

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**

№ 1'2019

No 1'2019

Збірник наукових праць

Collection of Scientific papers

Видання засноване у 1961 р.

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2019

Kharkiv
NTU «KhPI», 2019

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», 2019. – № 1. – 88 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», 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 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»

Founder

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Редакційна колегія

Головний редактор:

Клименко Б. В., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний секретар:

Варшамова І. С., ст. викладач, НТУ «ХПІ», Україна

Члени редколегії:

Баранов М. І., д-р техн. наук, с.н.с., НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ", Харків, Україна;

Байда Є. І., д-р техн. наук, доц., 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;

Серета 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.

Editorial staff

Editor-in-chief:

Klymenko B. V., dr. tech. sc., prof., 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;

Baida E. A., dr. tech. sc., Ph. D. (Eng.), NTU "KhPI", Ukraine;

Kropachok O. Yu., dr. tech. sc., prof., NTU "KhPI", Ukraine;

Plugin V. E., dr. tech. sc., prof., ХНУМГ, Харків, Україна;

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.

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 5 від 23.04.2019 р.

УДК 621.318

doi: 10.20998/2079-3944.2019.1.01

*Е.И. БАЙДА, Б.В. КЛИМЕНКО, Ю.А. ЕЛАНСКИЙ, Я.Б. ФОРКУН***К РАСЧЕТУ ПРОТИВОДЕЙСТВУЮЩИХ СИЛ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО КЛАПАНА С ШАРИКОВЫМ ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ И КАНАЛОМ РАЗГРУЗКИ**

Общее описание темы исследования. Рассматривается предлагаемая авторами возможность повышения быстродействия газораспределительного клапана с шариковым переключающим элементом и каналом разгрузки. **Актуальность темы.** Подобные клапаны широко применяются в различных отраслях, в частности, в аэрокосмической технике, где быстродействие является одной из важнейших характеристик. **Целью статьи** является расчетное обоснование предлагаемой возможности повышения быстродействия клапана, связанной с изменением конфигурации его газодинамической системы, на базе мультифизической модели происходящих в нем процессов, и проведение на основе разработанной модели расчета сил, противодействующих движению якоря электромагнита, на примере одного из клапанов, применяемых в ракетно-космической технике, в исходной и предлагаемой конструкциях клапана. **Метод исследований, научная новизна.** Расчет движения нагретого газового потока базируется на численном решении уравнений Навье – Стокса и уравнения теплового состояния стационарного газового потока с учетом сложных нелинейных зависимостей от температуры основных теплофизических характеристик сжатого газа – плотности, вязкости, теплоемкости и теплопроводности. **Практическая значимость и основные выводы.** Разработанная нелинейная мультифизическая модель течения газового потока позволяет рассчитывать силы, действующие на шариковый переключающий элемент газораспределительного клапана. Расчеты, проведенные на базе данной модели, показывают, что предложенная конфигурация газодинамической системы клапана позволяет существенно (до 30%) уменьшить силы, препятствующие движению якоря электромагнита и, таким образом, повысить быстродействие клапана.

Ключевые слова: газораспределительный электромагнитный клапан, шариковый ключевой элемент, газовый поток, мультифизическая модель, характеристика противодействующих сил.

*Є.І. БАЙДА, Б.В. КЛИМЕНКО, Ю.А. ЕЛАНСЬКИЙ, Я.Б. ФОРКУН***ДО РОЗРАХУНКУ ПРОТИДІЮЧИХ СИЛ ГАЗОРОЗПОДІЛЬНОГО КЛАПАНА З КУЛЬКОВИМ ПЕРЕМІКАЛЬНИМ ЕЛЕМЕНТОМ І КАНАЛОМ РОЗВАНТАЖЕННЯ**

Загальний опис теми дослідження. Розглядається запропонована авторами можливість підвищення швидкодії газорозподільного клапана з кульковим перемикальним елементом і каналом розвантаження. **Актуальність теми.** Подібні клапани широко застосовуються в різних галузях, зокрема, в аерокосмічній техніці, де швидкодія є однією з найважливіших характеристик. **Метою статті** є розрахункове обґрунтування запропонованої можливості підвищення швидкодії клапана, пов'язаної зі зміною конфігурації його газодинамічної системи, на базі мультифізичної моделі процесів, що відбуваються в ньому і проведення на основі розробленої моделі розрахунку сил, які протидіють руху якоря електромагніта, на прикладі одного з клапанів, застосовуваних в ракетно-космічній техніці, у вихідній і запропонованій конструкціях клапана. **Метод досліджень, наукова новизна.** Розрахунок руху нагрітого газового потоку базується на чисельному рішенні рівнянь Нав'є - Стокса і рівняння теплового стану стаціонарного газового потоку з урахуванням складних нелінійних залежностей від температури основних теплофізичних характеристик стисненого газу - щільності, в'язкості, теплоємності і теплопровідності. **Практична значимість і основні висновки.** Розроблена нелінійна мультифізична модель течії газового потоку дозволяє розрахувати сили, що діють на кульковий перемикальний елемент газорозподільного клапана. Розрахунки, проведені на базі даної моделі, показують, що запропонована конфігурація газодинамічної системи клапана дозволяє істотно (до 30%) зменшити сили, що протидіють руху якоря електромагніта і, таким чином, підвищити швидкодію клапана.

Ключові слова: газорозподільний електромагнітний клапан, кульковий ключовий елемент, газовий потік, мультифізична модель, характеристика протидіючих сил.

*E.I. BAIDA, B.V. KLYMENKO, YU.A. YELANSKY, YA.B. FORKUN***TO CALCULATION OF COUNTERING FORCES IN GAS DISTRIBUTION VALVE WITH A BALL SWITCHING ELEMENT AND UNLOADING CHANNEL**

General description of the topic. The possibility of increasing the speed of a gas distribution valve with a ball switching element and a discharge channel, proposed by the authors, is considered. **Relevance of the topic.** Such valves are widely used in various industries, in particular, in aerospace engineering, where performance is one of the most important characteristics. **The aim of the article** is to calculate the rationale for the proposed possibility of increasing valve speed associated with changing the configuration of its gas-dynamic system, based on a multiphysical model of processes occurring in it, and based on the developed model for calculating forces opposing the movement of an electromagnet armature, used in rocket and space technology, in the original and proposed valve designs. **Research method, scientific novelty.** The calculation of the motion of a heated gas flow is based on the numerical solution of the Navier – Stokes equations and the equation of thermal state of a stationary gas flow, taking into account the complex non-linear dependencies on temperature of the main thermophysical characteristics of a compressed gas — density, viscosity, heat capacity and thermal conductivity. **Practical significance and main conclusions.** The developed nonlinear multiphysical model of gas flow allows one to calculate the forces acting on the ball switching element of the gas distribution valve. Calculations made on the basis of this model show that the proposed configuration of the valve's gas-dynamic system allows significantly (up to 30%) to reduce the forces that impede the movement of the armature of the electromagnet and, thus, to increase the valve speed.

Keywords: gas distribution solenoid valve, ball key element, gas flow, multiphysical model, characteristic of opposing forces.

Введение. Среди множества газораспределительных клапанов, которые широко используются в промышленности [1, 2], выделяются клапаны с шариковыми переключающими элементами. Применяются такие клапаны, в частности, в аэрокосмической технике [3 – 7], где одним из основных требований, предъявляемых к ним, является быстродействие. Время срабатывания этих клапанов, управляемых короткоходовыми быстродей-

ствующими электромагнитами, составляет единицы миллисекунд. Для корректного расчета приводного электромагнита необходимо в качестве исходных данных иметь значения противодействующей силы, которую должен преодолеть электромагнит, и которая определяет время срабатывания электромагнита, а вместе с ним – и клапана. Одним из наиболее эффективных способов повышения быстродействия отсечных клапа-

© Е.И. Байда, Б.В. Клименко, Ю.А. Еланский, Я.Б. Форкун, 2019

нов, перекрывающих подачу газа в устройство, управляемое клапаном при подаче питания на обмотку электромагнита, является применение каналов разгрузки, которые обеспечивают подачу входного давления на якорь электромагнита, частично уравнивая давление входного потока [8 - 12].

Особенностью расчета характеристик противодействующих сил клапана является то, что он работает при достаточно высоких давлениях – от нуля в режиме дренажа до 7,5 МПа (75 атм) в рабочем режиме и в широком диапазоне температур рабочего тела (газа) – от 300°C до 1200°C. Это обстоятельство усложняет проведение расчетов в силу сложных нелинейных зависимостей физических характеристик газов от давления и температуры. В данной статье в качестве рабочего тела рассматривается воздух, физические характеристики которого хорошо изучены, а соответствующие зависимости его теплофизических и газодинамических характеристик от температуры и давления представлены в доступных источниках.

Целью данной работы является расчетное обоснование предлагаемой возможности повышения быстродействия клапана, связанной с изменением конфигурации его газодинамической системы, на базе мультифизической модели происходящих в нем процессов, и проведение на основе разработанной модели расчета сил, противодействующих движению якоря электромагнита, на примере одного из клапанов, применяемых в ракетно-космической технике, в исходной (рис. 1) и предлагаемой конфигурациях газодинамической системы.

Исходная и предлагаемая конструкция клапана представлены на рис. 2. В исходной конструкции (рис. 2а) ось выпускного отверстия расположена выше оси переключающего шарика, прижатого к дренажному седлу, поэтому, как только электромагнит начинает перемещать шарик вниз, чтобы запереть выпускное отверстие, начинается также активный дренаж сжатого газа из канала разгрузки, а газ, поступающий из выпускного отверстия, не компенсирует дренаж вследствие малого сечения протока между шариком, имеющим диаметр 5,8 мм и цилиндром диаметром 6 мм, в котором шарик перемещается.

Дренаж газа из канала разгрузки приводит к уменьшению силы, действующей на разгрузочный шток, увеличению противодействующей силы и к торможению движения якоря, то есть к снижению быстродействия клапана.

В измененной конструкции (рис. 2б) ось выпускного отверстия предлагается располагать ниже оси переключающего шарика, прижатого к дренажному седлу, поэтому начало движения шарика вниз под действием силы, создаваемой электромагнитом, не должно приводить к резкому спаду давления газа в канале разгрузки, а значит – не должно приводить к снижению быстродействия. Ниже приводится расчетное обоснование данного решения.

Геометрические модели клапана для исходной и предлагаемой конструкций приведены на рис. 3. В исходном состоянии переключающий шарик находится в верхнем положении под действием давления сжатого газа и препятствует его выходу в атмосферу через дренажные отверстия. Сжатый газ через канал разгрузки давит на разгрузочный шток, а тот, в свою очередь, на якорь, уменьшая усилие, необходимое для перемещения шарика вниз до выпускного седла. При срабатывании

электромагнита, переключающий шарик перемещается из верхнего положения в нижнее положение, перекрывая выпускное отверстие и открывая путь газу к дренажным отверстиям, давление на выходе которых равно атмосферному давлению. Основным отличием исходной конструкции клапана от предлагаемой заключается в том, что во втором случае сжатый газ поступает в канал разгрузки из области, где давление равно входному давлению, что уравнивает силы давления газа на переключающий шарик на всем пути его движения. В исходном варианте конструкции канал разгрузки оказывается в зоне действия атмосферного давления дренажных отверстий, что увеличивает противодействующую силу движению шарика.

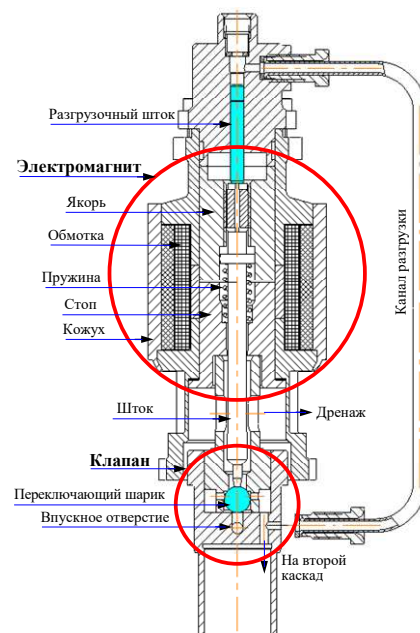


Рис. 1. Конструкция двухкаскадного электромагнитного газораспределительного клапана (исходная конструкция)

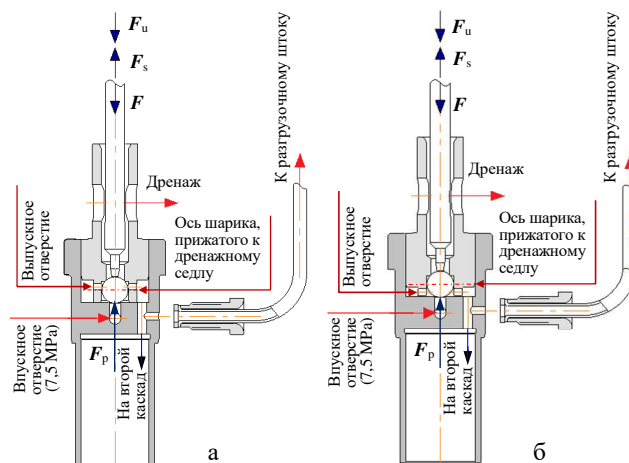


Рис. 2. Исходная и предлагаемая конструкция клапана F – сила, создаваемая электромагнитом; F_p – сила, создаваемая давлением газа на переключающий шарик со стороны выпускного отверстия; F_s – сила, создаваемая противодействующей пружиной; F_u – сила, создаваемая давлением газа на разгрузочный шток по каналу разгрузки

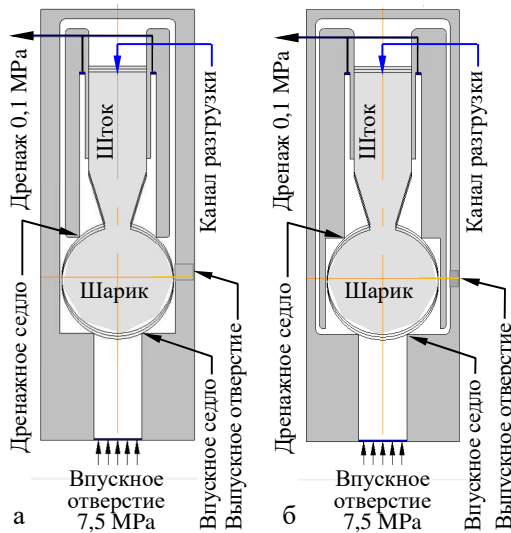


Рис. 3. Геометрические модели исходной (а) и предлагаемой (б) конструкции клапана

Задачей данной работы является расчет сил, действующих на переключающий шарик и противодействующих движению якоря электромагнита.

Модель движения нагретого газового потока базируется на уравнениях Навье – Стокса и уравнении теплового состояния стационарного газового потока без учета отдачи тепла в окружающую среду и элементы конструкции. Еще одним допущением является предположение о том, что при существующих давлениях, установившейся режим для газового потока наступает на порядок быстрее процесса перемещения подвижной системы клапана.

Система уравнений Навье – Стокса при отсутствии объемных сил имеет следующий вид в матричной форме [13]:

$$\rho \cdot (\vec{u} \cdot \nabla) \cdot \vec{u} = \nabla \cdot [-p \cdot I + \eta \cdot (\nabla \cdot \vec{u} + (\nabla \cdot \vec{u})^T) - \left(\frac{2}{3} \cdot \eta\right) \cdot (\nabla \cdot \vec{u}) \cdot I]; \quad (1)$$

$$\nabla(\rho \vec{u}) = 0; \rho = \rho(p, T); \eta = \eta(T), \quad (2)$$

где ρ – плотность газа; \vec{u} – матрица вектора скорости потока газа; p – давление; I – единичная матрица; η – вязкость газа; T – температура.

Уравнение (1) – это уравнение стационарного течения газового потока, а уравнение (2) представляет собой условие непрерывности потока.

Граничными условиями для уравнений (1) и (2) являются: нулевые значения скорости на стенках элементов, условие осевой симметрии – равенство нулю нормальной составляющей скорости, а также значения давления на входе (7,5 Мпа – давление сжатого газа) и выходе (0,1 Мпа – атмосферное давление).

Теплофизические характеристики газа (плотность и вязкость) существенно зависят от температуры, поэтому система уравнений (1, 2) должна быть дополнена уравнением теплопроводности для газа в стационарном режиме. При этом, поскольку газ является сжимаемой средой, в уравнении теплопроводности необходимо учесть работу давления – способность газа производить работу силой давления, которая существенно влияет на температуру среды. Соответствующее уравнение теплопроводности в этом случае имеет следующий вид [13]:

$$\nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla \cdot T) = \rho \cdot C_p \cdot \vec{u} \cdot \nabla \cdot T + \left(\frac{T}{\rho}\right) \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_p \cdot (\vec{u} \cdot \nabla \cdot p) \quad (3)$$

где λ – удельная теплопроводность газа; C_p – теплоемкость при постоянном давлении.

Граничными условиями для уравнения (3) являются: отсутствие теплоотдачи по границам канала течения газа, условия осевой симметрии, значение температуры на входе потока (во впускном отверстии), которое принимается равным – 1200 °С, а также условие открытой границы на выходе:

$$k \cdot \nabla \cdot T = \rho \cdot C_p \cdot \vec{u} \cdot T \quad (4)$$

Сложность решения системы (1 – 3) состоит в том, что все параметры газа являются сложными нелинейными функциями температуры и давления, поэтому корректное решение подобных задач может быть получено численными методами в мультифизических пакетах, имеющих обширные библиотеки характеристик материалов.

Сила, действующая на переключающий шарик (рис. 3), определяется как поверхностный интеграл от сил, вызванных давлением, вязкостью и скоростным напором:

$$\vec{F}_z = \int_S \left(-\vec{n}_z p + \vec{n}_r \eta \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) + 2\vec{n}_z \eta \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \cdot dS, \quad (5)$$

где \vec{n} – орт соответствующего направления.

Алгоритм расчета. Расчет сил, действующих на переключающий шарик, проводился в специальном программном пакете по алгоритму, показанному на рис. 4.

Результаты расчета сил, действующих на ключевой элемент клапана. Расчет сил, действующих на переключающий шарик, проводился для двух вариантов конструкции клапана – для геометрических моделей исходной и предлагаемой конструкций (рис.3) при различных значениях хода якоря электромагнита, изменяющегося в пределах от 0 до 0,3 мм. На рис. 5 показаны результаты расчета распределения давления в канале течения газа – от впускного до дренажного отверстия при значении хода 0,15 мм.

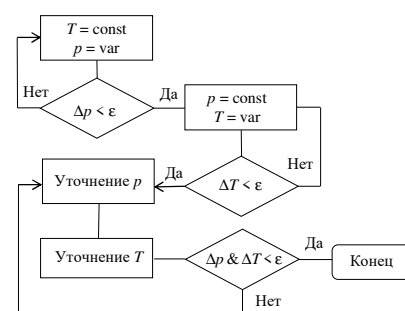


Рис. 4. Алгоритм расчёта

Как видим, давление в канале разгрузки (6 Мпа) в предлагаемой конструкции существенно больше, чем в исходной конструкции (4 Мпа), а это означает, что сила, противодействующая движению якоря электромагнита, будет существенно меньше, чем в исходной конструкции клапана.

