIC INDUCTANCE OF TESTED OBJECT ON THE ACCURACY OF ITS ELECTRICAL CAPACITANCE MEASUREMENT

This paper gives a description of measurement technique which can be used in practice of carrying out estimation of electrical capacitance of tested object with substantial stray inductance. Electrical capacitance is determined as a ratio of mean value of discharge current to the mean value of time derivative, taken from voltage on unknown capacitance. The decreasing of deleterious impact of stray inductance on accuracy of measurements is achieved by proper selection of the duration of analyzed signals. In proposed technique the duration is limited by instants of time that correspond to the maximum value of discharge current and to the termination of transient. The accuracy of described method for electrical capacitance estimation is affected by noisy components of obtained oscillograms. This deleterious impact can be alleviated by smoothing of time dependence by applying of least square method. Another reason for lost of accuracy is associated with possible influence of skin-effect in conductive elements of discharge circuit, which can cause time dependence of resistance and inner inductance of conductive parts of tested object and discharge circuit. Described technique, however, is based on taking into consideration independent on time parameters of equivalent lamped discharge circuit. Nevertheless, the example of practical implementation has shown that described approach allows to partially mitigate the influence of stray inductance on carried out measurements of electrical capacitance, as the value of relative error turned out to be equal to 2.04%

**Keywords:** Parasitic parameters, overdamped discharge, accuracy of measurements.

**Вступ.** Проблема вимірювання електричної ємності є досить важливою для вирішення багатьох інженерних та медичних задач. Типовими прикладами таких задач є забезпечення контролю технічного стану ізоляції електротехнічного обладнання [1], моніторинг стану людського організму [2], вимірювання товщини рідких плівок [3], аналіз складу рідких речовин [4], оцінка електричних параметрів високовольтного обладнання [5].

У наш час широко відомі методи вимірювання електричної ємності, засновані на визначенні постійної часу розряду конденсаторів. Такий підхід до вимірювання ємності передбачає, що залежність напруги на невідомій ємності в процесі розряду може бути визначена наступним чином:

$$U(t) = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (1)$$

де  $U_0$  - початкове значення напруги на досліджуваній ємності,  $\tau$  - значення постійної часу розрядного ланцюга,  $t$  - час після початку перехідного процесу. У цьому випадку методи вимірювання ємності засновані на вимірюванні проміжку часу, для якого значення

напруги на невідомій ємності відрізняються від зарядного значення на величину, що визначається постійною часу розрядного ланцюга. Ця задача може бути вирішена із застосуванням різних технічних рішень. Одне з таких рішень наведено в [6], де наведено опис електричної схеми для вимірювання постійної часу за допомогою застосування компараторів напруги,  $JK$  тригера та логічних елементів. Альтернативний метод вимірювання постійної часу наведено в [7]. Зазначений метод заснований на застосуванні таймера 555, який містить  $RS$  тригер, компаратори напруги та транзисторний перемикач. Окрім згаданих методів, заснованих на вимірюванні постійної часу, можливе застосування методів вимірювання, заснованих на застосуванні фазових детекторів [8] - [11]. Численні методи вимірювань засновані на застосуванні мостів змінного струму, наприклад мостів Шерінга [12]. Вимірювання електричної ємності іноді може ускладнюватися паразитарними параметрами досліджуваного об'єкта. Одним із таких параметрів є паразитна індуктивність досліджуваного ємнісного об'єкта [13] - [16], яка, крім того, може залежати від частоти та амплітуди прикла-

© І.О. Костюков, Є.С. Москвітін, 2021

деної напруги. В деяких випадках сама електрична ємність може представляти паразитний параметр досліджуваного об'єкта [17] - [19]. Крім того, в деяких важливих для практичного застосування випадках, наприклад у разі випробування ізоляції в імпульсних конденсаторах високої напруги, наявність паразитної індуктивності може призвести до зміни падіння напруги на невідомій ємності та, відповідно, до спотворення результатів проведених вимірювань. Вплив паразитної індуктивності на точність вимірювань зазвичай стає більш чітким із збільшенням частоти прикладеної напруги. Наявність паразитної індуктивності досліджуваного об'єкта та розрядного ланцюга також може призвести до деякої неточності вимірювань, які проводились за допомогою застосування різних методів, заснованих на визначенні постійної часу. Така втрата точності зумовлена тим, що паразитна індуктивність може спричинити більш повільне зменшення напруги на невідомій ємності, ніж це зазвичай відбувається у випадку застосування виразу (1) для напруги на невідомій ємності. Внаслідок зміни значень падіння напруги на невідомій ємності, спричиненої наявністю паразитної індуктивності, більшість існуючих методів дозволяють визначати лише значення ефективної електричної ємності. У разі значної паразитної індуктивності такі значення можуть виявляти суттєві розбіжності зі значеннями точної електричної ємності, які визначається значенням діелектричної проникності діелектричного матеріалу та геометричними параметрами застосовуваних електродів. При практичному застосуванні зазначена невідповідність є перешкодою для отримання інформації про технічний стан електричної ізоляції. Отже, для практичних цілей переважно розробити методи вимірювань, які дозволяють частково зменшити або повністю виключити вплив паразитної індуктивності на точність проведених вимірювань електричної ємності.

**Мета статті** полягає в розробці методу вимірювання електричної ємності, заснованого на аналізі перехідних процесів в електричному ланцюзі, що виникають внаслідок аперіодичного розряду досліджуваної ємності, що дозволяє зменшити вплив паразитної індуктивності на виміряні значення електричної ємності.

**Матеріали та методи.** Запропонований метод зменшення впливу паразитної індуктивності на точність вимірювання електричної ємності базується на аналізі напруги на досліджуваній ємності в аперіодичному режимі розряду. У разі аперіодичного режиму розряду невідомої електричної ємності можна регулювати величину опору розрядного ланцюга до величини, при якій падіння напруги на індуктивності в момент часу, який відповідає максимальному значенню струму розряду і в подальші моменти перехідного процесу, буде зменшено до рівня, який не спричиняє істотного впливу на точність проведених вимірювань. У разі незначної паразитної індуктивності величину електричної ємності можна визначити як відношення деякого значення розрядного струму до відповідного значення попередньо диференційованої за часом напруги на невідомій ємності. Таке відношення можна визначити для максимального, середнього квадратич-

ного та середнього значень струму розряду та напруги. Отже, величину невідомої електричної ємності у випадку незначної паразитної індуктивності можна визначити як:

$$C = \frac{I_{cMAX}(t)}{MAX(\frac{dU_c(t)}{dt})} \quad (2)$$

$$C = \frac{I_{cRMS}(t)}{RMS(\frac{dU_c(t)}{dt})} \quad (3)$$

$$C = \frac{I_{cMEAN}(t)}{MEAN(\frac{dU_c(t)}{dt})} \quad (4)$$

де  $I_{cMAX}(t)$ ,  $I_{cRMS}(t)$  та  $I_{cMEAN}(t)$  відповідно позначають максимальні, середньоквадратичні та середні значення розрядного струму,  $U_c(t)$  позначає напругу на невідомій ємності. Однак наявність паразитної індуктивності істотно ускладнює безпосереднє застосування виразів (2)-(4) для вимірювання ємності. Зазначені труднощі можна пояснити, розглянувши еквівалентну схему досліджуваного об'єкта та розрядного ланцюга, представлену на рис. 1.

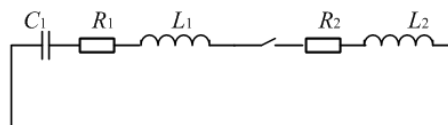


Рис. 1. Еквівалентна схема для розрядного ланцюга:  $C_1$  - значення невідомої електричної ємності,  $R_1$  - опір, спричинений втратами потужності в досліджуваному об'єкті,  $L_1$  - значення паразитної індуктивності досліджуваного об'єкта,  $L_2$  - значення індуктивності розрядного кола,  $R_2$  - електричний опір, який використовується для регулювання режиму розряду і застосовується як перетворювач струму на напругу

Як видно з рис. 1, наявність паразитарних параметрів випробовуваного об'єкта  $L_1$  та  $R_1$ , впливає на напругу на невідомій ємності, а отже, визначає значення похідної за часом у (2)-(4). Тому значення напруги на невідомій ємності недоступне для прямих вимірювань. Однак на практиці можна виміряти величину напруги на виходах перетворювача струму в напругу. Припускаючи незначну індуктивність розрядного ланцюга  $L_2$ , цю напругу можна представити як суму напруг на невідомій ємності, паразитній індуктивності та опорі досліджуваного об'єкта:

$$|U_{R2}(t)| = |-U_{C1}(t) - U_{R1}(t) - U_{L1}(t)| \quad (5)$$

де  $U_{C1}(t)$ ,  $U_{R1}(t)$  та  $U_{L1}(t)$ , відповідно, позначають значення падіння напруги на виміряній ємності, активному опорі досліджуваного об'єкта та паразитній індуктивності досліджуваного об'єкта. У цьому випадку необхідно розглянути два випадки, які відповідають різному співвідношенню значень  $R_2$  і  $R_1$ . Перший випадок відповідає незначному опорі досліджуваного об'єкта. У цьому випадку можна припустити, що значення напруги на  $R_2$  в кожен момент перехідного процесу дорівнює сумі напруг на виміряній ємності та паразитній індуктивності. У цьому випадку можна нехтувати значенням напруги на  $R_1$  і значення напруги

ги на виході перетворювача струму в напругу  $U_{CONV1}$  можна записати як:

$$U_{CONV1} = |U_{R2}(t)| = |-U_{C1}(t) - U_{L1}(t)| \quad (6)$$

Другий випадок відповідає суттєвому значенню внутрішнього опору  $R_1$ . У цьому випадку в необхідно провести вимірювання  $R_1$  і зробити відповідну обробку отриманих осцилограм для того, щоб отримати масив даних, який визначається лише величиною падіння напруги на паразитній індуктивності та на досліджуваній ємності. У цьому випадку значення напруги на виході перетворювача струму в напругу  $U_{CONV2}$  можна записати як:

$$U_{CONV2} = |U_{R2}(t)| + |U_{R1}(t)| = |-U_{C1}(t) - U_{L1}(t)| \quad (7)$$

Оскільки падіння напруги на паразитній індуктивності пропорційне похідній за часом, розрахованій для розрядного струму, паразитна індуктивність може мати значний вплив на точність проведених вимірювань лише протягом досить обмеженого часу, після чого перебіг перехідного процесу в основному визначаються значеннями ємності  $C_1$  та опором  $R_1, R_2$ .

Значення напруги на паразитній індуктивності дорівнює нулю в той момент часу, коли струм розряду досягає свого максимального значення. Відповідним підбором опору  $R_2$  можна досягти режиму розряду, коли напруга на опорі  $R_2$  майже збігається із напругою на вимірюваній ємності. Отже, точність проведених вимірювань можна підвищити, обмежуючи тривалість проаналізованих сигналів моментами часу, які відповідають максимальному значенню розрядного струму та закінчення перехідного процесу, оскільки для цього періоду часу похідна за часом розрахована для розрядного струму і, відтак, падіння напруги на паразитній індуктивності може характеризуватися меншими значеннями, ніж відразу після початку процесу розряду.

Описані раніше особливості розрядних процесів проілюстровані на рис. 2 і рис. 3. Всі розрахунки проводились для величини ємності, що дорівнює  $4,7 \cdot 10^{-6}$  Ф, значення паразитної індуктивності, що дорівнює  $15 \cdot 10^{-3}$  Гн, і змінному значенню опору  $R_2$ . Початкове значення напруги на вимірюваній ємності було встановлене рівним 10 В. Усі розрахунки проводились, використовуючи відомі вирази для розрядного струму та напруги на вимірюваній ємності [20]:

$$i(t) = -\frac{U_0}{L(\alpha_1 - \alpha_2)} (e^{\alpha_1 t} - e^{\alpha_2 t}) \quad (7)$$

де  $U_0$  початкове значення напруги на досліджуваній ємності а коефіцієнти  $\alpha_1, \alpha_2$  можуть бути визначені із використанням наступних виразів [20]:

$$\alpha_1 = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \quad (8)$$

$$\alpha_2 = -\frac{R}{2L} - \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \quad (9)$$

де  $R$  значення опору розрядного ланцюга, що включає в себе значення  $R_1$  та  $R_2$ . Напруга на досліджуваній ємності може бути визначена згідно із:

$$u_C(t) = -\frac{U_0}{\alpha_1 - \alpha_2} (\alpha_2 e^{\alpha_1 t} - \alpha_1 e^{\alpha_2 t}) \quad (10)$$

Максимальне значення розрядного струму спостерігається в момент часу, що може бути визначений згідно із [20]:

$$t_m = \frac{\ln(\frac{\alpha_2}{\alpha_1})}{\alpha_1 - \alpha_2} \quad (11)$$

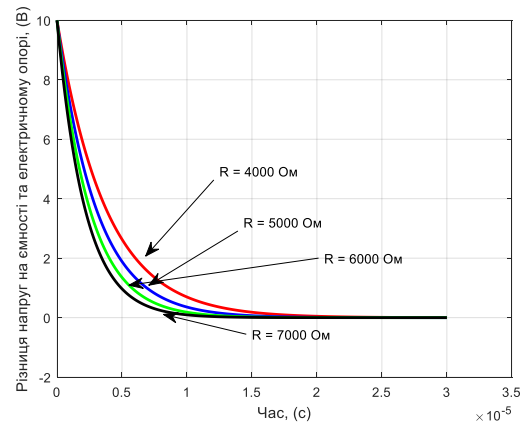


Рис. 2. Вплив опору розрядного ланцюга на різницю напруг на  $C_1$  і  $R_2$

З результатів розрахунків на рис. 2 та рис. 3 можна зробити висновок, що зменшення різниці напруг на вимірюваній ємності  $C_1$  та опорі  $R_2$  супроводжується поступовим зменшенням часу, що відповідає максимальному значенню розрядного струму.

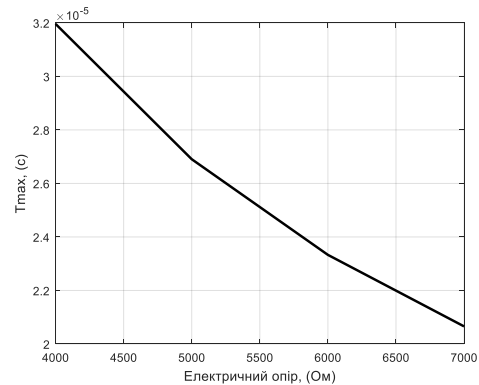


Рис. 3. Вплив опору розрядного ланцюга на момент часу, який відповідає максимальному значенню струму в режимі аперіодичного розряду

На рис. 4 представлені результати розрахунку електричної ємності, отримані за допомогою виразу (4). Зазначені результати були отримані при обробці кривих струму розряду і напруги, без будь-яких обмежень певними моментами часу і при припущенні, що значення напруги на невідомій ємності доступне для прямих вимірювань. Розрядний струм визначався згідно із (7), залежність напруги від досліджуваної ємності від часу визначали за допомогою (10).