Аналогичные расчеты были проведены при других значениях хода якоря в пределах от 0 до 0,3 мм. Результаты расчета силы по формуле (3) приведены в табл.1 и на рис. 6.

Рис. 5. Результаты расчета распределения давлений в исходном (а) и предлагаемом (б) вариантах конструкции клапана

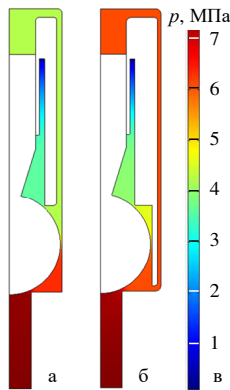


Таблица 1. Результаты расчета сил, противодействующих движению якоря электромагнита

Вариант конструкции клапана	Ход якоря, мм						
	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
Исходный	41,8	51,9	59,2	62,4	58,1	49,7	37,3
Предлагаемый	41,2	38,6	44,5	36,3	38,4	43,9	37,3

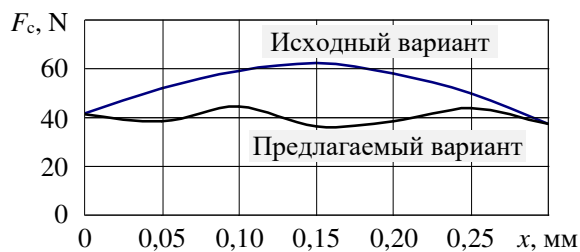


Рис. 6. Расчетные значения сил, создаваемых при воздействии сжатого газа на переключающий шарик клапана

Выводы.

1. Разработана нелинейная мультифизическая модель течения газового потока, на основании которой рассчитаны силы, действующие на переключающий шарик газораспределительного клапана, а также скоростные и тепловые параметры рабочей среды.

2. Предложенный вариант конструкции клапана с входом отверстия канала разгрузки, расположенным в области высокого давления, позволяет уменьшить значения противодействующих сил, препятствующих движению якоря электромагнита, что повышает быстродействие клапана.

Список літератури

1. Электромагнитные клапаны: https://www.italgaz.com.ua/equipment_pipe/klapan_elektromagnitnyj.html.
2. Нержавеющий электромагнитный клапан: <https://armakip.com.ua/index.php?id=176>.
3. Электромагнитные клапаны: https://hi-ip.com/industrial-automation/electromagnetic-valves/?gclid=CjwKCAiAkrTjBRAoEiwAXpf9CQ-clcPegmBKIut4RFOJfJJIWsrkFlypVBTVYn0Q1FZQvFBaw08ARoC9XEQAvD_BwE.
4. Газораспределительные клапаны управления летательным аппаратом: <http://www.findpatent.ru/patent/249/2497034.html>.
5. Газораспределительные клапаны управления летательным аппаратом: <http://www.findpatent.ru/patent/246/2466320.html>.
6. Газораспределительные клапаны управления летательным аппаратом: <http://www.findpatent.ru/patent/245/2456494.html>.
7. Газораспределительный клапан: <https://edrid.ru/rid/217.015.c7bb.html>.
8. Газораспределительный клапан: <http://www.findpatent.ru/patent/214/2147350.html>.
9. А.Е. Зарянкин, С.А. Истомин, В.Е. Карашук, В.В. Носков, В.И. Черноштан. Новые угловой и клетковый проходной дроссельно-регулирующие клапаны: http://www.valve-industry.ru/pdf_site/36/36_nauka_zarjankin_reg-klapans.pdf.
10. Управляемый разгрузочный клапан: <https://hidravlik.com.ua/files/hr5224.pdf>.
11. Клапан ограничения давления с непрямым управлением: https://pkmoscow.ru/uploads/wys/File/RRS%2025802_1005.pdf.
12. Устройство электромагнитного клапана с принудительным управлением: https://pkmoscow.ru/uploads/wys/File/RRS%2025802_1005.pdf.
13. Френкель Я.И. Курс теоретической механики / Френкель Я.И. // – Ленинград: Типография "Красный печатник", 1939. – 386 с.

References (transliterated)

1. Jelektromagnitnye klapany: https://www.italgaz.com.ua/equipment_pipe/klapan_elektromagnitnyj.html.
2. Nerzhavejushhij jelektromagnitnyj klapan.: <https://armakip.com.ua/index.php?id=176>.
3. Jelektromagnitnye klapany https://hi-ip.com/industrial-automation/electromagnetic-valves/?gclid=CjwKCAiAkrTjBRAoEiwAXpf9CQ-clcPegmBKIut4RFOJfJJIWsrkFlypVBTVYn0Q1FZQvFBaw08ARoC9XEQAvD_BwE.
4. Gazoraspredeitel'nye klapany upravlenija letatel'nyj apparatom: <http://www.findpatent.ru/patent/249/2497034.html>.
5. Gazoraspredeitel'nye klapany upravlenija letatel'nyj apparatom: <http://www.findpatent.ru/patent/246/2466320.html>.
6. Gazoraspredeitel'nye klapany upravlenija letatel'nyj apparatom: <http://www.findpatent.ru/patent/245/2456494.html>.
7. Gazoraspredeitel'nyj klapan: <https://edrid.ru/rid/217.015.c7bb.html>.
8. Gazoraspredeitel'nyj klapan: <http://www.findpatent.ru/patent/214/2147350.html>.
9. A. E. Zarjankin, S. A. Istomin, V. E. Karashhuk, V. V. Noskov, V. I. Chernoshstan. Novye uglovoj i kletkovyj prohodnoj drossel'no-regulirujushhie klapany: http://www.valve-industry.ru/pdf_site/36/36_nauka_zarjankin_reg-klapans.pdf.
10. Upravljajemyj razgruzochnyj klapan: <https://hidravlik.com.ua/files/hr5224.pdf>.
11. Klapan ograniczenija davljenija s neprjamyj upravleniem: https://pkmoscow.ru/uploads/wys/File/RRS%2025802_1005.pdf.
12. Ustrojstvo jelektromagnitnogo klapana s prinuditel'nyj upravleniem: https://pkmoscow.ru/uploads/wys/File/RRS%2025802_1005.pdf.
13. Frenkel' Ja.I. Kurs teoreticheskoj mehaniki. Leningrad: Tipografija "Krasnyj pechatnik", 1939. 386 p.

Поступила (received) 25.01.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Байда Євген Іванович (Байда Евгений Иванович, Bajda Yevgen) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0297-328X>; e-mail: baida.kpi@gmail.com

Клименко Борис Володимирович (Клименко Борис Владимирович, Klymenko Borys) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач, кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7860-4937>; e-mail: b.v.klymenko@gmail.com

Еланський Юрій Анатолійович (Еланский Юрий Анатольевич, Yelanskyi Yurii) – Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля», начальник відділу, м. Дніпро, Україна; e-mail: yuyelans@gmail.com

Форкун Яна Борисівна (Форкун Яна Борисовна, Forkun Jana) – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет міського господарства, доцент кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5718-1426>; e-mail: jana.forkun@gmsil.com

*E. V. GONCHAROV***ANALYSIS OF DESIGN FEATURES OF INDUCTIVE ELECTROMAGNETIC CURRENT LIMITER**

The design circuits of an electromagnetic short-circuit current limiter of inductive type with movable armature and moving core are considered. A comparative analysis of the design features of the electromagnetic current limiter with copper or superconducting winding is carried out. The operation principle of the electromagnetic short-circuit current limiter of inductive type with copper or superconducting winding is considered. The peculiarities of operation modes of the electromagnetic short-circuit current limiter of inductive type with copper or superconducting winding are analyzed. Using results of the mathematical modeling of the magnetic system of the electromagnetic short-circuit current limiter by the Finite Element Method in the FEMM software environment, the character of the distribution of the magnetic flux density in the nominal mode and in the current limiting mode is determined, which allows to determine the parameters of the current limiter and design features. In accordance with the design features of the electromagnetic short-circuit current limiter of inductive type, the sequence of calculation of the basic parameters of the magnetic system, taking into account the voltage drop factor, is given. The basic equations of the electric equilibrium of the voltage drop of the electromagnetic short-circuit current limiter of inductive type for nominal mode and short-circuit conditions are given. The use of the design circuit of the electromagnetic short-circuit current limiter with superconducting winding can provide energy-saving in nominal mode. The use of high-temperature superconducting wire due to increased critical parameters will ensure preservation of the superconducting state of the winding in short-circuit mode.

Key words: current limiter, short-circuit, high temperature superconductor, inductance, magnetic field, ferromagnetic core.

*Є. В. ГОНЧАРОВ***АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ІНДУКТИВНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ОБМЕЖУВАЧА СТРУМУ**

Розглянуто конструктивні схеми електромагнітного обмежувача струму короткого замикання індуктивного типу з рухомих якорем та рухомих ярмом. Проведено порівняльний аналіз конструктивних особливостей електромагнітного обмежувача струму з мідною або надпровідною обмоткою. Розглянуто принцип дії електромагнітного обмежувача струму короткого замикання індуктивного типу з мідною або надпровідною обмоткою. Проаналізовано особливості режимів роботи електромагнітного обмежувача струму короткого замикання індуктивного типу з мідною або надпровідною обмоткою. За результатами математичного моделювання магнітної системи електромагнітного обмежувача струму короткого замикання методом скінченних елементів у програмному середовищі FEMM встановлено характер розподілу індукції магнітного поля у номінальному режимі та у режимі обмеження струму, що дозволяє визначити параметри обмежувача струму та конструктивні особливості. Відповідно до конструктивних особливостей електромагнітного обмежувача струму короткого замикання індуктивного типу наведено порядок розрахунку основних параметрів магнітної системи, що враховує коефіцієнт спаду напруги. Наведені основні рівняння електричної рівноваги спаду напруги електромагнітного обмежувача струму короткого замикання індуктивного типу для номінального режиму та короткого замикання. Використання конструктивної схеми електромагнітного обмежувача струму короткого замикання з надпровідною обмоткою може забезпечити енергозбереження у номінальному режимі. Застосування високотемпературного надпровідного проводу завдяки підвищеним критичним параметрам забезпечить збереження надпровідного стану обмотки у режимі короткого замикання.

Ключові слова: обмежувач струму, коротке замикання, високотемпературний надпровідник, індуктивність, магнітне поле, магнітопровід.

*Е. В. ГОНЧАРОВ***АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ИНДУКТИВНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ОГРАНИЧИТЕЛЯ ТОКА**

Рассмотрены конструктивные схемы электромагнитного ограничителя тока короткого замыкания индуктивного типа с подвижным якорем и подвижным ярмом. Проведен сравнительный анализ конструктивных особенностей электромагнитного ограничителя тока с медной или сверхпроводящей обмоткой. Рассмотрен принцип действия электромагнитного ограничителя тока короткого замыкания индуктивного типа с медной или сверхпроводящей обмоткой. Проанализированы особенности режимов работы электромагнитного ограничителя тока короткого замыкания индуктивного типа с медной или сверхпроводящей обмоткой. По результатам математического моделирования магнитной системы электромагнитного ограничителя тока короткого замыкания методом конечных элементов в программной среде FEMM установлен характер распределения индукции магнитного поля в номинальном режиме и в режиме ограничения тока, что позволяет определить параметры ограничителя тока и конструктивные особенности. Соответственно конструктивным особенностям электромагнитного ограничителя тока короткого замыкания индуктивного типа приведен порядок расчета основных параметров магнитной системы, который учитывает коэффициент падения напряжения. Приведены основные уравнения электрического равновесия падения напряжения электромагнитного ограничителя тока короткого замыкания индуктивного типа для номинального режима и короткого замыкания. Использование конструктивной схемы электромагнитного ограничителя тока короткого замыкания со сверхпроводящей обмоткой может обеспечить энергозбережение в номинальном режиме. Применение високотемпературного сверхпроводящего провода благодаря повышенным критическим параметрам обеспечит сохранение сверхпроводящего состояния обмотки в режиме короткого замыкания.

Ключевые слова: ограничитель тока, короткое замыкание, високотемпературный сверхпроводник, индуктивность, магнитное поле, магнітопровід.

Introduction. The technical progress in the field of electric power industry is characterized by an increase in the generation of electricity, which is the cause of the emergence of ultrahigh voltage classes, the development and creation of new energy complexes of high power. In turn, the need to improve the quality of electricity requires the use of control and protection electrical apparatus of the corresponding level in power transmission grids.

Increasing the power consumption in the power grids, in turn, causes emergency currents of short-circuit, which

leads to the destruction of electrical equipment, and protection from this negative phenomenon is a very topical task. Thus, one of the defining parameters when selecting the equipment of substations and transmission lines is the protection of power transmission lines and consumers of electricity from short-circuit currents.

In addition, the reconstruction and re-equipment of existing power systems requires the use of effective means of protection against emergency modes, which is an important task.

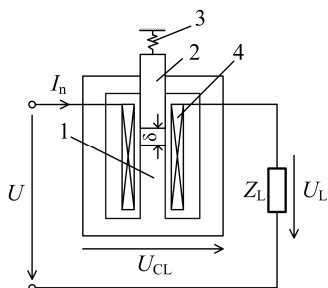
© E. V. Goncharov, 2019

Various traditional protection devices for electrical grids and electrical equipment against emergency currents such as fuses, circuit breakers, current limiting reactors and various current limiting devices are known. Improvement of the characteristics of short-circuit current limiters (SCCL) can be achieved through the use of superconducting windings [1].

The goal and task of the research. The goal of the paper is to carry out a comparative analysis of the design features of electromagnetic short-circuit current limiters with copper and superconducting windings.

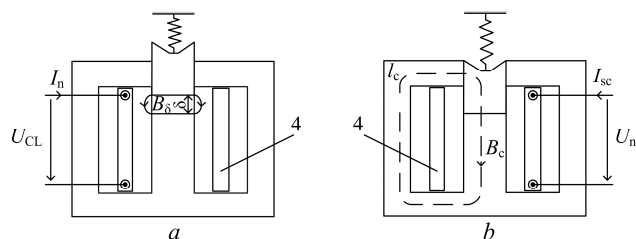
The task of the work is to analyze the influence of the design features of the magnetic system on the operation of the electromagnetic short-circuit current limiter.

Inductive electromagnetic current limiter with copper winding. Consider the design circuit of an electromagnetic (EM) short-circuit current limiter. The design circuit contains a ferromagnetic core 1 with a moving armature 2 which is attracted by a spring 3, and a network winding 4, which is located on a middle rod, connected successively to the load Z_L in the electric circuit (Fig. 1).



1 – magnetic core; 2 – armature; 3 – spring; 4 – winding
Figure 1 – Design circuit of the EM SCCL

The operation principle is based on increase of inductive resistance of SCCL winding at occurrence of short-circuit current. Operation of the EM SCCL with moving armature 2 lies in the fact that under the nominal load current I_n , the magnetic flux density B_δ in the air gap δ between the armature 2 held by the spring 3 and the core 1 is small, so the armature 2 is not attracted to the core (Fig. 2, a). At normal operation, the EM SCCL is connected in series with the load Z_L , and through the winding 4 the load current I_n passes [2].



a – nominal operating mode;
b – short-circuit in the electrical grid
Figure 2 – Magnetic system of the EM SCCL

At short-circuits, the current I_{sc} for a short time increases dramatically, and the force of armature traction at this stage is proportional to the current in the square. Therefore, the armature is attracted to the core and closes it (Fig. 2, b). The inductance of the current limiter increases by an order, which leads, on the one hand, to a decrease in current, and on the other hand, due to the

magnetic non-linearity of the material of the core, to an even greater attraction of the armature [2].

After switching off the voltage of the electrical grid to eliminate the short-circuit, the current limiter is de-energized and the armature returns to its original position. The presence of a mobile armature of the short-circuit current limiter is associated with such shortcomings as the inertia of the operation. But such technical solutions are widespread in electrical apparatus and can be improved.

For the effective use of the EM SCCL it is necessary to analyze the peculiarities of its operation, and to determine the criteria for choosing the main parameters. So, depending on the nature of the load, the voltage drop on the SCCL, which is determined by the coefficient k_v , can be set in such a way that the voltage reduction on the load according to the voltage of the electrical grid is not more than 5% [3, 4].

If we take into account the fact that the voltage drop on the SCCL, both in normal operation mode and at the short circuit, EMF of the self-induction is balanced, it is possible to write:

$$U_{CL} = k_v U_n = 2\pi f w B_\delta k_e S_{cs}, \quad (1)$$

$$U_n = 2\pi f w B_c S_{cs}, \quad (2)$$

where f is frequency of alternating current; w is the number of turns of the winding; B_δ is the magnetic flux density in the gap between armature and core in normal operation mode; B_c is the magnetic flux density in the core when connecting the armature with the core; S_{cs} is the cross-section of the core; k_e is the coefficient of expansion of the magnetic flux in the gap between the armature and the core.

Accordingly, the number of turns of the winding w :

$$w = \frac{k_v B_c}{\mu_0 k_e I_n} \delta, \quad (3)$$

where δ is the air gap between the armature and the core; μ_0 is the magnetic constant.

From (1) we obtain the connection between magnetic flux densities: $B_\delta = B_c (k_v / k_e)$. The value of the magnetic flux density B_c is selected on the part of the material's magnetization, and the coefficient $k_e = 1.05 \dots 1.3$ is determined by special calculations. The size of the cross-section of the middle rod of the core:

$$S_{cs} = \frac{U_n}{\omega w B_c}, \quad (4)$$

where $\omega = 2\pi f$ is angular frequency.

From (4), by substitution of the number of turns from (3), we obtain the dependence of S_{cs} on S_n – the full load power:

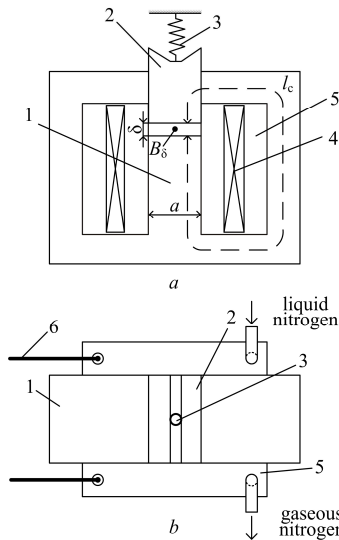
$$S_{cs} = \frac{\mu_0 k_e S_n}{\omega k_v B_c^2 \delta}. \quad (5)$$

Inductive electromagnetic current limiter with superconducting winding. One of the newest trends in power engineering is the use of high-temperature superconductors (HTSC) at a nitrogen temperature level (~ 77 K), unlike low-temperature superconductors (~ 4.2 K). The development of superconducting short-circuit current limiters is based on the use of physical properties of high-temperature superconductors [1].

A superconducting electromagnetic short-circuit current limiter is connected to a part of the electric grid for

emergency currents protection. Such a device has a near-zero resistance in nominal mode unlike traditional current limiters. The principle of the operation of superconducting current limiter is based on the loss of the superconductivity by the conductive element during the flow of short-circuit current [5].