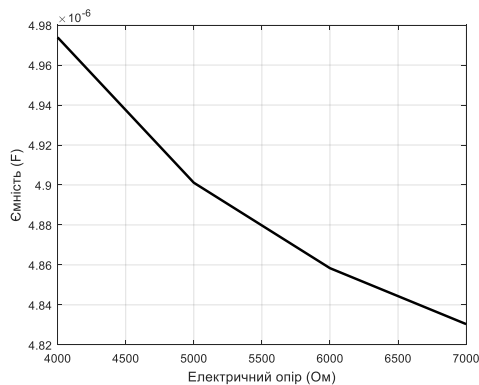


Рис. 4. Вплив опору розрядного кола на величину розрахункової електричної ємності

На рис. 5 представлений вплив опору розрядного ланцюга на точність оцінки ємності.

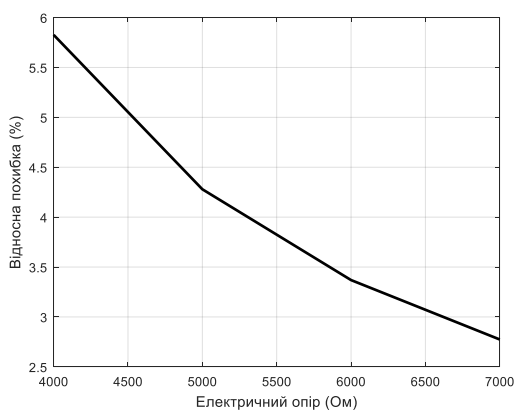


Рис. 5. Вплив опору розрядної ланцюга на точність оцінки електричної ємності.

На рис. 6 представлені подібні до рис. 4 результати. Однак у цьому випадку результати були отримані шляхом опрацювання кривих струму розряду та напруги, обмежених моментами часу, які відповідають максимальному значенню розрядного струму та закінченню перехідного процесу.

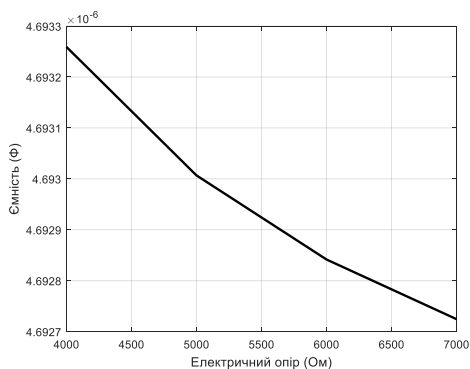


Рис. 6. Моделювання впливу опору розрядного кола на точність оцінки електричної ємності для обмежених у часі кривих струму та напруги

На рис. 7 представлені значення відносної похибки оцінювання ємності для даних на рис. 6.

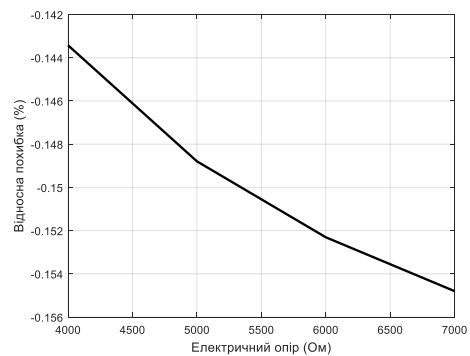
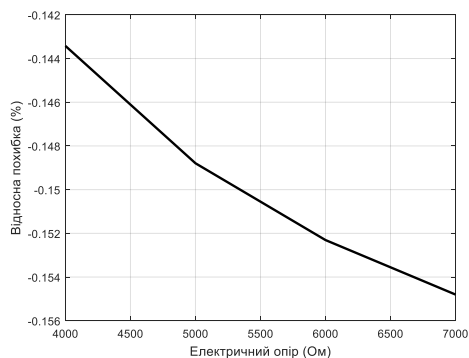
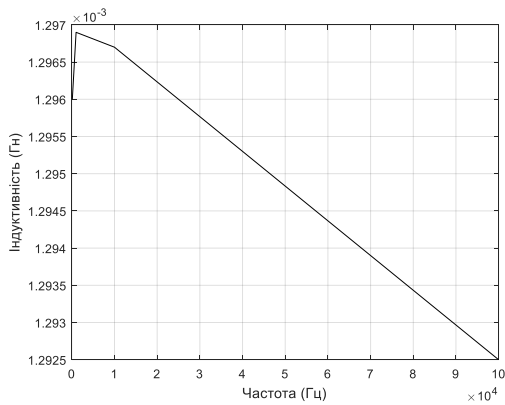
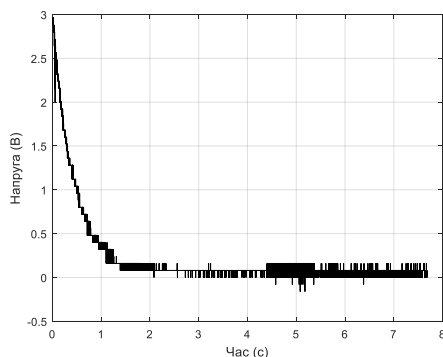


Рис. 7. Відносна похибка оцінки ємності для різних значень опору розрядного кола для обмежених у часі кривих струму та напруги

З даних на рис. 6 та рис. 7 можна зробити висновок, що обмеження опрацьованих даних моментами, що відповідають максимальному значенню струму розряду та завершенню перехідного процесу, призводить до підвищення точності оцінки електричної ємності. За результатами проведеного моделювання збільшення опору розрядного контуру дозволяє зменшити вплив паразитної індуктивності на точність проведених вимірювань. Отже, збільшення тривалості сигналів, спричинене збільшенням опору розрядного ланцюга, дозволяє зменшити негативний вплив паразитної індуктивності на точність проведених вимірювань, оскільки додатковий опір призводить до більш плавної форми кривої розрядного струму в період часу, що обмежений моментами які відповідають максимальному значенню розрядного струму та закінченню перехідного процесу, а отже, зменшенню падіння напруги на паразитній індуктивності досліджуваного об'єкта в цей період часу. Експериментальна реалізація описаного методу для оцінки електричної ємності була проведена шляхом аналізу процесів розряду, спричинених аперіодичним розрядом поліпропіленового конденсатора із ємністю 4,737 мкФ. Для зменшення можливого впливу втрат потужності на точність вимірювання ємності це значення електричної ємності було виміряне за значення частоти прикладеної напруги, що складало 100 Гц. Паразитна індуктивність досліджуваного об'єкта була імітована послідовним підключенням циліндричної котушки індуктивності до досліджуваного конденсатора. Значення опору  $R_2$  було обрано рівним 97,93 кОм. На точність описаного методу, очевидно, впливає можлива частотна залежність параметрів еквівалентної схеми, описаної на рис. 1. Оскільки розглянутий режим розряду, зазвичай, може бути описаний досить широким спектром частот, на точність оцінки електричної ємності також можуть впливати часові залежності параметрів розрядного кола. Необхідно підкреслити, що обидва ці типи залежностей не були враховані в запропонованій методиці оцінки електричної ємності. На рис. 8-9 представлені частотні залежності індуктивності та опору котушки  $R_1$ , які були представлені в еквівалентній схемі на рис. 1 при вимірюваннях електричної ємності.

Рис. 8. Частотна залежність  $R_1$ Рис. 9. Частотна залежність  $L_1$ 

На рис. 10 представлена залежність напруги на перетворювачі розрядного струму в напругу, який використовувався для оцінки електричної ємності.

Рис. 10. Залежність падіння напруги від часу  $R_2$  обмежена моментом часу, що відповідає максимальному значенню струму в розрядному контурі.

Залежність падіння напруги на  $R_2$ , що представлена на рис. 10, була опрацьована за раніше описаною методикою. Похідна за часом була визначена із застосуванням кінцевих різниць. За результатами проведеної обробки, яка проводилась без урахування опору  $R_1$ , тобто застосовуючи підхід для оцінки електричної ємності, який можна виразити формулою (6), значення електричної ємності виявилось рівним 6,3408 мкФ. Після врахування величини електричного опору досліджуваного об'єкта  $R_1$  згідно із виразом (7) величина розрахованої електричної ємності зросла до 6,3415 мкФ. Отже, ці два приклади практичного застосування описаної методики для оцінки електричної ємності показали досить значну розбіжність між оці-

неними значеннями ємності та точним значенням електричної ємності, яке дорівнювало 4,737 мкФ. Основна причина такої істотної втрати точності зумовлена тим, що на практиці при обробці цифрових осцилограм на точність вимірювань впливають шуми в отриманих осцилограмах, які можуть істотно спотворити отриману похідну за часом. Такий негативний вплив шумів, які чітко можна спостерігати на рис. 10, можна проілюструвати даними, представленими на рис. 11.

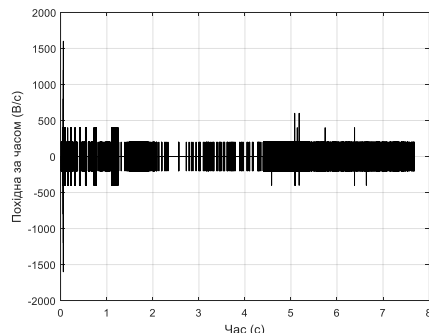


Рис. 11 Похідна за часом, отримана за допомогою кінцевих різниць, взятих від напруги на виході перетворювача струму в напругу, що представлена на рис. 10

Негативний вплив шумів на точність визначення похідної за часом можна усунути після згладжування падіння напруги на  $R_2$  за методом найменших квадратів. У цьому випадку залежність напруги на  $R_2$  від часу, представлена на рис.10, може бути виражена як:

$$U(t) = ae^{bt}, \quad (11)$$

де  $a$  дорівнює 2,904, а  $b$  дорівнює -2,13. Після такої обробки отриманих даних та застосування виразу (4) значення розрахункової електричної ємності виявилось рівним 4,7959 мкФ. У цьому випадку значення відносної похибки дорівнювало 2,04%.

**Висновки.** Зменшення впливу паразитної індуктивності досліджуваного об'єкта на точність проведених вимірювань досягається правильним підбором тривалості проаналізованих сигналів, які представлені часовими залежностями розрядного струму та напруги на ємності. Ця тривалість повинна бути обмежена моментом часу, який відповідає максимальному значенню розрядного струму, і моментом часу, який відповідає завершенню перехідних процесів. Такий підбір даних вимірювань дозволяє зменшити вплив паразитної індуктивності на точність вимірювань, оскільки найбільш значний вплив паразитної індуктивності, зазвичай, спостерігається в проміжок часу від початку перехідного періоду до моменту часу, який відповідає максимальному значенню розрядного струму. На точність описаного методу оцінки електричної ємності впливають шумові компоненти отриманих осцилограм. Цей негативний вплив можна зменшити, згладжуючи сигнали, із застосуванням методу найменших квадратів.

#### Список літератури

- 1 Kornhuber, J., Markalous, S., Muhr, M., Strehl, T., Sumereder, C. (2009). Comparison of methods for the dissipation factor measurement at practical examples. In Proceedings of the 16<sup>th</sup> International