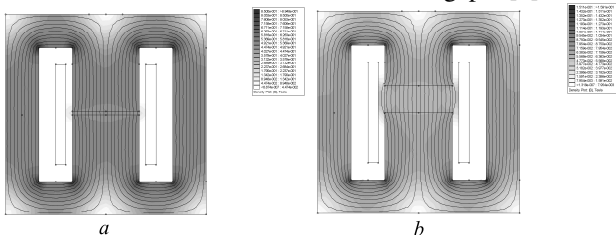
The use of current limiters with superconductivity can provide the extension of the life of the switching devices, creating conditions for its gradual replacement by modern equipment, as well as energy saving. But the introduction of the electromagnetic current limiters with superconducting winding requires analysis. Consider the design circuit of an electromagnetic superconducting short-circuit current limiter (Fig. 3) [6].



a – master view; b – view from above
Figure 3 – Design circuit of the EM SCCL with superconducting winding

The middle rod of the ferromagnetic core 1 and the moving armature 2, which is held by the spring 3, covers the cryostat 5 with the HTSC winding 4. The current leads 6 connect the HTSC winding 4 to the electrical grid.

The HTSC winding is cooled by liquid nitrogen, which is fed to the cryostat, where it evaporates and outwards. The consumption of liquid nitrogen is determined by the flow of heat to the cryostat through its wall, along the current leads, and also (when operating on alternating current) by hysteresis losses in the HTSC winding. The HTSC winding of the current limiter is connected in series with the load Z_L and the nominal current I_n passes through it [6]. Figure 4 shows the distribution of the magnetic field in the HTSC short-circuit current limiter at minimum and maximum values of the air gap δ [7].



a – $\delta = 1$ mm; b – $\delta = 8$ mm
Figure 4 – Magnetic field distribution in the EM SCCL magnetic system

As the numerical analysis shows, the increase of B_c and δ makes sense to certain limits: magnetic flux density B_c should not leave the saturation region of the magnetization curve (1.4...1.5 T); the air gap δ must correspond to the dimensionless parameter $\delta/a = 0.3...0.4$.

Figure 5 shows the design circuit of a short-circuit current limiter, which represents the general view of the device for connection to the electrical grid phase. The main winding is made of high-temperature superconductor of the second generation, and the cryostat in turn is filled with a coolant, in this case, nitrogen [8].

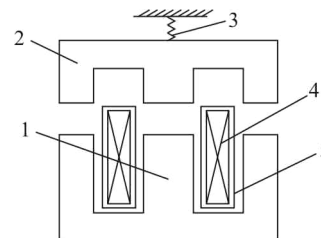


Figure 5 – Design circuit of the EM SCCL with moving armature and HTSC winding

The device contains: a magnetic core 1 and its removable part – armature 2, fixed to the spring 3, a main HTSC winding 4, which is contained in the cryostat 5, which is located on the middle rod of the magnetic circuit 1.

At nominal mode of operation of the network current flows through the main HTSC winding 4 of the current limiter, which does not have active losses for heating in the superconducting state. An armature 2 is attracted by a spring 3, so the winding 4 has a slight inductance due to air gaps in the magnetic core 1.

In the case of short-circuit, the magneto-driving force of the winding 3 increases and the electromagnetic force exaggerates the force of the spring 3, pulls the armature 2 to the magnet core 1. Thus, the inductive resistance of the winding 4 increases, which limits the current of short-circuit [9].

In order to at the increase the short-circuit current, the magnetic flux density of the core is not in the saturation zone of the magnetization curve, we take $B_c = (0,8..0,85)B_{max}$ for an acceptable core material. The plane of the cross-section of the core S_{cs} determines its dimensions and the mass of the moving armature, the number of turns of the winding w defines the dimensions of the HTSC winding and, accordingly, of the cryostat.

On the other hand, the number of turns is determined by the initial conditions of the armature attraction:

$$w = \delta \frac{B_\delta}{\mu_0 I_n} \tag{6}$$

where μ_0 is the magnetic constant; H is the magnetic field strength; I_n is the nominal current; B_δ is the magnetic flux density in the air gap; δ is the air gap between the armature and the core.

Thanks to the use of HTSC winding of the second generation wire, it is possible to reduce the energy consumption, which exceeds the parameters of the previous ones and has higher critical current density [10].

The difference of the magnetic system from the previous design circuit is due to the increase in the mass of the moving armature.

The advantage of the design circuit is that the winding

retains the superconducting state and does not transit to a normal resistive state, which ensures re-activation. Device power losses in normal mode are practically absent. The losses for cooling of the inductive electromagnetic superconducting current limiter with the cryostat are associated with external heat fluxes [11, 12].

Conclusions. With the increase of the air gap δ in normal operation mode, the inductive resistance decreases in nominal operating mode, at short-circuit the resistance increases by an order of magnitude.

In all design circuits, the volume and weight of the moving armature of the current limiter are proportional to S_{cs} . The time of the actuation of the current limiter depends on the weight of the armature, this time will be smaller, the smaller will be S_{cs} .

At given power, a decrease in the cross-section of the core S_{cs} is affected by the increase in the magnetic flux density B_c in the closed core of the current limiter.

Список літератури

1. Данько В.Г. Використання високотемпературної надпровідності в електроенергетичному обладнанні: монографія / Данько В.Г., Полянська І.С., Гончаров Є.В.; за ред. В.Г. Данько. – Х.: НТМТ, 2011.–248 с.
2. Goncharov E.V. The electromagnetic inductive short-circuit current limiter / E.V. Goncharov // *Inżynieria i technologia. Nowoczesne badania podstawowe i stosowane*. Warszawa. – 2016. – P. 41–45.
3. Данько В.Г., Гончаров Є.В. Визначальні параметри надпровідного обмежувача струму короткого замикання / Данько В.Г., Гончаров Є.В. // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XX міжн. наук.-практична конф. (microCAD-2012), 15-17 травня: тези доп. / НТУ "ХПІ", Харків. – 2012. – С. 157.
4. Данько В.Г. Теоретичні засади і вибір основних параметрів електромагнітного надпровідного обмежувача струму / Данько В.Г., Гончаров Є.В. // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – № 48. – С. 30–36.
5. Данько В.Г., Гончаров Є.В. Надпровідний обмежувач струму короткого замикання з рухомим якорем / Данько В.Г., Гончаров Є.В. // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XIX міжн. наук.-практична конф. (microCAD-2011), 01-03 червня: тези доп. / НТУ "ХПІ", Харків. – 2011. – С. 147.
6. Данько В.Г., Гончаров Є.В. Обмежувач струму короткого замикання з рухомим якорем і надпровідною обмоткою / Данько В.Г., Гончаров Є.В. // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XX міжн. наук.-практична конф. (microCAD-2012), 15-17 травня: тези доп. / НТУ "ХПІ", Харків. – 2012. – С. 156.
7. Данько В.Г. Обмежувач струму короткого замикання з надпровідною обмоткою / Данько В.Г., Гончаров Є.В. // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2012. – № 4. – С. 28–31.
8. Пат. 48214 Україна, МПК H02N 9/00. Електромагнітний обмежувач струму короткого замикання з високотемпературною надпровідниковою обмоткою / Данько В.Г., Гончаров Є.В.; власник патенту НТУ "ХПІ". – № u 200909564; заявл. 18.09.09; опубл. 10.03.10, Бюл. № 5. – 4 с.: 1 іл.
9. Данько В.Г., Гончаров Є.В. Електромагнітний надпровідний обмежувач струму короткого замикання / Данько В.Г., Гончаров Є.В. // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XVIII міжн. наук.-практична конф. (microCAD-2010), 12-14 травня: тези доп. / НТУ "ХПІ", Харків. – 2010. – С. 160.
10. Гончаров Є.В. Застосування електромагнітного надпровідного обмежувача струму / Є.В. Гончаров // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – № 55. – С. 19–22.
11. Данько В.Г. Аналіз конструктивних особливостей екранованого індуктивного обмежувача струму з високотемпературною

надпровідністю / В.Г. Данько, Є.В. Гончаров, І.В. Поляков // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 34(1256). – С. 9–13.

12. Dan'ko V.G. Synthesis aspects of cryogenic high-temperature superconducting shielding inductive short-circuit current limiter / V.G. Dan'ko, E.V. Goncharov // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 32(1204). – С. 3–7.

References (transliterated)

1. Dan'ko V.G. Vykorystannya vysokotemperaturnoyi nadprovodnosti v elektroenergetychnomu obladnanні [Use of high-temperature superconductivity in electric power equipment]: monograph. V. G. Dan'ko, I. S. Polyanska, E. V. Goncharov; edited by V. G. Dan'ko. – Kharkov: NTMT, 2011. 248 p.
2. Goncharov E.V. The electromagnetic inductive short-circuit current limiter. *Inżynieria i technologia. Nowoczesne badania podstawowe i stosowane*. Warszawa. 2016. P. 41–45.
3. Dan'ko V.G., Goncharov E.V. Vy`znachal'ni parametry nadprovodnogo обмежувача струму короткого замы`кання [Parameters of the short-circuit current surge superconductor] Information technology, science, engineering, technology, education, health: XX Int. sci. Practical Conf. (microCAD-2012), 15-17 May – Kharkiv: NTU "KhPI". 2012. P. 157.
4. Dan'ko V.G., Goncharov E.V. Teorety`chni zasady i vy`bir osnovny`x parametriv elektromagnitnogo nadprovodnogo обмежувача струму [Theoretical foundations and the choice of the basic parameters of the electromagnetic superconducting current limiter]. Bulletin of NTU "KhPI". – Kharkiv: NTU "KhPI". – 2011. – № 48. – P. 30–36.
5. Dan'ko V.G., Goncharov E.V. Nadprovodny`j обмежувач струму короткого замы`кання z ruxomy`m yakorem [Superconducting short-circuit current limiter with moving anchor]. Information technology, science, engineering, technology, education, health: XIX Int. sci. Practical Conf. (microCAD-2011), 01-03 June – Kharkiv: NTU "KhPI". – 2011. – P. 147.
6. Dan'ko V.G., Goncharov E.V. Obmezhuвач струму короткого замы`кання z ruxomy`m yakorem i nadprovodnoyu obmotkoyu [Short-circuit current limiter with moving anchor and superconducting winding]. Information technology, science, engineering, technology, education, health: XX Int. sci. Practical Conf. (microCAD-2012), 15-17 May – Kharkiv: NTU "KhPI". – 2012. – P. 156.
7. Dan'ko V.G., Goncharov E.V. Obmezhuвач струму короткого замы`кання z nadprovodnoyu obmotkoyu [Short-circuit current limiter with superconducting winding]. Electrical engineering & electromechanics. – Kharkiv: NTU "KhPI". 2012. 4. P. 18–31.
8. Dan'ko V.G., Goncharov E.V. Elektromagnitny`j обмежувач струму короткого замы`кання z vy`sokotemperaturnoyu nadprovodny`kovoyu obmotkoyu [Electromagnetic short-circuit current limiter with high-temperature superconducting winding]. Patent UA, no 48214, 2010.
9. Dan'ko V.G., Goncharov E.V. Elektromagnitny`j nadprovodny`j обмежувач струму короткого замы`кання [Electromagnetic superconducting short circuit current limiter]. Information technology, science, engineering, technology, education, health: XVIII Int. sci. Practical Conf. (microCAD-2010), 12-14 May – Kharkiv: NTU "KhPI". – 2010. – P. 160.
10. Goncharov E.V. Zastosuvannya elektromagnitnogo nadprovodnogo обмежувача струму [Application of electromagnetic superconducting current limiter]. Bulletin of NTU "KhPI". Kharkiv: NTU "KhPI" – 2010. No 55. P. 19–22.
11. Dan'ko V.G., Goncharov E.V., Polyakov I.V. Analysis of design features of shielded inductive current limiter with high-temperature superconductivity [Analiz konstruy`vny`x osobly`vostej ekranovanogo indukty`vnoho обмежувача струму z vy`sokotemperaturnoyu nadprovodnistyu]. Bulletin of NTU "KhPI". – Kharkiv: NTU "KhPI". 2017. No 34(1256). – P. 9–13.
12. Dan'ko V.G., Goncharov E.V. Synthesis aspects of cryogenic high-temperature superconducting shielding inductive short-circuit current limiter. Bulletin of NTU "KhPI". – Kharkiv: NTU "KhPI". – 2016. No 32(1204). – P. 3–7.

Поступила (received) 25.01.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гончаров Євген Вікторович (Гончаров Евгений Викторович, Goncharov Evgen Viktorovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри загальної електротехніки; м. Харків, Україна.

Е.Ю. ЗОРИН, А.А. ЧЕПЕЛЮК, Ю.С. ГРИЩУК, В.В. ВОИНОВ

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ УСТАНОВОК КОМПЕНСАЦИИ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ В СЕТЯХ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

В статье проведен технический анализ эффективности существующих конструктивных решений установок компенсации емкостных токов в сетях среднего напряжения. Проанализированы устройство, особенности и условия работы дугогасящих реакторов различных конструктивных исполнений. Проанализированы особенности и условия работы заземляющих трансформаторов. Проанализированы устройство, особенности и условия работы дугогасящих агрегатов. На основании проведенного анализа установлены основные достоинства указанных устройств в установках компенсации емкостных токов. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании новых и модернизации существующих установок компенсации емкостных токов в сетях среднего напряжения с целью наиболее рационального выбора соответствующего оборудования.

Ключевые слова: трехфазная сеть среднего напряжения, однофазное замыкание на землю, установка компенсации емкостных токов, заземляющий трансформатор, катушка Петерсена, дугогасящий реактор, заземляющий дугогасящий агрегат.

Є.Ю. ЗОРІН, О.О. ЧЕПЕЛЮК, Ю.С. ГРИЩУК, В.В. ВОІНОВ

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ УСТАНОВОК КОМПЕНСАЦІЇ ЄМНІСНИХ СТРУМІВ У МЕРЕЖАХ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ

У статті проведено технічний аналіз ефективності існуючих конструктивних рішень установок компенсації ємнісних струмів у мережах середньої напруги. Проаналізовано будову, особливості та умови роботи дугогасильних реакторів різних конструктивних виконань. Проаналізовано особливості та умови роботи заземлюючих трансформаторів. Проаналізовано будову, особливості та умови роботи дугогасильних агрегатів. На підставі проведеного аналізу встановлено основні переваги зазначених пристроїв в установках компенсації ємнісних струмів. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні нових і модернізації існуючих установок компенсації ємнісних струмів в мережах середньої напруги з метою найбільш раціонального вибору відповідного обладнання.

Ключові слова: трифазна мережа середньої напруги, однофазне замикання на землю, установка компенсації ємнісних струмів, заземлюючий трансформатор, катушка Петерсена, дугогасильний реактор, заземлюючий дугогасильний агрегат.

Y.Y. ZORIN, O.O. CHEPELYUK, Yu.S. HRYSHCHUK, V.V. VOINOV

THE EFFICIENCY ANALYSIS OF CONSTRUCTIVE SOLUTIONS OF THE CAPACITIVE CURRENTS COMPENSATION PLANTS IN MEDIUM VOLTAGE POWER DISTRIBUTION GRIDS

Introduction. The article contains a technical analysis of the efficiency of existing constructive solutions for capacitive currents compensation plants in medium voltage power distribution grids. Design, features and operating conditions of the arc suppression reactors of various constructive versions are analyzed. Features and operating conditions of grounding transformers are analyzed. Design, features and operating conditions of the arc suppression aggregates are analyzed. On basis of conducted analysis the main advantages of mentioned devices in the capacitive currents compensation plants are established. The results which are obtained can be used in the projecting of new and modernization of existing plants for compensation of capacitive currents in medium voltage power grids in order to make the most rational choice of the corresponding equipment.

Key words: the three-phase medium voltage power grid, the single-phase earth fault, the capacitive currents compensation plant, the grounding transformer, the Petersen coil, the arc suppression reactor, the grounding arc suppression aggregate.

Введение. В электрических трехфазных сетях среднего напряжения для компенсации емкостных токов однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) применяются установки компенсации емкостных токов, состоящие из двух основных элементов (заземляющего трансформатора, назначением которого является выделение из трехфазной сети потенциала нейтрали и заземляющего дугогасящего реактора (катушки Петерсена), настраиваемого в соответствии с ёмкостью сети относительно земли). Сети с установками компенсации емкостных токов в технической литературе называют сетями с компенсированной нейтралью. В таких сетях под системой компенсации сети понимается система заземления нейтрали сети через высокое реактивное сопротивление дугогасящего реактора.

Индуктивность дугогасящего реактора подбирается таковой, чтобы в контуре, образованном этой ин-

дуктивностью и суммарной ёмкостью фазных проводников относительно земли, возникал резонанс на промышленной частоте. Амплитуда тока замыкания на землю снижалась при этом настолько, что не было бы необходимости отключать сеть при замыканиях одной из её фаз на землю. Мощность заземляющего дугогасящего реактора зависит от размера и типа сети (с воздушными линиями, с кабельными линиями или смешанная сеть) [3].

Благодаря компенсации емкостных токов ОЗЗ значительно снижаются перенапряжения при однофазных замыканиях на землю; снижается скорость восстановления напряжения на неповрежденной фазе; снижается ток в месте повреждения до минимальных значений; появляется возможность самоликвидации однофазного замыкания, возникающего в воздушных линиях и ошиновках; появляется возможность не

производить немедленное отключение первого короткого замыкания на землю, тем самым обеспечивая работу сети даже при длительном наличии ОЗЗ; снижается вероятность поражения персонала и посторонних лиц при ОЗЗ.

Указанные системы компенсации емкостных токов ОЗЗ применяются на протяжении многих десятилетий и за это время появился ряд технических решений их конструктивных элементов – заземляющих трансформаторов и дугогасящих реакторов с различными способами регулирования (настройки), каждое из которых имеет свои технические особенности и область применения.

Для оценки эффективности существующих конструктивных решений установок компенсации емкостных токов в сетях среднего напряжения при ОЗЗ целесообразным является проведение сравнительного анализа существующих конструктивных решений заземляющих трансформаторов и дугогасящих реакторов с различными способами регулирования (настройки).

Цель работы заключается в анализе устройства, конструктивных особенностей и особенностей работы современных дугогасящих реакторов (катушек Петерсена), заземляющих трансформаторов и выполненных на их основе заземляющих дугогасящих агрегатов в установках компенсации емкостных токов сетей среднего напряжения.

Работа установки компенсации емкостных токов. Для иллюстрации схемы и описания работы сети среднего напряжения с компенсированной нейтралью на рис. 1 приведена однолинейная схема трехфазной электрической сети напряжением 20 кВ с компенсированной нейтралью [2].

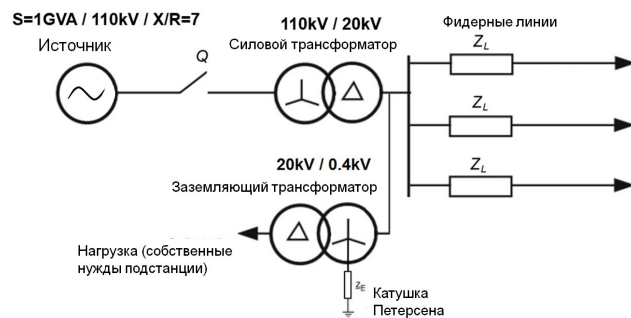


Рис. 1. Схема электрической сети 20 кВ с компенсированной нейтралью

К вторичной обмотке силового трансформатора подсоединён заземляющий трансформатор 20/0,4 кВ, имеющий соединение обмоток звезда с нейтралью – треугольник. К нейтральному выводу первичной обмотки заземляющего трансформатора подсоединяется дугогасящий реактор (катушка Петерсена), имеющий переменную величину индуктивности, настраиваемую в зависимости от значения общей ёмкости сети.