- Symposium on High Voltage Engineering, 24-28 August 2009 (pp. 144). Cape Town, South Africa.
- 2 Atika Arshad, Ruman Tasnim, Zahirul Alam, A.H.M., Sheraz Khan, Low value capacitance measurement system for the application of monitoring human body. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016. Vol. 11, No. 1, P. 327-330.
  - 3 Ziqiang Cui, Chengyi Yang, Benyuan Sun, Huaxiang Wang. Liquid film thickness estimation using electrical capacitance tomography. *Measurement Science Review*, 2014. Vol. 14, No. 1, P. 8-15.
  - 4 Zubair Muhammad, Tong Boon Tang, A high resolution capacitive sensing system for the measurement of water content in crude oil. *Sensors*, 2014. Vol. 14. P. 11351-11361.
  - 5 Filipovich-Grichich, B., Filipovich-Grichich, D., Gabrich, P. Estimation of load capacitance and stray inductance in lightning impulse voltage test circuits. *Electric Power Systems Research*, 2015. Vol. 119, 439-446.
  - 6 Arcue, H., Mijarez, O.D., Estevanot, L.A. A wide range time constant measuring technique. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1974. Vol. 23, No. 1, P. 49-52.
  - 7 Rathore, T.S. A novel backlash circuit and scheme for capacitance measurement. *IETE Technical Review*, 1984. No. 1, P. 110.
  - 8 Roj, J., Cichy, A. (). Method of measurement of capacitance and dielectric loss factor using artificial neural networks. *Measurement Science Review*, 2015. Vol. 15, No. 3, P. 127-131.
  - 9 Raven, M.S., Raven, D. New approaches to the direct measurement of capacitance. *Electrocomponent Science and Technology*, 1977. No. 4, P. 37-42.
  - 10 Cichy, A. Methods of synthesis of quasi-balanced circuits for measuring of impedance components. *Elektronika ir Electrotechnika*, 2016. Vol. 22. No. 2, P. 38-42.
  - 11 Skorkowski, A., Cichy, A. (2009). Virtual capacitance meter based on impedance modulus measurement. In Proceedings of the XIX IMECO World Congress Fundamental and Applied Metrology, 6-11 September 2009 (pp. 648-651). Lisbon, Portugal.
  - 12 Bera, S.C., Chattopadhyay, S. A modified Shering bridge for measurement of the dielectric parameters of a material and the capacitance of a capacitive transducer. *Measurement*, 2003. Vol. 33, P. 3-7.
  - 13 Ingalls, M., Kent, G. Monolithic capacitors as transmission lines. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, MTT-35 1987 . No. 11, P. 964-970.
  - 14 Siami, S., Daude, N., Joubert, Ch., Merle, P. (1998). Minimization of the stray inductance in metalized capacitors: Connections and winding geometry dependence. *The European Physical Journal Applied Physics*, 4, 37-43.
  - 15 Joubert, Ch., Beroual, A., Rojat, G. (1994). Magnetic field and current distribution in metalized capacitors. *Journal of Applied Physics*, 4, 37-43.
  - 16 Wong, C.S. (1986). Effect of stray inductance on capacitive voltage divider. *Journal of Applied Physics*, 59, 673-675.
  - 17 Massarini, A., Kazimierczuk, M.K. (1997). Self-capacitance of inductors. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 12 (4), 671-676.
  - 18 Dalessandro, A., Fabiana da Silveira Cavalcante, Kolar, J.V. (2007). Self-capacitance of high-voltage transformers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 22 (5), 2081-2092.
  - 19 Mariscotti, A. (2011). Measuring the stray capacitance of solenoids with a transmitting and a receiving coil. *Metrology and Measurement Systems*, 18 (1), 47-56.
  - 20 Nejman, L.R., Demirchjan, K.S. (1967). *Theoretical foundations of electrical engineering*. Energiia. (Rus).
- ment at practical examples. In Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, 24-28 August 2009 (pp. 144). Cape Town, South Africa.
- 2 Atika Arshad, Ruman Tasnim, Zahirul Alam, A.H.M., Sheraz Khan, Low value capacitance measurement system for the application of monitoring human body. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016. Vol. 11, No. 1, P. 327-330.
  - 3 Ziqiang Cui, Chengyi Yang, Benyuan Sun, Huaxiang Wang. Liquid film thickness estimation using electrical capacitance tomography. *Measurement Science Review*, 2014. Vol. 14, No. 1, P. 8-15.
  - 4 Zubair Muhammad, Tong Boon Tang, A high resolution capacitive sensing system for the measurement of water content in crude oil. *Sensors*, 2014. Vol. 14. P. 11351-11361.
  - 5 Filipovich-Grichich, B., Filipovich-Grichich, D., Gabrich, P. Estimation of load capacitance and stray inductance in lightning impulse voltage test circuits. *Electric Power Systems Research*, 2015. Vol. 119, 439-446.
  - 6 Arcue, H., Mijarez, O.D., Estevanot, L.A. A wide range time constant measuring technique. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1974. Vol. 23, No. 1, P. 49-52.
  - 7 Rathore, T.S. A novel backlash circuit and scheme for capacitance measurement. *IETE Technical Review*, 1984. No. 1, P. 110.
  - 8 Roj, J., Cichy, A. (). Method of measurement of capacitance and dielectric loss factor using artificial neural networks. *Measurement Science Review*, 2015. Vol. 15, No. 3, P. 127-131.
  - 9 Raven, M.S., Raven, D. New approaches to the direct measurement of capacitance. *Electrocomponent Science and Technology*, 1977. No. 4, P. 37-42.
  - 10 Cichy, A. Methods of synthesis of quasi-balanced circuits for measuring of impedance components. *Elektronika ir Electrotechnika*, 2016. Vol. 22. No. 2, P. 38-42.
  - 11 Skorkowski, A., Cichy, A. (2009). Virtual capacitance meter based on impedance modulus measurement. In Proceedings of the XIX IMECO World Congress Fundamental and Applied Metrology, 6-11 September 2009 (pp. 648-651). Lisbon, Portugal.
  - 12 Bera, S.C., Chattopadhyay, S. A modified Shering bridge for measurement of the dielectric parameters of a material and the capacitance of a capacitive transducer. *Measurement*, 2003. Vol. 33, P. 3-7.
  - 13 Ingalls, M., Kent, G. Monolithic capacitors as transmission lines. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, MTT-35 1987 . No. 11, P. 964-970.
  - 14 Siami, S., Daude, N., Joubert, Ch., Merle, P. (1998). Minimization of the stray inductance in metalized capacitors: Connections and winding geometry dependence. *The European Physical Journal Applied Physics*, 4, 37-43.
  - 15 Joubert, Ch., Beroual, A., Rojat, G. (1994). Magnetic field and current distribution in metalized capacitors. *Journal of Applied Physics*, 4, 37-43.
  - 16 Wong, C.S. (1986). Effect of stray inductance on capacitive voltage divider. *Journal of Applied Physics*, 59, 673-675.
  - 17 Massarini, A., Kazimierczuk, M.K. (1997). Self-capacitance of inductors. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 12 (4), 671-676.
  - 18 Dalessandro, A., Fabiana da Silveira Cavalcante, Kolar, J.V. (2007). Self-capacitance of high-voltage transformers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 22 (5), 2081-2092.
  - 19 Mariscotti, A. (2011). Measuring the stray capacitance of solenoids with a transmitting and a receiving coil. *Metrology and Measurement Systems*, 18 (1), 47-56.
  - 20 Nejman, L.R., Demirchjan, K.S. (1967). *Theoretical foundations of electrical engineering*. Energiia. (Rus).

#### References (transliterated)

- 1 Kornhuber, J., Markalous, S., Muhr, M., Strehl, T., Sumereder, C. (2009). Comparison of methods for the dissipation factor measure-

Поступила (received) 01.06.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Костюков Іван Олександрович (Костюков Иван Александрович, Kostjukov Ivan Aleksandrovich)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри електроізоляційної та кабельної техніки НТУ «ХПІ» м. Харків; e-mail iakostiukow@gmail.com

**Москвітін Євген Сергійович (Москвитин Евгений Сергеевич, Moskvitin Evgenij Sergeevich)** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри електроізоляційної та кабельної техніки НТУ «ХПІ» м. Харків.

**В.П. КАЛІНЧИК, В.А. ПОБІГАЙЛО, В.В. КАЛІНЧИК, Д.В. ФІЛЯНІН**

### ПОХИБКИ КАНАЛІВ ВИМІРЮВАННЯ В СИСТЕМАХ ОБЛІКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

В статті проаналізовані структури вимірювальних каналів систем обліку електроенергії. Показано, що така структура визначається типами використаних засобів вимірювальної техніки та схемою їх з'єднання, зокрема типами встановлених в точках обліку лічильників електроенергії. Причому лічильники можуть мати імпульсний або інтерфейсний інформаційний вихід. Показано, що тракт вимірювань та обліку електроенергії включає в себе вимірювальну схему що складається із вимірювальних трансформаторів струму і напруги, лічильника електроенергії, ліній зв'язку, пристрою обліку та пристрою збору даних. Застосовано метод, заснований на нормуванні метрологічних характеристик окремих елементів вимірювального тракту і синтез їх на основі метрологічної характеристики всієї системи обліку електроенергії. Для розрахунку сумарної похибки вимірювального каналу використовуються формула, яка враховує тільки похибки вимірювальної схеми. Показано, що в останні роки спостерігається тенденція, коли вимірювальні трансформатори струму і, відповідно, лічильники електроенергії працюють в режимі малих струмових навантажень. Похибки елементів вимірювального тракту у цьому випадку маловивчені. Приведені графіки похибок трансформаторів струму в залежності від струмів навантаження. Показано, що значення похибок трансформаторів струму змінюються від величини струму навантаження і знаходяться в області негативних значень. Тому неправильний вибір трансформаторів струму може призвести до істотного недообліку електроенергії. Похибки трансформаторів напруги залежать в основному від навантаження на вторинну обмотку і на сумарну похибку суттєвого не впливають. Приведена результуюча похибка вимірювального тракту трансформатор струму – трансформатор напруги – лічильник електроенергії в області малих навантажень. Зміна похибок в області малих навантажень призводить до серйозних метрологічних втрат (недообліку електроенергії). При автоматизації обліку електроенергії приведені графіки зміни похибок в області малих навантажень можуть служити основою для корекції похибок вимірювальних трактів.