Из приведенной схемы непосредственно следует, что при возникновении ОЗЗ для ограничения тока ОЗЗ целесообразно нейтраль трансформатора заземлить через индуктивную катушку с реактивным сопротивлением x_L (как показано на схеме). Индуктив-

ность такой катушки можно выбрать так, чтобы в цепи нулевой последовательности был обеспечен резонанс между индуктивностью и емкостью, что приведёт к полной компенсации емкостного тока ОЗЗ.

Для того чтобы производить настройку таких катушек при изменениях параметров защищаемой сети их выполняют с возможностью регулирования индуктивности. Обычно стремятся снизить ток ОЗЗ до величины, при которой создаются благоприятные условия для самопогасания дуги, возникшей при таком замыкании. Опытным путём установлено, что для обеспечения этого необходимо, чтобы ток замыкания на землю не превышал [2]: при 6 кВ – 30 А, при 10 кВ – 20 А, при 15-20 кВ – 15 А, при 35 кВ – 10 А.

Подробно компенсация емкостных токов однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) описана в [1-2]. Также в [2] нами предложена расчетная модель сети среднего напряжения с тремя фидерами в среде Matlab, которая позволяет моделировать работу сети в режиме ОЗЗ и проиллюстрированы результаты моделирования сети на рис. 1.

Пример компоновки современной установки компенсации емкостных токов на подстанции показан на рис. 2. Справа на рисунке заземляющий трансформатор, слева – дугогасящий реактор.



Рис. 2. Установка компенсации емкостных токов производства компании Swedish Neutral, Швеция [6]

Основные типы дугогасящих реакторов (ДГР). В зависимости от способа регулирования тока компенсации современные ДГР можно разделить на следующие основные виды [1-6]:

- нерегулируемые;
- с переключением ответвлений обмотки (ступенчатого типа, регулируемые без или под напряжением);
- с регулируемым зазором магнитопровода (плунжерные реакторы);
- с подмагничиванием магнитопровода;
- с изменением эквивалентной индуктивности путём переключения конденсаторных элементов.

Нерегулируемый дугогасящий реактор представляет собой реактор с ферромагнитным сердечником, с многократно секционированным воздушным зазором,

для компенсации токов ОЗЗ неизменяемых участков сети, без возможности регулирования. Такие реакторы создаются под индивидуальные условия эксплуатации, не требующие специальных настроек для линий ограниченной длины.

Дугогасящий реактор с переключением ответвлений обмотки (ступенчатого типа). Для сокращения размеров все дугогасящие катушки выполняются со стальным сердечником. Вместе с тем нелинейность характеристики намагничивания, по крайней мере, в пределах изменения напряжения от нуля до фазного, должна быть минимальной, иначе индуктивность катушки, а значит, и установленная степень настройки будут меняться в зависимости от приложенного напряжения.

Сердечник катушки образован двумя стержнями 1 и двумя ярмами 2 (рис. 3). Стержни разрезные и собраны из отдельных коротких пакетов 3 и индивидуальным креплением стальных пластин в каждом. В зазоры между пакетами и в сочленения между стержнями и ярмами закладываются твёрдые прокладки из бумаги, пропитанной бакелитом, или другого изоляционного материала. Готовые пакеты стали плотно скрепляются стяжными болтами из немагнитного материала. Благодаря этим мерам обеспечивается синусоидальность тока катушки на большинстве ответвлений её обмотки и поэтому значительно уменьшается содержание в токе замыкания высших гармоник.

Обмотка 4 тоже разделена на части и расположена на обоих стержнях сердечника так, чтобы между противоположными частями разность потенциалов не могла достигнуть опасных для изоляции обмотки значений. От отдельных элементов обмотки выведены ответвления.

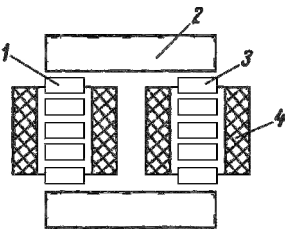


Рис. 3. Разрез дугогасящей катушки со ступенчатым регулированием

Изоляция обмотки выполняется так же, как изоляция силовых трансформаторов. Обмотка помещена в бак, заполненный маслом. Внутри бака помещён переключатель ответвлений, с помощью которого можно изменять ток компенсации. Привод переключателя выведен наружу на крышку бака либо имеет штурвал с фиксатором положения. В ДГР с ручным регулированием переключение ответвлений обмотки должно осуществляться без напряжения, с электрическим приводом переключение ответвлений может быть выполнено и под напряжением.

Ответвления выполнены таким образом, чтобы можно было регулировать ток компенсации в пределах 50 – 100% [1].

Плунжерный дугогасящий реактор. Такие реакторы позволяют плавно изменять ток компенсации в очень широком диапазоне без отключения реактора

от сети, как в нормальном режиме, так и при замыкании на землю, легко управляются дистанционно, что даёт возможность применять их в сочетании с телемеханическими устройствами на подстанциях без обслуживающего персонала. Поскольку ДГР управляются электрическим приводом, они пригодны для устройства автоматической настройки компенсации [1, 3, 5].

Изменение индуктивности таких катушек обеспечивается благодаря изменению воздушного зазора в магнитопроводе. Конструктивно такие ДГР могут быть выполнены с двумя (рис. 4-5) и с одним (рис. 6) движущимися сердечниками.

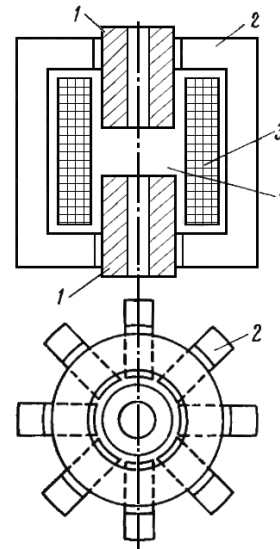


Рис. 4. Конструктивная схема ДГР плунжерного типа

Магнитопровод катушки выполнен в виде двух цилиндрических сердечников 1 с воздушным зазором 4 между ними (рис. 4). Чтобы создать путь для замыкания потока по стали, цилиндрические сердечники охватывают П-образными перемычками 2, симметрично расположенными вокруг сердечников и охватывающими обмотку катушки 3. Магнитопровод катушки (сердечники и перемычки) составлен из прямоугольных нормальных изолированных листов трансформаторной стали. Соединение листов магнитопровода выполнено не болтами, а при помощи сварки, так что листы не имеют ни отверстий, ни вырубков, что упрощает монтаж, обеспечивает надёжную в механическом отношении конструкцию и уменьшает потери в стали.

Ток катушки при постоянных витках и частоте сети для сравнительно небольших значений магнитной индукции в сердечнике прямо пропорционален приложенному напряжению и воздушному зазору, что очень важно для удобства автоматического регулирования компенсации. Через оба цилиндрических сердечника проходит винт, с помощью которого регулируется воздушный зазор. Нарезка винта на одном сердечнике правая, а на другом – левая, благодаря чему при вращении винта в одну сторону зазор увеличивается, при вращении в другую – уменьшается. Винт вращается двигателем через две червячные передачи.

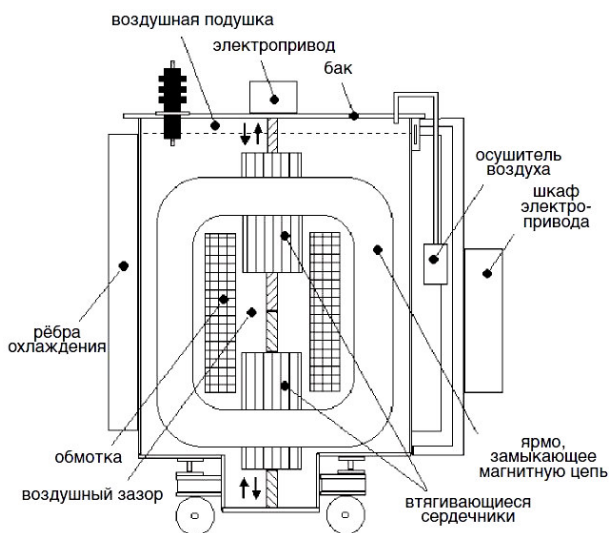


Рис. 5. Пример конструкции ДГР плунжерного типа

Обмотка катушки состоит из двух частей: главной, нерегулируемой, без всяких ответвлений, с изоляцией, рассчитанной на полное фазное напряжение сети, и дополнительной, рассчитанной на 20% номинальной мощности катушки (на время 60 с). Дополнительная обмотка используется для автоматики. Имеются механические и дистанционные электрические указатели положения сердечников, т.е. уставок катушки по току, а также датчики температуры и концевые выключатели, не допускающие перехода сердечников за крайние положения.

На рис. 6 показан разрез ДГР плунжерного типа в конструктивном исполнении с одним движущимся цилиндрическим сердечником в магнитопроводе [7]. В остальном исполнение схожее с вышеописанным.

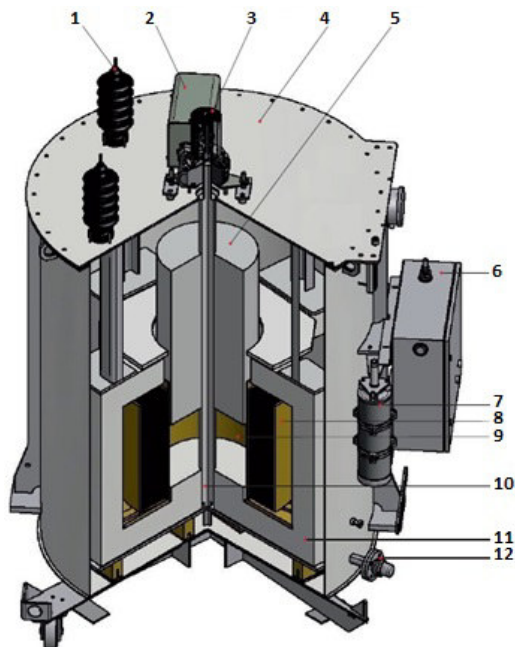


Рис. 6. Общий вид ДГР плунжерного типа в разрезе
1 – изолятор, 2 – электропривод, 3 – индикатор положения,
4 – масляный бак, 5 – подвижный сердечник, 6 – шкаф
управления, 7 – помпа, 8 – обмотка, 9 – воздушный зазор,
10 – винт, 11 – ядро, 12 – дренажный клапан

К достоинствам ДГР этого типа надо отнести линейность вольт-амперной характеристики (характеристики намагничивания), что позволяет даже в нормальном режиме при отсутствии замыкания на землю применять методы настройки компенсации, которые при обычных катушках с перестановкой ответвлений возможны лишь в режиме замыкания фазы сети на землю. Кроме того, вследствие линейности характеристики намагничивания невелики токи высших гармоник во всём диапазоне регулирования [1]. Из-за малых потерь демпфирование сети катушкой незначительно.

В современных ДГР плунжерного типа для увеличения ресурса работы и надежности их механических систем применяют шарико-винтовые пары, благодаря чему уменьшаются потери на трение, обеспечивается размерное поступательное перемещение с высокой точностью, высокое быстродействие, плавный и практически бесшумный ход.

Диапазон регулирования тока компенсации в таких реакторах 5 – 100%.

Дугогасящий реактор с подмагничиванием магнитопровода (с изменением индуктивности подмагничиванием постоянным током). При подмагничивании постоянным током катушки с насыщающимся сердечником увеличивается её магнитный поток и снижается индуктивность. Однако применение обычного насыщающегося дросселя в качестве ДГР нецелесообразно, так как при насыщении очень сильно искажается форма кривой тока, что приводит к увеличению остаточного тока замыкания за счёт высших гармоник. В конструкциях ДГР с подмагничиванием предусматриваются специальные меры для уменьшения искажения кривой регулируемого тока. Конструктивно катушка выполняется из нескольких сердечников с системой обмоток постоянного и переменного тока.

Дугогасящий реактор с конденсаторной батареей. Такие ДГР имеют статическую конструкцию с одной силовой обмоткой и одной вспомогательной (нагрузочной обмоткой) – рис. 7. К вспомогательной обмотке подключается блок конденсаторных батарей. Настройка реактора происходит путём переключения конденсаторных элементов различного номинала, что позволяет изменять эквивалентную индуктивность реактора. Например, если снижается величина ёмкостных токов утечки сети ввиду отключения одного из фидеров, необходимое количество ёмкостных элементов подключается для настройки ДГР в резонанс. И наоборот, если вместо этого фидер подключается к сети (повышается суммарная ёмкостная утечка сети), необходимое количество ёмкостных элементов отключается [6]. Нагрузочная обмотка, рассчитанная на полную мощность ДГР, помимо батареи конденсаторов, при необходимости, позволяет подключать шкаф низковольтных резисторов для управления активным током ОЗЗ. Конструктивно блок конденсаторных батарей выполняется в виде отдельного шкафа.

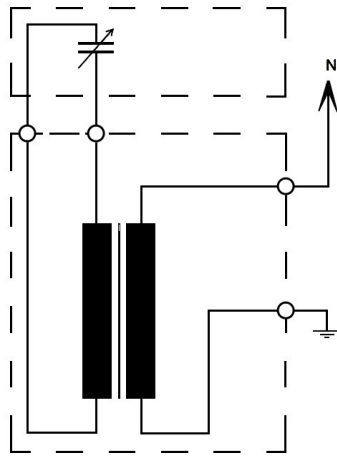


Рис. 7. Схема ДГР с конденсаторной батареей

К достоинствам таких ДГР можно отнести:

- отсутствие движущихся частей – повышенная надёжность;
- при сухом исполнении – отсутствует необходимость контроля масла;
- широкий диапазон регулирования;
- высокое быстродействие (время настройки на резонансный режим не превышает 1 с);
- точная настройка – отклонение менее 1%;
- возможность параллельной работы с ДГР других типов.

Все перечисленные выше виды ДГР конструктивно выполняются сухого типа (в защитном кожухе с литой или пропитанной изоляцией) или масляными (с расширительным баком и с реле Бухгольца или в герметичном исполнении) для внутренней и наружной установки. Масляные ДГР оснащаются индикаторами уровня масла с контактами аварийной сигнализации, клапаном сброса давления с отключающим контактом, термодатчиком что способствует повышению их безопасности. В масляных ДГР с расширительным баком также устанавливаются осушители воздуха. Для измерения напряжения нулевой последовательности, именуемого $3U_0$, катушки индуктивности ДГР содержат также измерительную (сигнальную) обмотку. Также ДГР имеют встроенный трансформатор тока, служащий для измерения тока замыкания на землю. Исполнения ДГР с возможностью подключения низковольтного резистора содержат вторичную силовую (нагрузочную) обмотку.

Трансформаторы для подключения дугогасящих реакторов. ДГР следует подключать к трансформаторам, имеющим соединение обмоток звезда с нейтралью – треугольник [1]. Токи компенсации, протекающие по обмотке звезды, создают магнитные потоки, которые наводят ЭДС и токи в обмотке, замкнутой в треугольнике. В свою очередь токи, замыкающиеся в треугольнике, обуславливают магнитные потоки в сердечнике трансформатора, направленные встречно потокам обмотки, соединённой в звезду. Происходит почти полная компенсация магнитных потоков, а небольшому потоку рассеяния обмоток соответствует индуктивность рассеяния весьма малая по сравнению

с индуктивностью катушки. Такие же условия имеют место при соединении обмоток и по схеме звезда с нейтралью – зигзаг.

При соединении обмоток трансформатора звезда с нейтралью – звезда наличие нескомпенсированных магнитных потоков обуславливает появление ЭДС самоиндукции, которые препятствуют протеканию токов катушки.

Помимо конструкции и группы соединений важно соотношение мощностей трансформатора и катушки. Часто катушка подключается к специально установленному трансформатору, не несущему никакой другой нагрузки. Тогда мощности трансформатора и катушки могут быть одинаковыми, и даже возможно подключение катушки к трансформатору меньшей мощности. Гораздо чаще катушки подключают к нейтралю трансформаторов, питающих нагрузку. При этом в режиме ОЗЗ такие трансформаторы дополнительно нагружаются индуктивным током. Отсюда возрастают активные потери в первичной и вторичной обмотках трансформатора, что ведёт к дополнительному перегреву.

Для выделения нейтрали также могут применяться заземляющие фильтры нулевой последовательности (нейтралеры), имеющие соединение обмоток по схеме зигзаг с нейтралью (рис. 8) [3, 5-6].

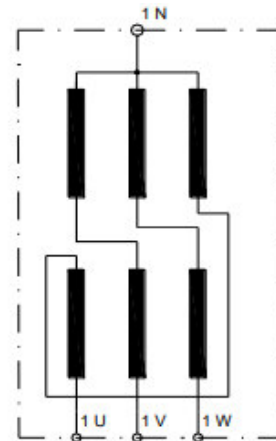


Рис. 8. Схема соединения обмоток нейтралера

Заземляющие дугогасящие агрегаты представляют собой оборудование с соответствующим нейтралером нулевой точки или заземляющим трансформатором и заземляющим дугогасящим реактором (в различных конструктивных вариантах) в одном баке [5]. Также в состав данного агрегата может быть встроен резистор для повышения активного остаточного тока. Пример общего вида такого агрегата показан на рис. 9, его электрической схемы – на рис. 10. Пример конструкции дугогасящего агрегата в разрезе показан на рис. 11.



Рис. 9. Заземляющий дугогасящий агрегат 10 кВ / 160 А для продолжительного режима работы (производство компании TRENCH, Австрия)

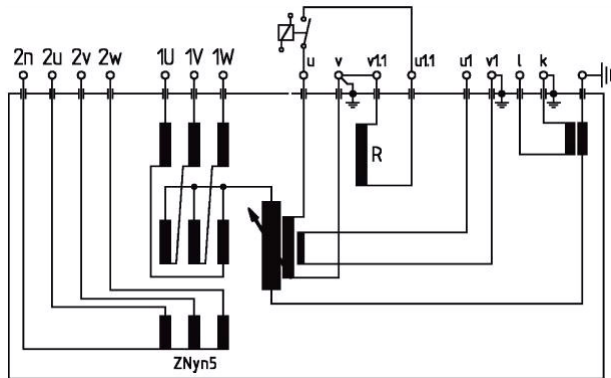


Рис. 10. Электрическая схема заземляющего дугогасящего агрегата с плунжерным реактором

На схеме рис. 10 обозначено: ZNyn5 – заземляющий трансформатор (1U, 1V, 1W – выводы первичной обмотки, 2n, 2u, 2v, 2w – выводы вторичной обмотки); u, v – выводы вторичной силовой (нагрузочной) обмотки реактора; u1, v1 – выводы сигнальной обмотки реактора для измерения напряжения нулевой последовательности $3U_0$; u1.1, v1.1 – выводы низковольтного резистора R; l, k – выводы вторичной обмотки измерительного трансформатора тока.

Заземляющие дугогасящие агрегаты имеют следующие преимущества:

- Компактная конструкция – требуется значительно меньше места для установки по сравнению с каждым прибором в отдельности;
- Экономичность установки – требуется на одну трансформаторную ячейку или на один фундамент с маслобункером меньше;
- Простое соединение шинами – нет необходимости во внешних соединениях между заземляющим трансформатором (или нейтралером) и ДГР.

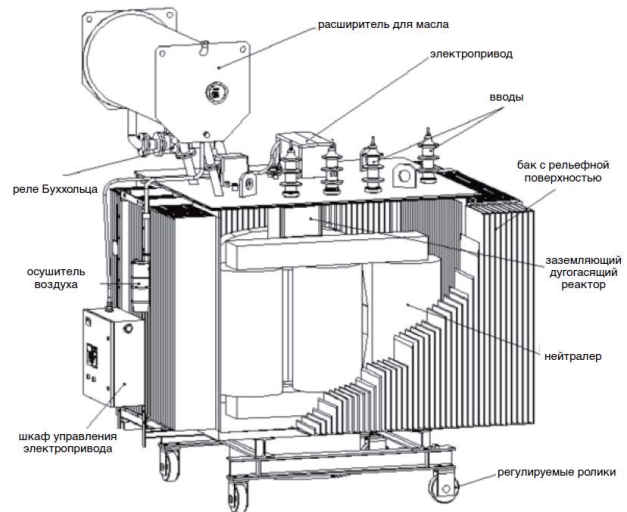


Рис. 11. Разрез заземляющего дугогасящего агрегата

Системы автоматической настройки и управления регулируемых установок компенсации емкостных токов в настоящее время выполняются микропроцессорными и позволяют реализовывать следующие функции:

- автоматическая настройка ДГР на заданный режим компенсации, в т.ч. при изменениях конфигурации сети;
 - возможность согласованного управления несколькими реакторами, в том числе комбинацией ступенчатых и плавнорегулируемых, на разных секциях шин при включении и отключении секционных выключателей;
 - возможность дистанционного управления без отключения от сети;
 - хранение журнала событий и осциллограмм однофазного замыкания на землю в памяти;
 - наличие функции регистрации событий (минимальный набор регистрируемых параметров: ток ДГР, напряжение $3U_0$, фазные напряжения, дата и время возникновения замыкания) в целях обеспечения оценки работоспособности системы компенсации.
- Указанные устройства имеют возможность вывода на экран системы управления и монитор оператора состояния реактора и компенсируемой сети в режиме реального времени (параметры настройки и текущего режима работы реактора, напряжение в нейтрали), вывода на монитор оператора осциллограмм напряжений и тока реактора при однофазном замыкании на землю и пр.
- Конструктивно такие системы выполняются в виде отдельных блоков, на лицевых панелях которых устанавливаются местные пульты управления и мониторы оператора (пример лицевой панели показан на рис. 12). Блоки монтируются в шкафах управления.

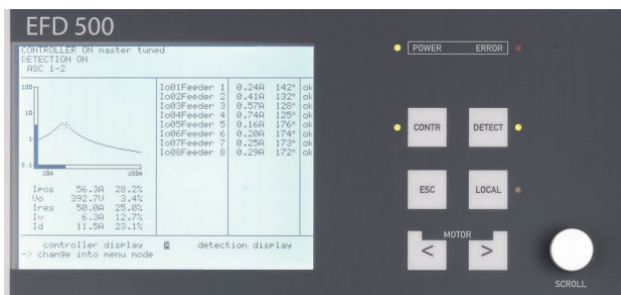


Рис. 12. Лицевая панель системы автоматической настройки и управления производства компании TRENCH (Австрия)

Ведущие производители таких систем предлагают также специализированное программное обеспечение для их настройки и управления через персональные компьютеры.

Такие системы имеют также возможность подключения к автоматизированным системам управления трансформаторных подстанций по стандартным протоколам обмена, принятым для промышленных локально вычислительных сетей.

Особенностью таких систем является то, что они могут работать в сетях с устройствами сторонних производителей.

Выводы.

1. Рассмотрены и проанализированы конструкции дугогасящих реакторов, распространённых на сегодняшний день типов регулирования индуктивности. Указаны их преимущества и недостатки при работе в режиме однофазного короткого замыкания на землю. Наиболее современными являются ДГР плунжерного типа с авторегулированием и ДГР с регулированием индуктивности переключением конденсаторных элементов.

2. Описаны преимущества соединения обмоток заземляющего трансформатора звезда с нейтралью – треугольник или звезда с нейтралью – зигзаг при подключении ДГР. Использование заземляющего трансформатора является лучшим вариантом для соединения нейтрали сети с землёй через ДГР, чем подключение катушки непосредственно к нейтрали силового трансформатора сети, т.к. при ОЗЗ в последнем возникают дополнительные активные потери и перегрев.

3. Рассмотрена конструкция заземляющих дугогасящих агрегатов и описаны преимущества такой компоновки перед отдельной установкой заземляющего трансформатора и ДГР.

4. Описаны функциональные возможности микропроцессорных систем автоматической настройки и управления установок компенсации емкостных токов.

5. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании новых и модернизации существующих установок компенсации емкостных токов в сетях среднего напряжения с целью наиболее рационального выбора соответствующего оборудования.

Список литературы

1. Черников А.А. Компенсация емкостных токов в сетях с незаземленной нейтралью. М., Энергия, 1974. – 96 с.
2. Е.Ю. Зорин, А.А. Чепелюк / Моделирование работы сети среднего напряжения с компенсированной нейтралью при однофазном замыкании на землю // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика: зб. наук. пр. – Харків: НТУ "ХПІ", 2018. – № 32 (1308). – С. 77-86.
3. <http://www.ege.cz/ru>.
4. http://ensons.ru/products_sections/earth_fault_current_reactors.
5. <http://www.trenchgroup.com/en/Products-Solutions/Coil-Products/Earth-Fault-Protection-System/Arc-Suppression-Coils>.
6. <http://www.swedishneutral.se/main.php?name=products>.
7. <https://www.siemens.com/content/dam/internet/siemens-com/at/application-pages/foe2017/stage-program-de/stage-program-de/data/pdf/e2-1-schloemmer-100-years-arc-suppression-coil.pdf>.

References (transliterated)

1. Chernikov A.A. Kompensatsiya emkostnykh tokov v setyakh s nezazemlennoy neytralyu. M., Energiya, 1974. – 96 p.
2. Ye. Yu. Zorin, A. A. Chepelyuk Modelirovanie raboty seti srednego napryazheniya s kompensirovannoy neytralyu pri odnofaznom zamykaniy na zemlyu Visnik Natsionalnogo tehchnogo universitetu "HPI". Ser.: Problemi udoskonalyuvannya elektrichnih mashin i aparativ. Teoriya i praktika: zb. nauk. pr. – Kharkiv: NTU "HPI", 2018. 32 (1308). Pp. 77-86.
3. <http://www.ege.cz/ru>.
4. http://ensons.ru/products_sections/earth_fault_current_reactors.
5. <http://www.trenchgroup.com/en/Products-Solutions/Coil-Products/Earth-Fault-Protection-System/Arc-Suppression-Coils>.
6. <http://www.swedishneutral.se/main.php?name=products>.
7. <https://www.siemens.com/content/dam/internet/siemens-com/at/application-pages/foe2017/stage-program-de/stage-program-de/data/pdf/e2-1-schloemmer-100-years-arc-suppression-coil.pdf>.

Поступила (received) 11.01.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Зорін Євгеній Юрійович (Зорин Евгений Юрьевич, Zorin Yevgeniy Yur'yevich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», магістр, кафедра електричних апаратів; 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; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4522-9821>; e-mail: 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; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7427-5419>; e-mail: grischnik@ukr.net.

Воїнов Володимир Володимирович (Воинов Владимир Владимирович, Voinov Volodimir Volodimirovich) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», заступник директора Навчально-наукового інституту енергетики, електроніки та електромеханіки; м. Харків, Україна; e-mail: vvvoinov.ieee@gmail.com.

О.Г. КОРОЛЬ, Б.В. КЛИМЕНКО, О.В. ЄРЕСЬКО

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В НОВОМУ НАПІВПРОВІДНИКОВОМУ ПРИСТРОЇ ФОРСОВАНОГО КЕРУВАННЯ МОНОСТАБІЛЬНИМ ЕЛЕКТРОМАГНІТОМ ВАКУУМНОГО КОНТАКТОРА

Проведено аналіз недоліків існуючих систем форсованого керування з пусковими і утримуючими обмотками, в яких застосовуються розмикальні внутрішні контакти керування, які комутують великі пускові струми. Аналіз зумовив пошук нових технічних рішень пов'язаних з підвищенням надійності таких систем за рахунок виключення зазначених контактів керування. Запропоновано новий напівпровідниковий пристрій форсованого керування моностабільним електромагнітом вакуумного контактора, в якому замість ненадійного внутрішньому контакту керування застосована нескладна електронна схема. Проведено експериментальне дослідження особливостей функціонування нового напівпровідникового пристрою форсованого керування моностабільним електромагнітом вакуумного контактора КВТн-250/1,14 виробництва компанії «Електродинаміка». Було проведено дві серії дослідів: перша серія дослідів була проведена для напівпровідникової системи форсованого керування, в якій відсутній замикальний внутрішній контакт керування, а друга серія дослідів – для системи форсованого керування в якій був наявний замикальний контакт який комутує незначний струм у колі керування. Були отримані осцилограми струму і напруги в пусковій та утримуючій обмотках при різних значеннях напруги $U = 220, 180, 150$ В та при живленні від джерела постійної напруги, а потім від джерела змінної напруги. Зроблені висновки та рекомендовано в новому напівпровідниковому пристрої форсованого керування моностабільним електромагнітом вакуумного контактора застосовувати замикальний внутрішній контакт керування, який спрацює в момент закінчення переміщення рухомої частини ще до моменту спрацювання пристрою керування, що не дозволить протіканню великого пускового струму через пускові обмотки. Новий напівпровідниковий пристрій форсованого керування моностабільним електромагнітом застосовується в продукції компанії «Електродинаміка» та успішно експлуатується з жовтня 2017 року і дотепер на декількох підприємствах гірничо-видобувної галузі (шахти, ГЗК).

Ключові слова: вакуумний контактор, актуатор, моностабільний електромагніт, пристрій форсованого керування, пускова обмотка, утримуюча обмотка.

Е.Г. КОРОЛЬ, Б.В. КЛИМЕНКО, А.В. ЄРЕСЬКО

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В НОВОМ ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ УСТРОЙСТВЕ ФОРСИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ МОНОСТАБИЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТОМ ВАКУУМНОГО КОНТАКТОРА

Проведен анализ недостатков существующих систем форсированного управления с пусковыми и удерживающими обмотками, в которых применяются размыкающие внутренние контакты управления, которые коммутируют большие пусковые токи. Анализ обусловил поиск новых технических решений, связанных с повышением надежности таких систем за счет исключения указанных контактов управления. Предложено новое полупроводниковое устройство форсированного управления моностабильным электромагнитом вакуумного контактора, в котором вместо ненадежного внутреннего контакта управления применена несложная электронная схема. Проведено экспериментальное исследование особенностей функционирования нового полупроводникового устройства форсированного управления моностабильным электромагнитом вакуумного контактора КВТн-250 / 1,14 производства компании «Электродинамика». Было проведено две серии опытов: первая серия опытов была проведена для полупроводниковой системы форсированного управления, в которой отсутствует замыкающий внутренний контакт управления, а вторая серия опытов - для системы форсированного управления в которой присутствовал контакт, коммутирующий незначительный ток в цепи управления. Были получены осциллограммы тока и напряжения в пусковой и удерживающей обмотках при различных значениях напряжения $U = 220, 180, 150$ В, при питании от источника постоянного напряжения, а затем при питании от источника переменного напряжения. Сделаны выводы и рекомендовано в полупроводниковом устройстве форсированного управления моностабильным электромагнитом вакуумного контактора применять замыкающий внутренний контакт управления, который сработает в момент окончания перемещения подвижной части еще до момента срабатывания устройства управления, что не позволит протеканию большого пускового тока через пусковые обмотки. Новое полупроводниковое устройство форсированного управления моностабильным электромагнитом применяется в продукции компании «Электродинамика» и успешно эксплуатируется с октября 2017 года и до сих пор на нескольких предприятиях горнодобывающей отрасли (шахты, ГОКи).

Ключевые слова: вакуумный контактор, актуатор, моностабильный электромагнит, устройство форсированного управления, пусковая обмотка, удерживающая обмотка.

O.G. KOROL, B.V. KLYMENKO, O.V. ERESKO

INVESTIGATIONS OF TRANSIENTS IN THE NOVEL SEMICONDUCTOR DEVICE OF FORCED CONTROL OF THE VACUUM CONTACTOR MONOSTABLE ELECTROMAGNET

The analysis of the disadvantages of the existing systems of forced control with buster and holding windings, in which the opening internal control contacts are used, which commute large starting currents, is carried out. The analysis is led to the search for new technical solutions related to improving the reliability of such systems by eliminating the indicated control contacts. A novel semiconductor device of forced control of the vacuum contactor monostable electromagnet is proposed, in which a simple electronic circuit is used instead of an unreliable internal control contact. The experimental investigations of the operating features of the novel semiconductor device of forced control of the КВТн-250/1,14 vacuum contactor monostable electromagnet produced by the Electrodynamics Company are carried out. Two series of experiments are conducted: the first series of experiments was conducted for the semiconductor device of forced control, in which there is no closing internal control contact, and the second series of experiments – for a forced control system in which the closing internal control contacts which commutes the insignificant current in the control circuit is used. The oscillograms of current and voltage in the buster and holding windings are obtained at various voltage values $U = 220, 180, 150$ V, and when powered from a source of constant voltage, and then from a source of alternating voltage. The conclusions are made and it is recommended to use a closing internal control contact in the forced control system of the vacuum contactor monostable electromagnet, which will operate when the moving part ends moving before the control device triggers, which will not allow a large starting current to flow through the starting windings. The novel semiconductor device of forced control of the monostable electromagnet is used in the products of the Electrodynamics Company and is successfully operating since October 2017 and still at several mining enterprises (mines, processing plants).

Key words: vacuum contactor, actuator, monostable electromagnet, forced control device, buster winding, holding winding.

© О.Г. Король, Б.В. Клименко, О.В. Єресько, 2019

Вступ. Дана робота є продовженням досліджень, наведених в [1]. Ці дослідження пов'язані з системами форсованого керування з пусковими та утримуючими обмотками, які застосовуються у вакуумних контакторах для зменшення їхніх розмірів та споживаної потужності, а також для підвищення швидкодії та надійності. Як було зазначено в [1], в таких системах зазвичай застосовуються двострижневі моностабільні електромагніти з двома котушками, кожна з яких містить по дві намотані одна на одну обмотки – пускову та утримуючу. Відрізняються ці обмотки по числу витків (пускова обмотка має відносно мале число витків, а утримуюча – велике), діаметром проводу, яким вони намотуються (пускова обмотка намотується проводом відносно великого поперечного перерізу, а утримуюча – проводом меншого поперечного перерізу). При цьому пускова обмотка розвиває значну МРС, а утримуюча – значно меншу МРС, потужність, що виділяється в пусковій обмотці, яка працює короткочасно, набагато перевищує потужність, що виділяється в утримуючій обмотці, яка може працювати тривало [2].

В роботі [1] показано, що найбільш поширеним на сьогоднішній день є пристрій форсованого керування з пусковими та утримуючими обмотками, принципова схема якого наведена на рис. 1.

У цій схемі (рис. 1) в момент пуску, тобто після приєднання входу діодного мосту до джерела постійної або змінної напруги, завдяки замкненому внутрішньому контакту керування до виходу мосту будуть приєднані включені послідовно обидві пускові обмотки В, а після спрацьовування, коли контакт керування розімкнеться, послідовно з ними підключаються ще й утримуючі обмотки Н [1, 3, 4].

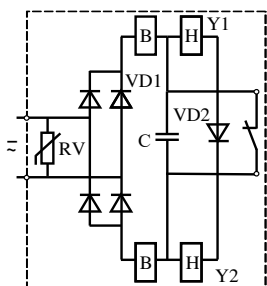


Рис. 1. Принципова схема найбільш поширеного пристрою форсованого керування, що застосовується у вакуумних контакторах [3-4]

В роботі [1] виділені такі недоліки даної системи форсованого керування:

- наявність нормально-замкненого внутрішнього контакту керування, який знижує надійність роботи системи внаслідок підвищеного зносу контакту під час горіння електричної дуги;

- недостатня експлуатаційна надійність пристрою, що обумовлена відсутністю захисту від неприпустимого зниження напруги, коли комутаційний апарат може не спрацювати і контакт не розімкнеться, внаслідок чого відбудеться збільшення пускового струму на пускових обмотках і вони можуть бути пошкоджені внаслідок перегріву;

- наявність конденсатора, який при виконанні операції вимикання розряджається на нормально-замкнений внутрішній контакт керування, що спричиняє знос останнього.

Виявлені в результаті експериментальних досліджень цього пристрою форсованого керування [1] суттєві його недоліки спонукали авторів до пошуку можливостей удосконалення цього пристрою, зокрема за рахунок заміни ненадійного контактної комутаційного елемента (внутрішнього розмикального контакту керування) напівпровідниковим комутаційним елементом, що дозволило суттєво підвищити надійність роботи пристрою в експлуатації.

Метою роботи є дослідження особливостей функціонування нового напівпровідникового пристрою форсованого керування моностабільним електромагнітом вакуумного контактора та експериментальне підтвердження його переваг відносно електромеханічного пристрою керування.

Новий напівпровідниковий пристрій форсованого керування моностабільним електромагнітом вакуумного контактора. Схема напівпровідникового пристрою форсованого керування показана на рис. 2 [5].

У цій схемі також передбачається використовувати моностабільний електромагніт з двома котушками КМ.У1 і КМ.У2 кожна з яких містить пускову В і утримуючу Н обмотки. Реалізовано той же принцип форсування, що й в електромеханічному пристрої, тобто на першому етапі (в період спрацьовування контактора) живляться тільки з'єднані послідовно пускові обмотки, а на другому етапі (після спрацьовування контактора) до них послідовно приєднуються обидві утримуючі обмотки, але замість розмикального внутрішнього контакту керування застосовано нескладний електронний пристрій, який містить таймер А з виводами ХТ1, ХТ2 (живлення) та ХТ3 (керуючий), а також біполярний транзистор VT з ізолюваним затвором (рис. 2). У цьому пристрої одночасно з подачею напруги на вхід пускових обмоток В подається напруга живлення і на таймер А через його виводи живлення ХТ1 та ХТ2. В цей момент таймер А запускається і видає сигнал на свій керуючий вивід ХТ3, з'єднаний з затвором транзистора VT. Останній відкривається і переходить в режим насичення на протязі всього заданого інтервалу часу роботи таймера А, який має бути більшим за час спрацьовування контактора з певним запасом. Струм, який тече через пускові обмотки В та біполярний транзистор VT, спричиняє спрацьовування електромагніта. По завершенні заданого інтервалу часу роботи таймера А, дія керуючого сигналу на затвор транзистора VT припиняється, останній закривається, підключаючи утримуючі обмотки послідовно з пусковими і зменшуючи струм до безпечного рівня навіть у випадку, коли контактор не спрацює (наприклад, при зниженні напруги). При цьому обмотки електромагніта не перегріваються й не виходять з ладу, як в електромеханічному пристрої з внутрішнім розмикальним контактом керування.