**Ключові слова:** електроенергія, облік, похибки, трансформатор струму, трансформатор напруги, лічильник

**В.П. КАЛИНЧИК, В.А. ПОБЕГАЙЛО, В.В. КАЛИНЧИК, Д.В. ФИЛЯНИН**

### ПОГРЕШНОСТИ КАНАЛОВ ИЗМЕРЕНИЯ В СИСТЕМАХ УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В статье проанализированы структуры измерительных каналов систем учета электроэнергии. Показано, что такая структура определяется типами использованных средств измерительной техники и схемой их соединения, в частности типами установленных в точках учета счетчиков электроэнергии. Причем счетчики могут иметь импульсный или интерфейсный информационный выход. Показано, что тракт измерений и учета электроэнергии включает в себя измерительную схему состоящую из измерительных трансформаторов тока и напряжения, счетчика электроэнергии, линий связи, устройства учета и устройства сбора данных. Применен метод, основанный на нормировании метрологических характеристик отдельных элементов измерительного тракта и синтез их на основе метрологической характеристики всей системы учета электроэнергии. Для расчета суммарной погрешности измерительного канала используются формула, которая учитывает только погрешности измерительной схемы. Показано, что в последние годы наблюдается тенденция, когда измерительные трансформаторы тока и, соответственно, счетчики электроэнергии работают в режиме малых токовых нагрузок. Погрешности элементов измерительного тракта в этом случае малоизученные. Приведены графики погрешностей трансформаторов тока в зависимости от токов нагрузки. Показано, что значения погрешностей трансформаторов тока меняются от величины тока нагрузки и находятся в области отрицательных значений. Поэтому неправильный выбор трансформаторов тока может привести к существенному недоучету электроэнергии. Погрешности трансформаторов напряжения зависят в основном от нагрузки на вторичную обмотку и на суммарную погрешность существенного не влияют. Приведена результирующая погрешность измерительного тракта трансформатор тока - трансформатор напряжения - счетчик электроэнергии в области малых нагрузок. Изменение ошибок в области малых нагрузок приводит к серьезным метрологическим потерям (недоучету электроэнергии). При автоматизации учета электроэнергии приведены графики изменения погрешностей в области малых нагрузок могут служить основой для коррекции погрешности измерительных трактов.

**Ключевые слова:** электроэнергия, учет, погрешности, трансформатор тока, трансформатор напряжения, счетчик

**V.P. KALINCHUK, V.A. POBIGHAILO, V.V. KALINCHUK, D.V. FILIANIN**

### USE OF STATISTICAL ANALYSIS METHODS IN PROCESSING POPULATION SURVEY DATA

The article analyzes the structures of the measuring channels of electricity metering systems. It is shown that such a structure is determined by the types of measuring instruments used and the scheme of their connection, in particular, by the types of electricity meters installed at the metering points. Moreover, the counters can have a pulse or interface information output. It is shown that the path for measuring and metering electricity includes a measuring circuit consisting of measuring current and voltage transformers, an electricity meter, communication lines, a metering device and a data collection device. The applied method is based on the standardization of the metrological characteristics of individual elements of the measuring path and their synthesis based on the metrological characteristics of the entire electricity metering system. To calculate the total error of the measuring channel, a formula is used that takes into account only the errors of the measuring circuit. It is shown that in recent years there has been a tendency when measuring current transformers and, accordingly, electricity meters operate in the mode of low current loads. In this case, the errors of the elements of the measuring path are poorly studied. The graphs of errors of current transformers depending on load currents are given. It is shown that the values of the errors of current transformers vary with the magnitude of the load current and are in the region of negative values. Therefore, the wrong choice of current transformers can lead to a significant underestimation of electricity. The errors of voltage transformers depend mainly on the load on the secondary winding and do not significantly affect the total error. The resulting error of the measuring path current transformer - voltage transformer - electricity meter in the area of low loads is given. A change in errors in the area of low loads leads to serious metrological losses (underpayment of electricity). In the automation of electricity metering, graphs of changes in errors in the area of low loads are presented, which can serve as a basis for correcting the error of the measuring paths.

**Key words:** electricity, metering, errors, current transformer, voltage transformer, meter

**Вступ.** Структура вимірювальних каналів (ВК) та обліку електроенергії визначається типами використаних засобів вимірювальної техніки та схемою їх

з'єднання, зокрема типами встановлених в точках обліку лічильників електроенергії. До структури ВК відносяться канали, що мають в своєму складі лічиль-

© В.П. Калінчик, В.А. Побігайло, В.В. Калінчик, Д.В. Філянin, 2021

ники з імпульсними або із інтерфейсними виходами.

**Метою роботи** є формування метрологічних характеристик вимірювальних каналів обліку електроенергії.

**Викладення основного матеріалу.** У системах управління електроспоживанням тракт вимірювань та обліку електроенергії включає в себе (рис. 1): вимірювальну схему (ВС), що складається з вимірювальних трансформаторів струму (ТС) і напруги (ТН), лі-

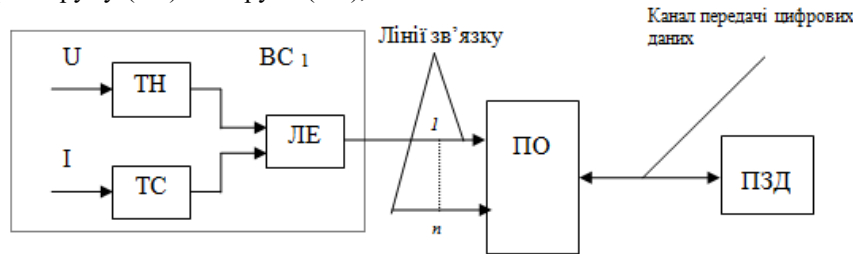


Рис. 1. Схема тракту вимірювань та обліку електроенергії

$$|\Delta W_n| \leq |\Delta W| \leq |\Delta W_B|, \quad (1)$$

де  $\Delta W$  – сумарна абсолютна похибка вимірювання кількості електроенергії ВК;  $\Delta W_B$ ,  $\Delta W_n$  – верхня і нижня межі похибки результату вимірювань, відповідно.

Сумарна абсолютна похибка  $\Delta W$  вимірювання кількості електроенергії  $W$  в кВт\*год, визначається як

$$\Delta W = \pm \delta_{BK} \frac{W}{100}, \quad (2)$$

де  $\delta_{BK}$  – сумарна відносна похибка ВК, %, обумовлена як сукупність окремих похибок засобів вимірювань, формуючих вимірювальний канал.

У більшості випадків для розрахунку сумарної похибки ВК можна користуватися формулою [1, 2, 6]

$$\delta_{BK} = \pm 1,1 \sqrt{\delta_{TC}^2 + \delta_{TN}^2 + \delta_d^2 + \delta_{ЛЕ}^2}, \quad (3)$$

яка враховує тільки похибки вимірювальної схеми.

В останні роки спостерігається тенденція, коли вимірювальні ТС і, відповідно, ЛЕ працюють в режимі малих струмових навантажень. Похибки елементів тракту вимірювань у цьому випадку маловивчені.

На рис. 2 показані графіки похибок трансформаторів струму в залежності від струмів навантаження. Видно, що значення похибок ТС змінюються від величини струму навантаження і знаходяться в області негативних значень. Тому неправильний вибір ТС може призвести до істотного недообліку електроенергії.