Певним недоліком цього пристрою є те, що весь час, поки таймер А не спрацює, великий пусковий струм буде проходити через пускові обмотки В й після спрацьовування контактора, що призводить до надлишкового нагрівання котушок. Цей недолік може бути подоланий за рахунок застосування внутрішнього замикального контакту керування ВL, який спрацьовує в момент закінчення переміщення рухомої частини ще до моменту спрацьовування таймера А, зменшуючи різницю потенціалів між затвором та емітером біполярного транзи-

стора VT практично до нуля, внаслідок чого він закривається й послідовно з пусковими обмотками В підключаються утримуючі обмотки Н тобто процес спрацьовування контактора повністю завершується [5].

При виконанні операції вимикання комутаційного апарата внаслідок команди, яка надходить ззовні від оператора або системи релейного захисту або від зовнішньої системи керування тощо, напруга живлення зі входу діодного випростувача VD1 знімається. При цьому послідовно з'єднані пускова та утримуюча обмотки першої котушки KM.Y1 електромагніта та пускова обмотки другої котушки KM.Y2 електромагніта закорочуються через діод VD2 та діодний випростувач VD1. Струм в зазначених обмотках зменшується за законом, близьким до експоненціального, рухома частина електромагніта під дією поворотної пружини повертається у положення спокою, а головні контакти комутаційного апарата розмикаються [5].

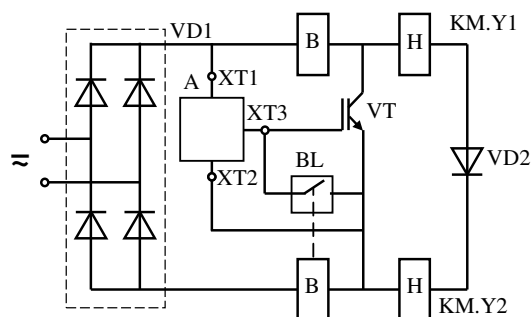


Рис. 2. Узагальнена схема напівпровідникової системи форсованого керування моностабільним електромагнітом

Ця узагальнена схема напівпровідникової системи форсованого керування моностабільним електромагнітом (рис. 2) може бути реалізована різними способами, один з яких представлено на рис. 3. Саме ця схема була предметом дослідження в даній роботі.

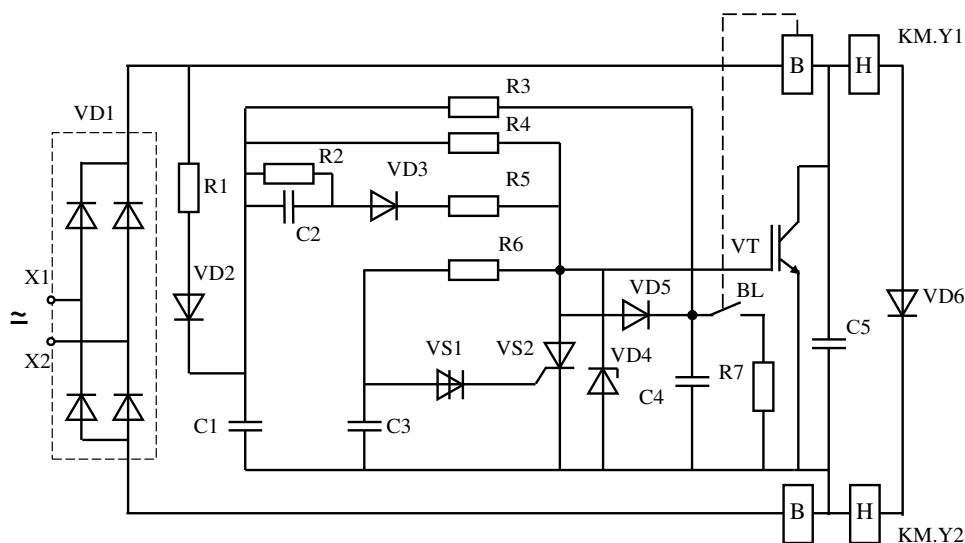


Рис. 3. Досліджувана реалізація напівпровідникової системи форсованого керування моностабільним електромагнітом

Після приєднання вхідних терміналів X1 та X2 до джерела постійної або змінної напруги ця напруга подається на вхід діодного мосту VD1, на виході якого з'являється відповідно постійна або двопівперіодна випростана напруга. До виходу діодного мосту приєднано послідовне коло, яке складається з елементів R1, VD2, C1 та обмотки В котушки KM.Y2. Параметри елементів цього кола підібрані так, що конденсатор C1 швидко заряджається і стає джерелом живлення для пристрою керування. Паралельно з цим, завдяки напрузі, що утворилася на виході діодного мосту, починає проходити струм через пускові обмотки В обох котушок (KM.Y1 й KM.Y2) та конденсатор C5, який швидко заряджається, після чого проходження струму у цьому колі припиняється.

У цей же час струм проходить також через гілку C2, R2, VD3, R5, в результаті чого на затвор біполярного транзистора VT подається потенціал певного рівня, який обмежується стабілітроном VD4, завдяки чому транзистор відкривається (з несуттєвою часовою затримкою після приєднання пристрою до джерела живлення) за рахунок відповідним чином підбраного співвідношення параметрів елементів вказаної гілки. Далі пусковий струм тече через включені послідовно

обидві пускові обмотки В котушок KM.Y1 й KM.Y2, що спричиняє штатне спрацьовування контактора.

В досліджуваній реалізації напівпровідникової системи форсованого керування моностабільним електромагнітом таймер реалізовано у вигляді одновібратора на елементах R6, C3, VS1, VS2, R4. Завдяки елементам цієї гілки, що складається з резистора R6 та конденсатора C3, конденсатор починає заряджатися й через певний проміжок часу, який є достатнім для спрацьовування контактора, напруга на конденсаторі C3 стає достатньою для відкриття дінистра VS1, після відкриття якого імпульс струму від конденсатора C3 забезпечує відкриття тиристора VS2, який розряджає ємність затвору VT, внаслідок чого транзистор VT закривається і перший етап включення контактора закінчується. Для підтримки тиристора у відкритому стані встановлено резистор R4.

Для того, щоб через пускові обмотки В не проходив великий пусковий струм після спрацьовування контактора, в цьому пристрої застосовують внутрішній замикальний контакт керування BL, який спрацьовує в момент закінчення переміщення рухомої частини й закоротить затвор транзистора VT по гілці VD5 – R7. Для усунення впливу брязкоту цього контакту на роботу транзистора VT встановлено резистор R3 і конденсатор C4.

Досліджуваний комутаційний апарат. Як і в роботі [1] експериментальні дослідження виконувалися на серійному вакуумному контакторі КВТн-250/1,14 виробництва компанії «Електродинаміка» [1, 6]. На рис. 4 наведено фото цього контактора з напівпровідниковою форсованою системою керування.

Позначення на рис. 4: 1 – вакуумні переривники, 2 – термінали, 3 – котушки, 4 – поворотна пружина, 5 – блоки допоміжних контактів, 6 – напівпровідниковий пристрій керування, 7 – монтажні отвори.

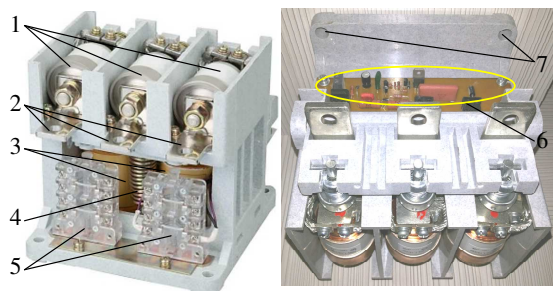


Рис. 4. Зовнішній вигляд досліджуваного контактора КВТн-250/1,14 з напівпровідниковою форсованою системою керування

У досліджуваному контакторі застосовано новий напівпровідниковий пристрій форсованого керування для контактора КВТн-250/1,14 (рис. 5), до якого було приєднано дві частини штепсельних рознімачів з штировими контактами (1 та 2) для приєднання обмоток двох котушок, до виводів яких було приєднано відповідні частини рознімачів з гніздовими контактами (4 та 5), а також резистори подільників напруги (3) та резистори, які виконували функції вимірювальних шунтів у колах пускової обмотки однієї з котушок (6) та утримуючої обмотки цієї ж котушки (7), термінал для приєднання внутрішнього контакту керування (8).

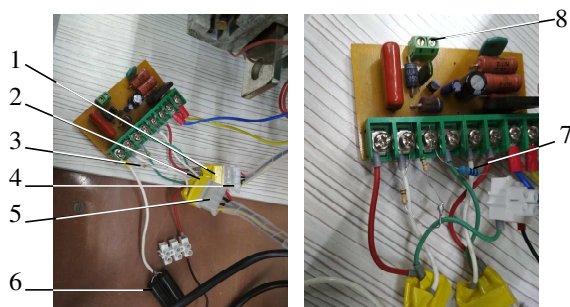


Рис. 5. Новий напівпровідниковий пристрій форсованого керування для досліджуваного контактора

Результати досліджень процесів в напівпровідниковій системі форсованого керування моностабільним електромагнітом контактора КВТн-250/1,14. Дослідження виконувалися із застосуванням двопробного цифрового осцилографа SIGLENT SDS1052 [7] для двох серій дослідів.

Перша серія дослідів була проведена для напівпровідникової системи форсованого керування, в якій відсутній внутрішній замикальний контакт керування BL (рис. 3). У другій серії дослідів було підключено внутрішній замикальний контакт керування BL (рис. 3, гілка R3, C4, VD5, BL, R7).

Отримані осцилограми струму і напруги в пусковій обмотці (рис. 6) і утримуючій обмотці (рис. 7), під час виконання операції включення, при постійній напрузі при $U = 220, 180, 150$ В для напівпровідникової системи форсованого керування, в якій відсутній внутрішній замикальний контакт керування BL (рис. 3) та в якій він є (рис. 3, гілка R3, C4, VD5, BL, R7).

Отримані осцилограми струму і напруги в пусковій обмотці (рис. 8) і утримуючій обмотці (рис. 9), під час виконання операції включення, при змінній напрузі при $U = 220, 180, 150$ В для напівпровідникової системи форсованого керування, в якій відсутній внутрішній замикальний контакт керування BL (рис. 3) та в якій він є (рис. 3, гілка R3, C4, VD5, BL, R7).

Згідно отриманих осцилограм було встановлено час спрацьовування електромагніта та час проходження пускового струму (табл. 1).

Таблиця 1 – Час спрацьовування електромагніта та час проходження пускового струму

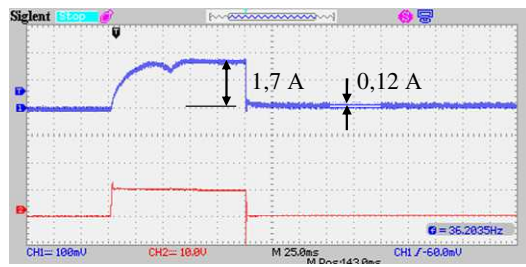
Без внутрішнього контакту керування BL			
Напруга	~ 220 В	~ 180 В	~ 150 В
Час спрацьовування електромагніта	50 мс	75 мс	не спрацював
Час проходження пускового струму	125 мс	125 мс	125 мс
За наявності внутрішнього контакту керування BL			
Напруга	~ 220 В	~ 180 В	~ 150 В
Час спрацьовування електромагніта	50 мс	75 мс	не спрацював
Час проходження пускового струму	50 мс	75 мс	125 мс
Без внутрішнього контакту керування BL			
Напруга	- 220 В	- 180 В	- 150 В
Час спрацьовування електромагніта	55 мс	110 мс	не спрацював
Час проходження пускового струму	125 мс	125 мс	125 мс
За наявності внутрішнього контакту керування BL			
Напруга	- 220 В	- 180 В	- 150 В
Час спрацьовування електромагніта	55 мс	110 мс	не спрацював
Час проходження пускового струму	55 мс	110 мс	125 мс

Проведені дослідження показали, що напівпровідникова форсована система керування має значні переваги порівняно з електромеханічною системою керування, розглянутою в роботі [1], а саме:

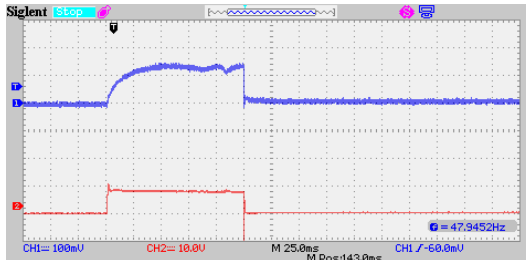
- підвищена надійність пристрою при експлуатації, оскільки у ньому забезпечується захист від виходу обмоток з ладу внаслідок неприпустимого перегрівання при зниженні напруги живлення в момент подачі команди на спрацьовування контактора;

- відсутність нормально-замкненого контакту керування, який застосовується в електромеханічній системі, і хоча конденсатор, який приєднується паралельно цьому контакту, суттєво зменшує знос при розмиканні ним великого пускового струму, цей конденсатор спричиняє значний знос вказаного контакту при його замиканні під час виконання контактором операції вимикання, що суттєво знижує надійність роботи контактора;

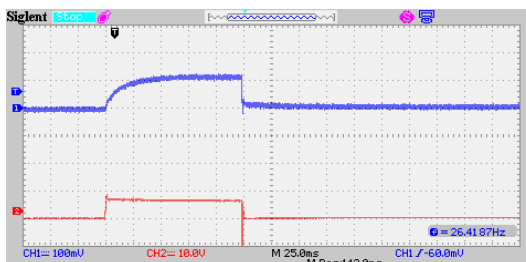
- застосування внутрішнього замикального контакту керування, який закриває біполярний транзистор в момент спрацьовування контактора, забезпечує відсутність надлишкового нагрівання обмоток, а також не знижує надійність роботи контактора, оскільки цей контакт комутує незначний струм у колі керування.



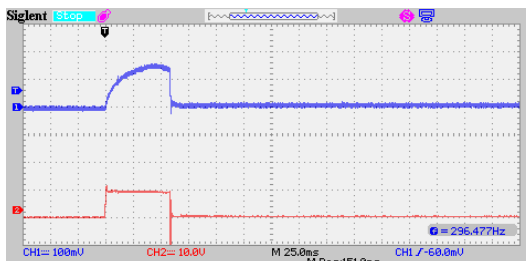
а – $U = 220$ В, без замикального контакту



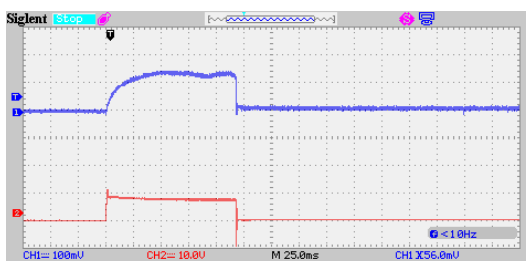
б – $U = 180$ В, без замикального контакту



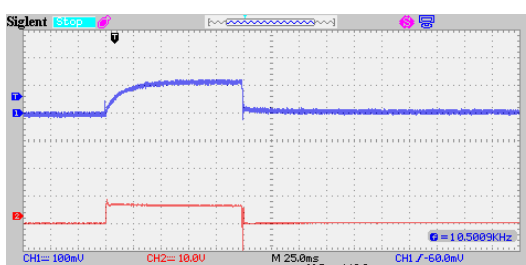
в – $U = 150$ В, без замикального контакту (не спрацював)



г – $U = 220$ В, із замикальним контактом

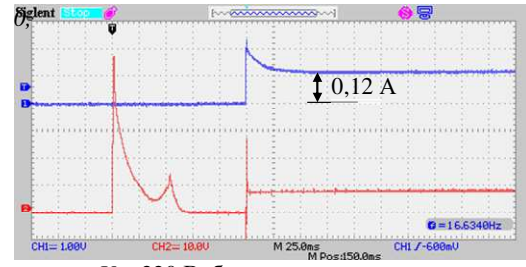


д – $U = 180$ В, із замикальним контактом

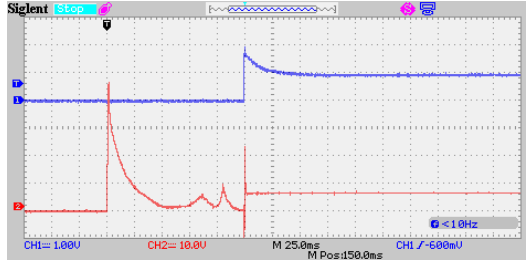


е – $U = 150$ В, із замикальним контактом (не спрацював)

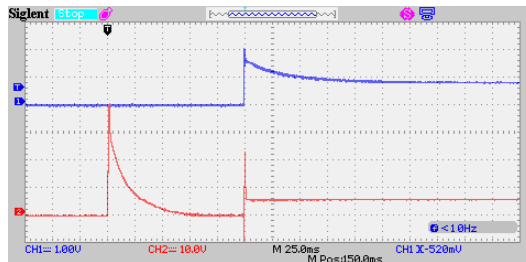
Рис. 6. Динамічні характеристики струму і напруги в пусковій обмотці при живленні від джерела постійної напруги (опір шунта у колі цієї обмотки становить 0,1 Ом)



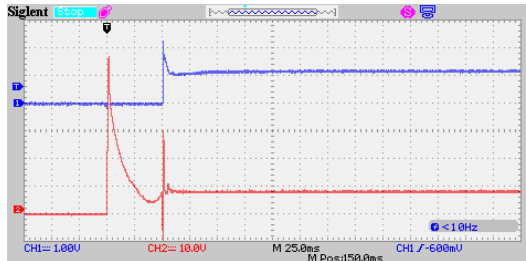
а – $U = 220$ В, без замикального контакту



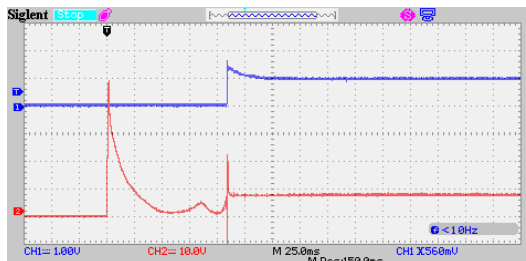
б – $U = 180$ В, без замикального контакту



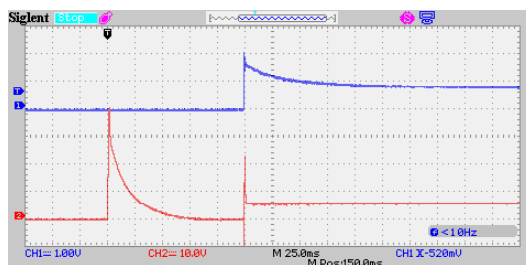
в – $U = 150$ В, без замикального контакту (не спрацював)



г – $U = 220$ В, із замикальним контактом

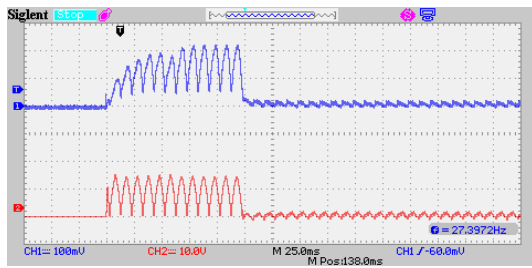


д – $U = 180$ В, із замикальним контактом

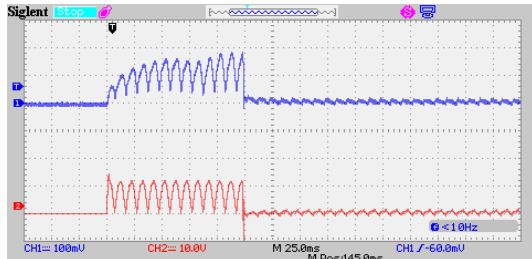


е – $U = 150$ В, із замикальним контактом (не спрацював)

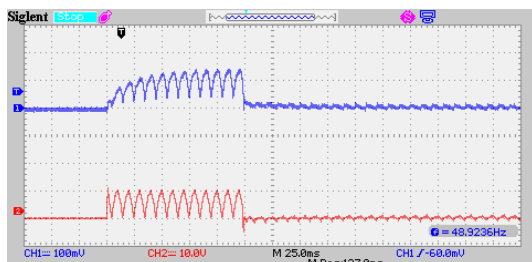
Рис. 7. Динамічні характеристики струму і напруги в утримуючій обмотці при живленні від джерела постійної напруги (опір шунта у колі цієї обмотки становить 10 Ом)



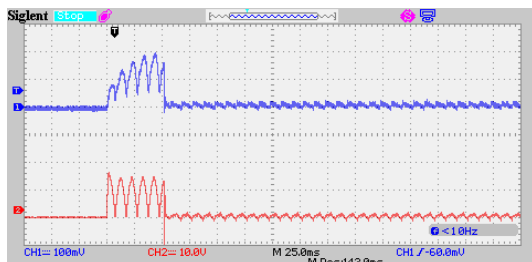
а – $U = 220$ В, без замыкального контакту



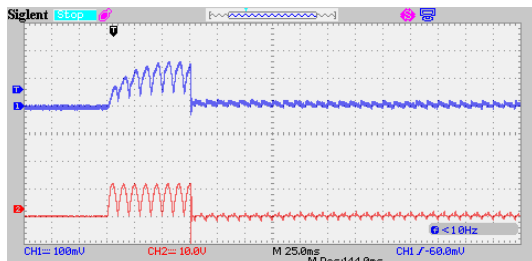
б – $U = 180$ В, без замыкального контакту



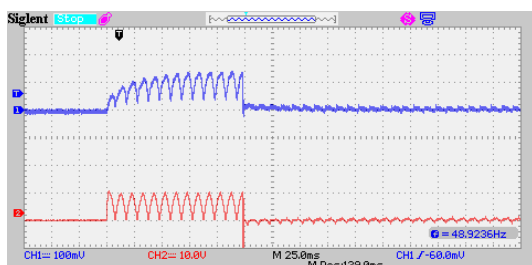
в – $U = 150$ В, без замыкального контакту (не спрацював)



г – $U = 220$ В, із замыкальним контактом

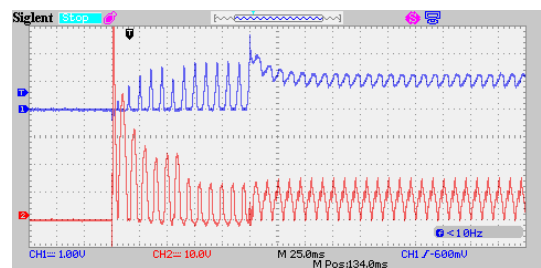


д – $U = 180$ В, із замыкальним контактом

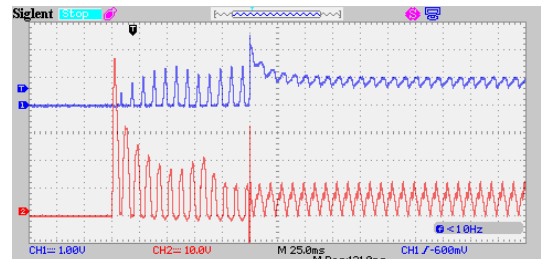


е – $U = 150$ В, із замыкальним контактом (не спрацював)

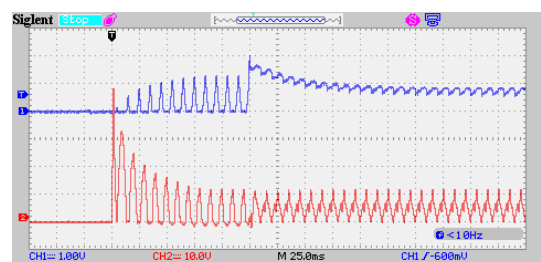
Рис. 8. Динамічні характеристики струму і напруги в пусковій обмотці при живленні від джерела змінної напруги (опір шунта у колі цієї обмотки становить 0,1 Ом)



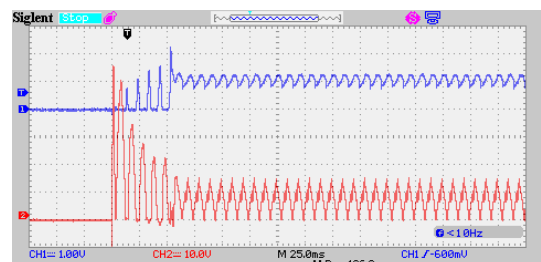
а – $U = 220$ В, без замыкального контакту



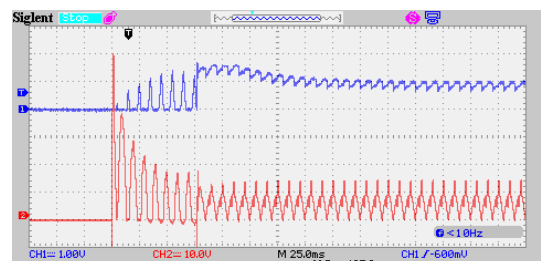
б – $U = 180$ В, без замыкального контакту



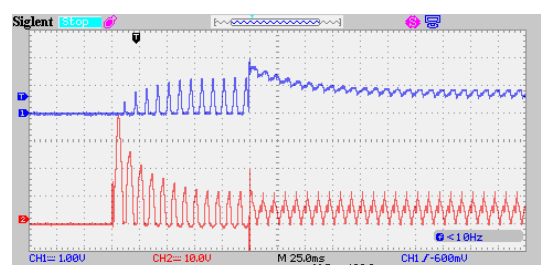
в – $U = 150$ В, без замыкального контакту (не спрацював)



г – $U = 220$ В, із замыкальним контактом



д – $U = 180$ В, із замыкальним контактом



е – $U = 150$ В, із замыкальним контактом (не спрацював)

Рис. 9. Динамічні характеристики струму і напруги в утримуючій обмотці при живленні від джерела змінної напруги (опір шунта у колі цієї обмотки становить 10 Ом)

Висновки.

1. Проведений аналіз недоліків існуючих пристроїв форсованого керування електромагнітами з пусковими і утримуючими обмотками та внутрішніми розмикальними контактами керування, що застосовуються у вакуумних контакторах. Аналіз зумовив пошук нових технічних рішень, спрямованих на підвищення надійності таких систем за рахунок виключення зазначених контактів керування.

2. Дослідження запропонованого авторами нового напівпровідникового пристрою форсованого керування моностабільним електромагнітом вакуумного контактора, в якому замість ненадійного внутрішнього розмикального контакту керування застосована відносно нескладна електронна схема, виявило переваги цього пристрою над відповідним електромеханічним пристроєм.

3. Показана одна з можливих реалізацій напівпровідникового пристрою форсованого керування моностабільним електромагнітом і проведено експериментальні дослідження процесів у цьому пристрої без внутрішнього замикального контакту керування та з таким контактом. Були виявлені переваги напівпровідникового пристрою форсованого керування з внутрішнім замикальним контактом керування.

4. Використання замикального контакту керування в напівпровідниковому пристрої є набагато ефективнішим, аніж застосування розмикального контакту в електромеханічному пристрої, оскільки розмикальний контакт комутує великий струм, а замикальний контакт комутує значно менший струм і практично не зношує цей контакт, який фактично є сигнальним, тому надійність пристрою підвищується.

5. Звертає на себе увагу той факт, що при живленні пристрою від джерела змінної напруги через випростувальний діодний міст, виникає розбіжність кривих струму в пускових та утримуючих обмотках, які, на перший погляд, здаються з'єднаними послідовно після того, як закривається транзистор, який шунтує утримуючі обмотки. Насправді ж послідовно з'єднаними у цьому режимі є тільки пускові обмотки, а послідовно до них приєднано коло, яке складається з послідовно з'єднаних двох утримуючих обмоток та діода, з конденсатором, приєднаним паралельно до цього кола. Ця розбіжність пояснюється тим, що струми в пускових та утримуючих обмотках містять постійні та змінні складові, причому постійні складові в пускових та утримуючих обмотках співпадають, а змінні складові – відрізняються за рахунок розгалуженості кола саме для змінних складових. У майбутньому цей висновок бажано підкріпити відповідними розрахунками.

6. Декілька зразків нового напівпровідникового пристрою форсованого керування було передано компанії «Електродинаміка», яка встановила їх на досвідні зразки контакторів, які з жовтня 2017 року безвідмовно експлуатуються на декількох підприємствах гірничо-видобувної галузі (шахти, ГЗК), що свідчить про високу надійність даного технічного рішення.

Список літератури

1. Король О.Г., Клименко Б.В., Ереско О.В. Дослідження перехідних процесів в пристрої форсованого керування моностабільним електромагнітом вакуумного контактора // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика – 2018. – № 32 (1308). – С. 34-40.
2. Клименко, Б. В. Форсированные электромагнитные системы / Б. В. Клименко. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 160 с.
3. <https://electrodinamika.com.ua/catalog/vacuum-contactors/shakhtnye-vakuumnye-kontaktery/kontaktor-shakhtnyy-kvtn-250-1-1.php>
4. <https://docplayer.ru/42858351-Tehnicheskij-pasport-kontaktor-vakuumnyy-reversivnyy-vk-49-r-tehnicheskoe-opisanie-kontaktor-vakuumnyy-vk49-tehnicheskoe-opisanie.html>
5. Пат. 131531 Україна, МПК H01F 7/18 (2006.01), H01F 7/06 (2006.01), H01H 33/38 (2006.01). Пристрій для форсованого керування моностабільним електромагнітом / Бугайчук В.М., Клименко Б.В., Ереско О.В., Король О.Г. – № u201805507; заявл. 18.05.2018; опубл. 25.01.2019, Бюл. № 2. <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=254922>
6. Каталог "Контакты электромагнитные трехполюсные переменного тока серии КНТ" [Электронный ресурс] - URL:<http://www.uralelectro.ru/upload/file/KNT.doc> (27.03.2013). <http://www.findpatent.ru/patent/262/2624659.html>
7. <https://all-spares.ua/ru/digital-oscilloscope-siglent-sds1052dl.php>

References (transliterated)

1. Korol O.G., Klymenko B.V., Eresko O.V. Investigations Of Transients In The Device Of Forced Control Of The Vacuum Contactor Monostable Electromagnet. Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Problems of electrical machines and apparatus perfection. Theory and practice. 2018. No 32 (1308). Pp. 34-40.
2. Klymenko B.V. Forced Electromagnetic Systems. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 160 p.
3. <https://electrodinamika.com.ua/catalog/vacuum-contactors/shakhtnye-vakuumnye-kontaktery/kontaktor-shakhtnyy-kvtn-250-1-1.php>
4. <https://docplayer.ru/42858351-Tehnicheskij-pasport-kontaktor-vakuumnyy-reversivnyy-vk-49-r-tehnicheskoe-opisanie-kontaktor-vakuumnyy-vk49-tehnicheskoe-opisanie.html>
5. Pat. 131531 Ukraine, IPC H01F 7/18 (2006.01), H01F 7/06 (2006.01), H01H 33/38 (2006.01). A device for forced control of a monostable electromagnet/ Bugaychuk V.M., Klymenko B.V., Eresko O.V., Korol O.G. – № u201805507; declared 18.05.2018; published by 25.01.2019, Bul. № 2. <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=254922>
6. Catalog "Electromagnetic three-pole contactors of alternating current series CST" [Electronic resource] - URL: <http://www.uralelectro.ru/upload/file/KNT.doc> (27.03.2013). <http://www.findpatent.ru/patent/262/2624659.html>
7. <https://all-spares.ua/ru/digital-oscilloscope-siglent-sds1052dl.php>

Надійшла (received) 10.02.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

Клименко Борис Володимирович (Клименко Борис Владимирович, Klymenko Borys Volodymyrovych) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач, професор кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7393-6198>; e-mail: b.v.klymenko@gmail.com

Ереско Олександр Вячеславович (Ереско Александр Вячеславович, Yeresko Oleksandr Viacheslavovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри промислової і біомедичної електроніки; м. Харків, Україна; e-mail: aerhoff@gmail.com

М.А. ЛЕЛЮК, Б.В. КЛИМЕНКО

ГІБРИДНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ МОНОСТАБІЛЬНИМ ПОЛЯРИЗОВАНИМ ПРИВОДОМ ВАКУУМНОГО КОНТАКТОРА

Проведено аналіз систем керування вакуумних контакторів середніх напруг. Виявлено недоліки електромеханічних та мікропроцесорних систем керування. Встановлено, що перспективним напрямком удосконалення систем керування є розробка мікропроцесорних гібридних систем керування обмоткою електромагнітів на основі використання малогабаритних електромеханічних інтерфейсних реле. Розроблено алгоритм роботи та мікропроцесорна гібридна система керування моностабільним поляризованим електромагнітом з однією котушкою. Проведено експериментальні дослідження роботи мікропроцесорної гібридної системи керування, результатами яких були значення часу ввімкнення контактора 65 мс та вимкнення 60 мс. Ці значення знаходяться в межах відповідних часових інтервалів спрацьовування моделей вакуумних контакторів середніх напруг провідних світових виробників. Розроблена мікропроцесорна система керування моностабільним поляризованим електромагнітним приводом пройшла експериментальну перевірку на прототипах декількох контакторів.

Ключові слова: вакуумний контактор, моностабільний та бістабільний електромагніт, інтерфейсне реле, постійний магніт, гібридна система керування.

М.А. ЛЕЛЮК, Б.В. КЛИМЕНКО

ГИБРИДНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МОНОСТАБИЛЬНЫМ ПОЛЯРИЗОВАННЫМ ПРИВОДОМ ВАКУУМНОГО КОНТАКТОРА

Проведен анализ систем управления вакуумных контакторов средних напряжений. Выявлены недостатки электромеханических и микропроцессорных систем управления. Установлено, что перспективным направлением совершенствования систем управления является разработка микропроцессорных гибридных систем управления обмоткой электромагнитов на основе использования малогабаритных электромеханических интерфейсных реле. Разработан алгоритм работы и микропроцессорная гибридная система управления моностабильным поляризованным электромагнитом с одной катушкой. Проведены экспериментальные исследования работы микропроцессорной гибридной системы управления, результатами которых были значения времени включения контактора 65 мс и выключение 60 мс. Эти значения находятся в пределах соответствующих временных интервалов срабатывания моделей вакуумных контакторов средних напряжений ведущих мировых производителей. Разработанная микропроцессорная система управления моностабильным поляризованным электромагнитным приводом прошла экспериментальную проверку на прототипах нескольких контакторов.

Ключевые слова: вакуумный контактор, моностабильный и бистабильный электромагнит, интерфейсное реле, постоянный магнит, гибридная система управления.

М.А. LELIUK, B.V. KLYMENKO

HYBRID CONTROL SYSTEM FOR MONOSTABLE POLARIZED VACUUM CONTACTOR DRIVE

The analysis of control systems for medium voltage vacuum contactors is carried out. The shortcomings of electromechanical and microprocessor control systems are revealed. It has been established that a promising direction for improving control systems is the development of microprocessor hybrid control systems for electromagnets winding based on the use of compact electromechanical interface relays. An algorithm of operation and a microprocessor hybrid control system for a monostable polarized single-coil electromagnet are developed. Experimental investigations of the microprocessor hybrid control system operation are carried out, the results of which are the values of the turn-on time of the contactor of 65 ms and of the turn-off of 60 ms. These values are within the corresponding time intervals of operation of the models of medium voltage vacuum contactors from leading world manufacturers. The developed microprocessor control system for a monostable polarized electromagnetic drive has been experimentally tested on prototypes of several contactors.

Key words: vacuum contactor, monostable and bistable electromagnet, interface relay, permanent magnet, hybrid control system.

Вступ. Вакуумні контактори широко застосовуються у різних галузях промисловості. В якості приводів цих контакторів використовуються форсовані моностабільні неполяризовані двохстрижневі електромагнітні приводи (електромагніти з поворотними пружинами) та бістабільні поляризовані електромагніти [1-7]. Відомі способи керування обмотками приводів таких контакторів, які використовують форсовані електромеханічні та мікропроцесорні пристрої [8].

Керування моностабільним неполяризованим двохстрижневим електромагнітним приводом відбувається електромеханічною системою. Для зменшення споживної потужності у ввімкненому положенні керування

відбувається у форсованому режимі з використанням пускових та утримуючих обмоток (рис. 1) [9]. Виводи пускових обмоток позначені як $A1$ і $A2$, виводи утримуючих обмоток – як $B1$ і $B2$. Діодний міст VD забезпечує можливість живлення пристрою форсованого керування як від джерела змінної, так і від джерела постійної напруги, а послідовний $R-C$ ланцюг забезпечує іскрогасіння. До моменту розмикання допоміжного контакту утримуючі обмотки $B1$ і $B2$ опиняються закороченими, що істотно збільшує струм в пусковій обмотці $A1$ і $A2$, а відтак, прискорює процес включення апарату.

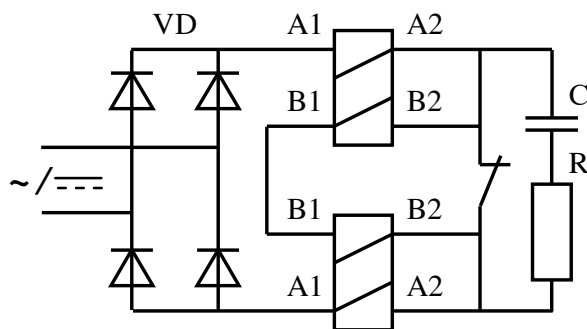
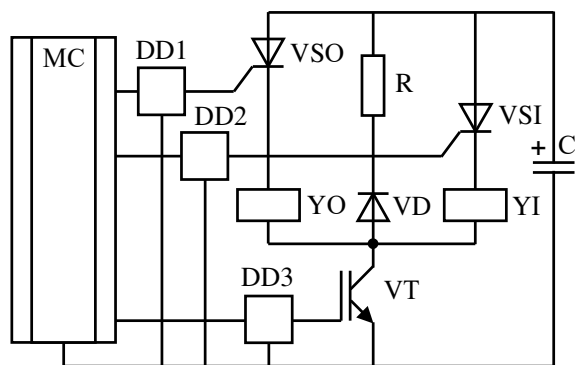


Рис. 1. Схема пристрою форсованого керування для двофазного електромагніта з пусковими (A1-A2) і утримуючими (B1-B2) обмотками

Допоміжний розмикаючий контакт, який використовується в даній системі форсованого управління, не може бути звичайним *b*-контактом. Цей контакт повинен розмикатися в самому кінці руху якоря електромагніта і вимагає дуже точного регулювання, оскільки більш раннє розмикання може привести до появи дзвонового ефекту, а не розмикання цього контакту призведе до не вимкнення пускової обмотки, її неприпустимого перегріву і пошкодження.