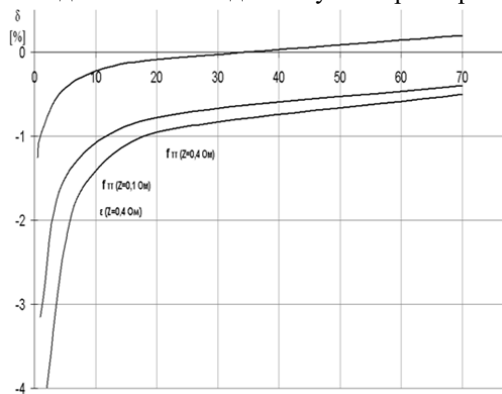


Рис. 2. Графіки похибок трансформаторів струму в залежності від струмів навантаження

чильника електроенергії (ЛЕ), ліній зв'язку між ТТ, ТН і ЛЕ; пристрою обліку (ПО) та пристрою збору даних (ПЗД). В інформаційно-керуючих системах електроспоживання найбільшого поширення набув метод, заснований на нормуванні метрологічних характеристик окремих елементів вимірювального тракту і синтез їх на основі метрологічної характеристики всієї системи [1, 2, 6].

На рис. 3 показаний графік похибок лічильників електроенергії в залежності від струмів навантаження.

Видно, що в області 10%  $I_{ном}$  і більше навантажувальна характеристика лічильника відповідає піковій.

При малих навантаженнях характеристика сильно йде в область великих негативних значень. Встановлено [3, 7], що похибки лічильників розподіляються по антимодальному закону. Це пов'язано з тим, що джерелом похибок є керований людиною процес налагодження і регулювання лічильника (особливо після ремонту), що призводить до нестійкої роботи лічильника в режимі малих навантажень.

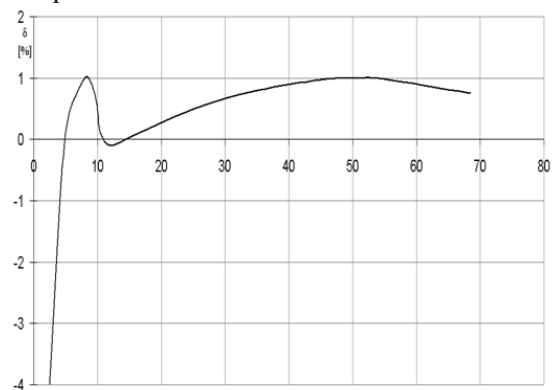


Рис. 3. Графік похибок лічильників електроенергії в залежності від струмів навантаження

Похибки трансформаторів напруги залежать в основному від навантаження на вторинну обмотку і не перевищують 2 %.

На рис. 4 показана результуюча похибка вимірювального тракту (ТС-ТН-ЛЕ) в області малих навантажень.

Така зміна похибок в області малих навантажень призводить до серйозних метрологічних втрат (недообліку електроенергії).

За даними [3] тільки в лініях 10 кВ метрологічні втрати складають понад 63 млн. кВт\*год на рік.

Тому аналіз завантаження вимірювальних трактів (ТС-ТН-ЛЕ) повинен бути обов'язковим. І, в першу

чергу, необхідна заміна ТС, які працюють із малим навантаженням.

При автоматизації обліку електроенергії дані (див. рис. 4) можуть служити основою для корекції похибки вимірювальних трактив, а оцінка навантаження в довільний момент часу може бути отримана по вихідній послідовності імпульсів.

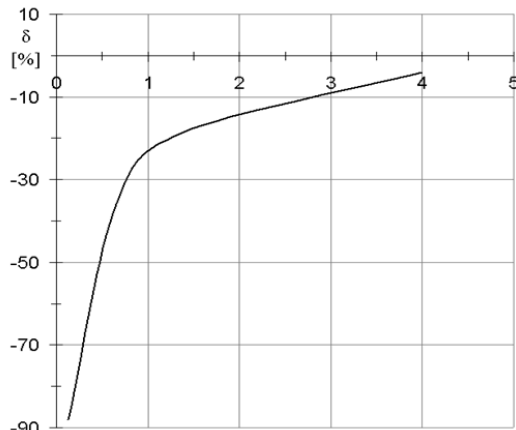


Рис. 4. Результуюча похибка вимірювального тракту (ТС - ТН - ЛЕ) в області малих навантажень

Оцінки похибок при дискретному представленні інформації (від датчиків імпульсів) досить докладно дані в [1, 4, 5, 7]. Похибки дискретного представлення при тривалому вимірі витрат електроенергії не приводять до метрологічних втрат.

**Висновки.** Значне збільшення похибки вимірювального тракту (ТС-ТН-ЛЕ) в області малих навантажень призводить до серйозних метрологічних втрат (недообліку електроенергії). Тому аналіз завантаження вимірювальних трактив (ТС-ТН-ЛЕ) повинен бути обов'язковим. При автоматизації обліку електроенергії графіки зміни похибок в області малих навантажень можуть служити основою для корекції похибки вимірювальних трактив.

#### Список літератури

1. Праховник А.В., Калінчик В.П., Прокопєв В.И. Основные положения Концепции и технических требований к системам коммерческого учета электроэнергии в условиях Энергорынка // Матеріали 3-ої науково – практичної конференції «Метрологічне забезпечення обліку електричної енергії в Україні». – Київ. – 2001. – С. 27-35.
2. Концепція побудови автоматизованих систем обліку електроенергії в умовах енергоринку // Праховник А.В., Калінчик В.П.,

Тимошенко Ю.В. та інші. - Інформаційний бюлетень НКРЕ. - 2002. - № 11. - С. 230-261.

3. Гладков Ю.В. Метрологические потери в сетях энергосистем и их оценка // Энергетика. Изв. вузов СССР. – 1986. - № 10. - С. 28-33.
4. Забелло Е.П. Алгоритмические и технические проблемы построения многоуровневых сетей учета, контроля и управления электропотреблением: Дис... д-ра техн. наук: 05.14.02, 05.13.07 / АН Украины. Ин-т электродинамики. – К.: 1992. - 446 с.
5. Калінчик В.П., Кульбачний П.В., Прокопенко В.В., Несен Л.И. Аналіз вимірювальних каналів систем обліку електроенергії / Матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи. - Київ. – 2015. – С. 224 – 225.
6. Pobigaylo V., Kalinchyk V. Building a picture recognition system in short circuit current devices. Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія» № 2 (2020). - Київ. – 2020, С. 103-120.
7. Калінчик В.П., Побігайло В.А. Пристрій керування обмеженням струмів короткого замикання для підвищення ефективності електропостачальних виробничих систем. Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія» № 1 (2020). - Київ. – 2020, С. 39-46.

#### References (transliterated)

1. Prahovnik A.V., Kalinchik V.P., Prokopec V.I. Osnovnye polozheniya Konceptcii i tehniceskikh trebovanij k sistemam kommercheskogo ucheta jelektrojenergii v uslovijah Jenergorynka. Materiali 3-oї naukovo – praktichnoї konferencii «Metrologichne zabezpechennja obliku elektrichnoї energii v Ukraїni». – Kyiv. – 2001. – Pp. 27 – 35.
2. Prakhovnyk A.V., Kalinchyk V.P., Tymoshenko Yu.V. ta inshi. Kontseptsii i tehniceskikh trebovanij k sistemam obliku elektroenerhii v umovakh enerhorynku. - Informatsiyni biuletен NKRE. - 2002. - 11. - Pp. 230-261.
3. Gladkov Ju.V. Metrologicheskie poteri v setjah jenergosistem i ih oцenka. Jenergetika. Izv. vuzov SSSR. – 1986. - 10, - Pp. 28-33.
4. Zabello E.P. Algoritmicheskie i tehniceskije problemy postroenija mnogourovnevnyh setej ucheta, kontrolja i upravlenija jelektropotrebleniem: Dis... d-ra tehn. nauk: 05.14.02, 05.13.07. AN Ukrainy. In-t jelektrodinamiki. – Kyiv: 1992.- 446 p.
5. Kalinchyk V.P., Kulbachnyi P.V., Prokopenko V.V., Nesen L.I. Analiz vymiruvalnykh kanaliv sistem obliku elektroenerhii. Materialy KhIV Mizhnarodnoї naukovo-tehnicnoї konferencii «PRYLADOBUDUVANNIA: stan i perspektivy. - Kyiv. – 2015. – Pp. 224 – 225.
6. Pobigaylo V., Kalinchyk V. Building a picture recognition system in short circuit current devices. Naukovyi zhurnal «Enerhetyka: ekonomika, tehnolohii, ekolohiia». 2 (2020). - Kyiv. – 2020, Pp. 103-120.
7. Kalinchyk V.P., Pobihailo V.A. Prystrii keruvannia obmezheniam strumiv korotkoho zamykannia dlia pidvyshchennia efektyvnosti el-ektropostachalnykh vyrobnychychk system. Naukovyi zhurnal «Enerhetyka: ekonomika, tehnolohii, ekolohiia». 1 (2020). - Kyiv. – 2020, Pp. 39-46.

Поступила (received) 01.06.2021

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Калінчик Василь Прокопович (Калінчик Василь Прокоп'євич, Kalinchik Vasilij Prokop'evich)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України КПІ ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри електропостачання; м. Київ.

**Побігайло Віталій Анатолійович (Побігайло Віталій Анатольєвич, Pobigaylo Vitaliy Anatolievich)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України КПІ ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри електропостачання; м. Київ; тел.: (097) 308-88-95; e-mail: pobigaylo@gmail.com.

**Калінчик Віталій Васильович (Калінчик Віталій Васильєвич, Kalinchyk Vitaliy Vasilivich)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України КПІ ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри електропостачання; м. Київ, тел.: (067) 209-87-26.

**Філянін Данило Володимирович (Філянін Данил Владимирович, Filjanin Daniil Vladimirovich)** – аспірант, Національний технічний університет України КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра електропостачання; м. Київ.

## ЗМІСТ

## ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

<i>Байда Є.І., Король О.Г.</i> Порівняльний аналіз електромеханічних процесів у індукційно-динамічному перетворювачі з рухомим індуктором та двома дисками .....	3
<i>Байда Є.І., Челюк О.О.</i> Удосконалений метод визначення сталої температури та постійної часу нагріву електричних апаратів .....	8
<i>Зорін Є.Ю., Челюк О.О., Грищук Ю.С., Леценко В.М.</i> Аналіз конструктивних особливостей бістабільних електромагнітних реле .....	13
<i>Лелюк М.А., Литвиненко В.В.</i> Вакуумний вимикач середніх напруг з пофазним електромагнітним приводом .....	21

## ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

<i>Гребеніков В.В., Гамалія Р.В., Попков В.С.</i> Електрогенератор з постійними магнітами і осьовим магнітним потоком для вітроустановок .....	26
<i>Лихогуб А.П., Коваленко М.А., Ткачук І.В., Гончарук А.О.</i> Параметрична оптимізація торцевого магнітоелектричного генератора із подвійним статором.....	33
<i>Михайленко В.В., Святненко В.А., Чуняк Ю.М., Бачинський В.І.</i> Дослідження процесів у перетворювачі з чотиризонним регулюванням напруги і електромеханічним навантаженням .....	39
<i>Ткачук І.В., Коваленко М.А.</i> Електромагнітні редуктори в електромеханічних системах.....	42

## ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

<i>Гончаров Е.В., Крюкова Н.В., Марков В.С., Поляков І.В.</i> Об определении понятия «реактивная мощность» .....	47
<i>Костюков І.О., Москвітін Є.С.</i> Зменшення впливу паразитної індуктивності досліджуваного об'єкта контролю на точність вимірювання його електричної ємності.....	52

## ЕЛЕКТРИЧНІ СТАНЦІЇ І МЕРЕЖІ

<i>Калінчик В.П., Побігайло В.А., Калінчик В.В., Філянін Д.В.</i> Похибки каналів вимірювання в системах обліку електроенергії .....	58
--	----

## CONTENT

## ELECTRIC APPARATUS

<i>Baida Ye.I., Korol O.G.</i> Comparative analysis of electromechanical processes in induction-dynamic converter with mobile inductor and two disks .....	3
<i>Baida E.I., Chelyuk O.O.</i> Advanced method for determining the steady temperature and constant heating time of electric apparatus .....	8
<i>Zorin Y.Y., Chepelyuk O.O., Hryshchuk Y.S., Leshchenko V.M.</i> Analysis of bistable electromagnetic relays design features .....	13
<i>Leliuk M.A., Lytvynenko V.V.</i> Medium voltage vacuum circuit breaker with per phase electromagnetic actuator .....	21

## ELECTRIC MACHINES

<i>Grebenikov V.V., Gamaliia R.V., Popkov V.S.</i> Permanent magnet generator with axial magnetic flow for wind plants.....	26
<i>Lykhhohub A.P., Kovalenko M.A., Tkachuk I.V., Honcharuk A.O.</i> Parametric optimization of magnetoelectric generator with double stator .....	33
<i>Mykhailenko V.V., Sviatnenko V.A., Chuniak J.M., Bachynskiy V.I.</i> Research of processes in a converter with four-zone voltage regulation and electromechanical load .....	39
<i>Tkachuk I.V., Kovalenko M.A.</i> Electromagnetic reducers in electromechanical systems.....	42

## THEORETICAL ELECTRICAL ENGINEERING

<i>Honcharov E.V., Kruykova N.V., Markov V.S., Polyakov I.V.</i> A definition of the "reactive power" concept.....	47
<i>Kostiukov I., Moskvitin E.</i> The decreasing of the influence of parasitic inductance of tested object on the accuracy of its electrical capacitance measurement .....	52

## POWER STATIONS AND GRIDS

<i>Kalinchik V.P., Pobihailo V.A., Kalinchuk V.V., Filianin D.V.</i> Use of statistical analysis methods in processing population survey data .....	58
---	----

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХП».**  
**СЕРІЯ: ПРОБЛЕМИ УДОСКОНАЛЮВАННЯ**  
**ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН І АПАРАТІВ.**  
**ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА**

*Збірник наукових праць*

№ 1 (5) 2021

Головний редактор Є.І. Байда, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХП», Україна  
Відповідальний секретар: І. С. Варшамова, НТУ «ХП», Україна  
Технічний редактор: Н. Р. Злуніцина, НТУ «ХП», Україна

**АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ ТА ВИДАВЦЯ:** 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХП».  
Кафедра "Електричні апарати"  
Тел.: (057) 707-69-76; e-mail: pema@gmail.com

Підп. до друку 25.05.2021 р. Формат 60×90 1/8. Папір офсетний.  
Друк лазерний. Умов. друк. арк. 9,25.  
Тираж 300 пр. Зам. № . Ціна договірна.

---

ТОВ «Друкарня «Мадрид»»  
61024, м. Харків, вул. Максиміліанівська, 11  
Тел.: (057) 756-53-25  
www.madrid.in.ua info@madrid.in.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК №4399 від 27.08.2012 року