Пізнніше розмикання контакту означає, що між його рухомою і нерухомою компонентами встановлюється дуже малий зазор, що ускладнює гасіння електричної дуги, що виникає на цьому контакті, і призводить до його підвищеного зносу навіть за умови застосування іскрогасних ланцюгів. Досвід експлуатації таких контакторів показує, що однією з головних причин їх відмов є виникнення ушкоджень саме в системі форсованого керування. Також є ймовірність перегрівання котушок електромагніта та вихід їх з ладу при зниженні напруги ланцюга керування контактора.

Що стосується систем керування бістабільними поляризованими електромагнітами, то використання мікропроцесорної системи керування усуває ці недоліки та розширює функціональні можливості пристрою. На рис. 2 показана схема системи керування контактором



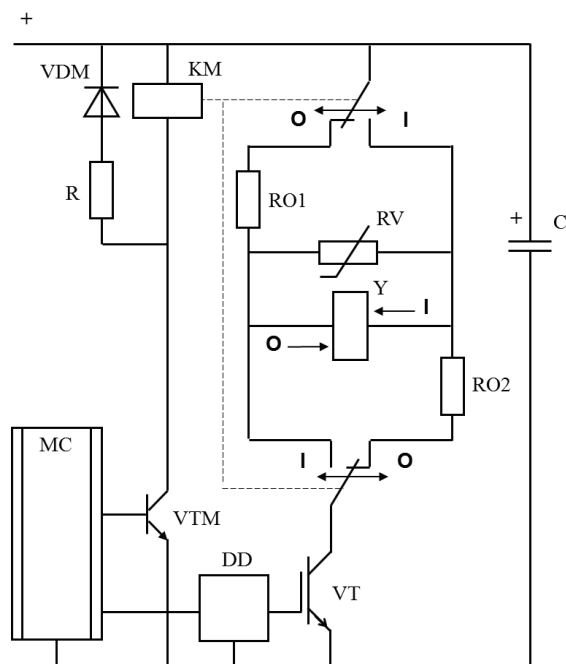
YI, YO – обмотки включення і відключення; VT – силовий транзистор; VSI, VSO – тиристри, комутуючі ланцюги відповідних обмоток; VD – діод; R – резистор; DD1-DD3 – драйвери; MC – мікроконтролер; C – електролітичний конденсатор

Рис. 2. Схема силового ланцюга мікропроцесорної системи керування обмотками бістабільного поляризованого електромагніта

Силовий ланцюг системи керування обмотками електромагніта складається з напівпровідникових комутаційних елементів – силового транзистора VT і двох тиристорів, одного VSI в колі ввімкнення та одного VSO в колі вимкнення контактора. Певним недоліком даної системи керування є необхідність витримки певної паузи під час виконання операції ввімкнення та вимкнення контактора, тривалість якої може становити кілька десятків мілісекунд (це час запирання відповідного тиристора) [10]. Наприклад, після виконання операції ввімкнення контактора, необхідно миттєво його вимкнути. Для цього мікроконтролер MC через драйвер DD3 подає керуючий сигнал на затвор транзистора VT і через драйвер DD1 короткий імпульс струму на керуючий електрод тиристора VSO, в результаті чого обмотка вимкнення YO електромагніта підключається до джерела живлення і відбувається операція вимкнення контактора. Відсутність певної паузи між комутаційними операціями призводить до відкриття транзистора VT і тиристора VSO при відкритому тиристорі VSI і як наслідок, операція вимкнення контактора може не відбутися, а це, в свою чергу, може призвести до серйозної аварії, наприклад, якщо потрібно виконати вимкнення апарату відразу ж після ввімкнення його на короткозамкнутий ланцюг.

Мета роботи – аналіз систем керування вакуумних контакторів середніх напруг та розробка нової мікропроцесорної гібридної системи керування моностабільним поляризованим електромагнітним приводом.

Мікропроцесорна гібридна система керування бістабільним поляризованим електромагнітним приводом. На теперішній час найбільш перспективними та надійними є саме мікропроцесорні системи керування. В цих пристроях застосовуються або приводи з декількома обмотками або однообмоткові приводи з керуванням за допомогою мостової схеми, утвореної чотирма силовими IGBT транзисторами або тиристорами [11-14]. Головним недоліком цих схем є використання чотирьох силових транзисторів та драйверів до них або транзистора, тиристорів і драйверів, які є коштовними елементами і підвищують вартість пристрою. Для усунення цих недоліків пропонується використання гібридної системи керування, яка засновується на використанні інтерфейсного реле з двома перемикаючими контактними групами та одного силового транзистора (рис. 3) [15].



MC – мікроконтролер, *DD* – драйвер, *VT* – силовий IGBT транзистор, *Y* – обмотка електромагніта, *C* – конденсатор, *VTM* – біполярний транзистор, *KM* – обмотка інтерфейсного реле з двома перемикаючими контактними групами, *VDM* – діод, *R*, *RO1*, *RO2* – резистори, *RV* – варистор

Рис. 3. Основні елементи силової частини гібридної системи керування електромагнітним приводом вакуумного контактора

Алгоритм роботи системи керування моностабільним поляризованим електромагнітом

Перш ніж розглядати роботу системи керування моностабільним поляризованим електромагнітом слід звернути увагу на те, що наявність поворотної пружини в механічній системі контактора, робить привод бістабільним поляризованим, тобто він має два положення спокою, що відповідають ввімкненому та вимкненому стану контактора. Враховуючи це, робота гібридної системи керування електромагнітним приводом здійснюється таким чином. При виконанні операції ввімкнення вакуумного контактора (у якому до того завдяки бістабільному елементу привідний електромагніт знаходився в положенні спокою у розімкненому стані, а головні контакти були розімкненими) внаслідок команди, яка надходить ззовні від оператора або системи релейного захисту чи від зовнішньої системи керування тощо, вивід одного з портів мікроконтролера *MC* видає керуючий сигнал на базу біполярного транзистора *VTM*, останній відкривається, при цьому внаслідок розряду конденсатора *C* струм проходить через обмотку інтерфейсного реле *KM*, воно спрацьовує і перемикальні контакти двох перемикаючих контактних груп замикаються з виводами відповідних замикальних контактів (рис. 3). Після певної паузи, тривалість якої перевищує період брязкоту контактів інтерфейсного реле *KM*, вивід іншого порту мікроконтролера *MC* через драйвер *DD* видає керуючий сигнал на затвор силового IGBT транзистора *VT*, останній відкривається і струм розряду

конденсатора *C* проходить через обмотку електромагніта *Y*, що призводить до його спрацьовування, тобто до переходу у положення спокою в замкненому стані, в результаті чого головні контакти вакуумного контактора замикаються і операція ввімкнення контактора завершується. При цьому від датчика положення (на рис. 3 не показаний) на мікроконтролер *MC* подається сигнал про завершення операції ввімкнення, мікроконтролер *MC* знімає керуючий сигнал з затвору силового транзистора *VT* і він закривається, а після певної паузи, тривалість якої перевищує час розмагнічування обмотки електромагніта *Y* (зменшення струму у ній до нуля завдяки варистору *RV*, опір якого автоматично зменшується в момент закриття транзистора *VTM* внаслідок збільшення напруги на обмотці електромагніта *Y* у цей момент, і автоматично збільшується після зменшення практично до нуля струму в обмотці електромагніта *Y*), мікроконтролер *MC* знімає керуючий сигнал з бази біполярного транзистора *VTM*, останній закривається і обмотка інтерфейсного реле *KM* знеструмлюється. При цьому перемикальні контакти двох перемикаючих контактних груп переходять у початкове положення тобто замикаються з відповідними розмикальними контактами. Завдяки бістабільному елементу, незважаючи на відсутність струму в обмотці, електромагніт залишається у положенні спокою в замкненому стані, головні контакти вакуумного контактора залишаються також у замкненому стані, а сам контактор стає готовим до виконання операції вимкнення.

При виконанні операції вимкнення вакуумного контактора внаслідок команди, яка надходить ззовні від оператора або системи релейного захисту чи від зовнішньої системи керування тощо, мікроконтролер *MC* через вивід одного з портів видає сигнал на вхід драйвера *DD*, який видає керуючий сигнал на затвор силового IGBT транзистора *VT*, останній відкривається і струм розряду конденсатора *C* проходить через обмотку електромагніта *Y* у зворотному напрямі, електромагніт переходить у розімкнене положення і головні контакти також розмикаються. Від датчика положення (не показаний) на мікроконтролер *MC* подається про це сигнал, останній знімає керуючий сигнал з затвору силового транзистора *VT* і він закривається. Після певної паузи, тривалість якої перевищує час розмагнічування обмотки електромагніта *Y* (зменшення струму у ній до нуля завдяки варистору *RV*), контактор стає готовим до виконання наступної операції вмикання.

Таким чином, гібридна система керування забезпечує операції ввімкнення та вимкнення вакуумного контактора з бістабільним поляризованим приводом на основі використання моностабільного поляризованого електромагніта з однією обмоткою та поворотної пружини.

Експериментальні дослідження мікропроцесорної гібридної системи керування. Для проведення експериментальних досліджень розроблено гібридну систему керування, що показана на рис. 4.

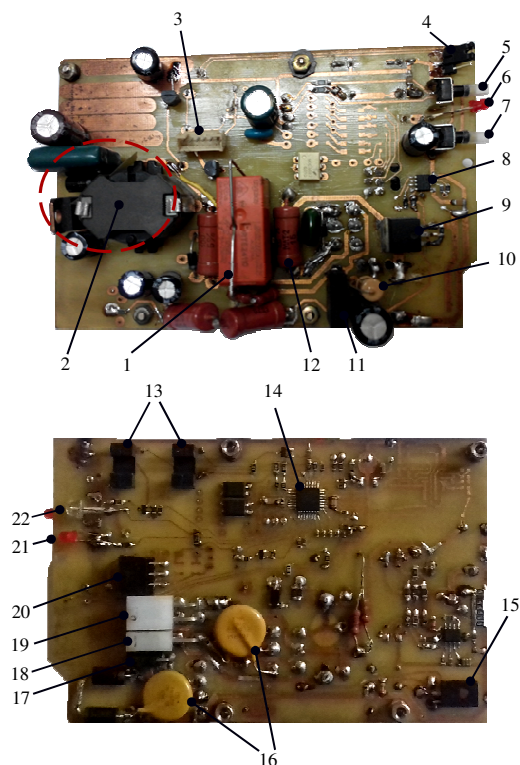


Рис. 4. Гібридна система керування приводом вакуумного контактора

Місця розміщення основних елементів гібридної системи керування на печатній платі наступні:

1 – інтерфейсне реле RTE24110 з номінальною напругою живлення обмотки $U_s = 110$ В.

2 – блок живлення для заряду конденсатора;

3 – штирьовий роз'єм для підключення програматора мікроконтролера;

4 – перемикач режимів роботи контактора. Мікропроцесорна система керування має три режими роботи: режим звичайного контактора (Single Command Operated) [6], режим контактора з заціпкою (Double Command Operated), режим перевірки на механічну зносостійкість (циклічний режим). Останній режим використовується тільки в дослідному зразку контактора. Більш детально кожен з режимів роботи буде розглянуто далі;

5 – кнопка ввімкнення контактора;

6 – діод червоного кольору, сигналізує готовність системи керування до виконання операції ввімкнення або вимкнення контактора. Блімання діода свідчить про правильну роботи системи керування;

7 – кнопка вимкнення контактора;

8 – драйвер силового IGBT транзистора;

9 – силовий IGBT транзистор;

10 – резистор кола живлення;

11 – випрямляч (діодний міст);

12 – резистор в колі котушки електромагніта при вимкненні контактора;

13 – оптосимістори – датчики положення механічної системи контактора та електромагніта. Більш детально робота датчика буде розглянуто далі;

14 – мікроконтролер ATmega8;

15 – біполярний транзистор керування обмоткою інтерфейсного реле;

16 – варистор для «розмагнічування» обмотки при завершенні операції ввімкнення або вимкнення контактора;

17 – гніздовий роз'єм для підключення системи керування до мережі живлення 220 В, 50 Гц (можливість підключення до мережі з постійною напругою);

18 – гніздовий роз'єм для підключення виводів котушки електромагніта;

19 – гніздовий роз'єм для підключення виводів зарядного резистора конденсатора та виводів конденсатора;

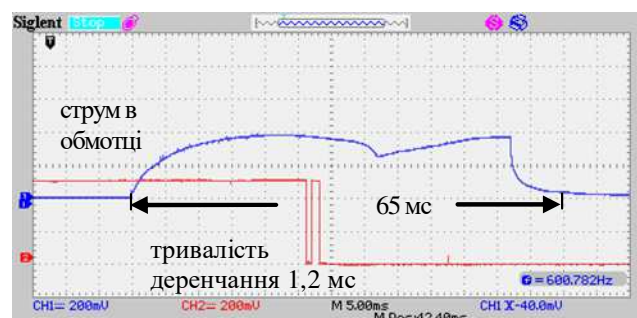
20 – гніздовий роз'єм пристрою для підключення зовнішніх кіл керування контактором;

21 – діод зеленого кольору, сигналізує про ввімкнений стан контактора;

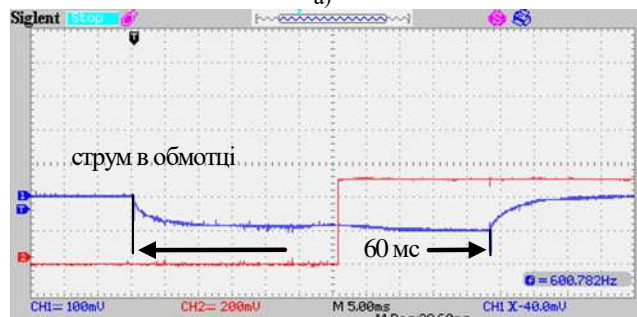
22 – діод червоного кольору, сигналізує про вимкнений стан контактора.

Гібридна система керування працює як від мережі зі змінною напругою (220-240 В, 50 Гц) так і від мережі з постійною напругою, але її значення для змінної напруги не повинно становити менше 140 В, а для постійної напруги – менше 198 В. Наявність в блоці живлення 2 стабілізатора напруги та випрямляча напруги 11 створює постійну напругу заряду конденсатора 320 В.

Осцилограми ввімкнення та вимкнення контактора представлені на рис. 5. З осцилограм видно, що час ввімкнення контактора становить 65 мс, а вимкнення 60 мс і ці значення знаходяться в межах відповідних часових інтервалів спрацьовування моделей вакуумних контакторів середніх напруг провідних виробників, таких як ABB (Германія), LVC (Корея), Hyundai (Корея), VMC (Індія) (наприклад, час ввімкнення та вимкнення вакуумного контактора VSC-7 фірми ABB становить 60-90 та 40-60 мс відповідно).



а)



б)

а – ввімкнення контактора; б – вимкнення контактора

Рис. 5. Осцилограми струму в котушці електромагніта та замикавання контактів вакуумного переривника

У дослідженнях, також фіксувалася кількість та тривалість відскоків головних контактів вакуумних переривників під час виконання операції ввімкнення контактора. На рис. 5, а показана осцилограма деренчання контактів одного з полюсів контактора під час виконання операції ввімкнення. З осцилограми видно, що тривалість деренчання контактів складає 1,2 мс (це найбільше значення тривалості деренчання, що було зафіксовано під час виконання операції ввімкнення контактора по трьом полюсам), проте характеристики відскоків не перевищують граничних значень, встановлених виробниками вакуумних переривників відносно тривалості та кількості відскоків (до двох відскоків впродовж 2 мс). Тобто, вимога виробників вакуумних переривників виконується.

Висновки. 1. Проведено аналіз систем керування вакуумних контакторів середніх напруг та виявлено їх недоліки. Встановлено, що перспективним напрямком удосконалення систем керування є розробка мікропроцесорних гібридних систем керування обмоткою електромагнітів на основі використання малогабаритних електромеханічних інтерфейсних реле.

2. Розроблено алгоритм роботи гібридної системи керування моностабільним поляризованим електромагнітом, особливість роботи якої полягає в тому, що функції ввімкнення і вимкнення струму виконує тільки напівпровідниковий комутаційний елемент (транзистор), а механічні комутаційні елементи (контактні групи реле) виконують функції маршрутизатора, перемикаючі електричні ланцюги під час безструмових пауз.

3. Розроблено мікропроцесорну гібридну систему керування моностабільним поляризованим електромагнітом з однією котушкою.

4. Проведено експериментальні дослідження роботи мікропроцесорної гібридної системи керування, результатами яких були значення часу ввімкнення контактора 65 мс та вимкнення 60 мс. Ці значення знаходяться в межах відповідних часових інтервалів спрацьовування моделей вакуумних контакторів середніх напруг провідних виробників.

5. Мікропроцесорна система керування моностабільним поляризованим електромагнітним приводом пройшла експериментальну перевірку на прототипах декількох контакторів, результати якої підтвердили можливість заміни напівпровідникового комутатора, що складається з чотирьох високовартісних силових транзисторів або транзистора та тиристорів, гібридним комутатором, який складається з одного силового транзистора та малогабаритного електромеханічного інтерфейсного реле.

Список літератури

1. Medium Voltage Products V-Contact Medium voltage vacuum contactors. Technical Catalogue 2009. www.abb.com.
2. 3TL Vacuum Contactors Selection and Ordering Data Medium-Voltage Equipment. Catalog HG 11.21 2014. www.siemens.com/3TL.
3. Medium Voltage Distribution. CPX – CLX – CBX – CVX. Vacuum contactors up to 12 kV. Fixed and withdrawable range of contactors. Catalogue 2014. www.schneider-

electric.com.

4. U-Series Вакуумный контактор среднего напряжения. www.hyundai-elec.com.
5. Tri-MEC LS Вакуумные контакторы среднего напряжения. Электрооборудование. Catalogue 2011. eng.lsis.biz.
6. Medium voltage products V-Contact VSC. Вакуумные контакторы среднего напряжения. Technical catalogue 2015. www.abb.com.
7. Клименко Б.В. Электромагнитный актуатор для вакуумного контактора средних 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.
8. Лелюк М.А. Структура та кінематичні схеми вакуумних контакторів середньої напруги / М.А. Лелюк // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 32.– С. 29-31.
9. Король О.Г. Дослідження перехідних процесів в пристрої форсованого керування моностабільним електромагнітом вакуумного контактора/ О.Г. Король, Б.В. Клименко, О.В. Ересько // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 32.– С. 34-40.
10. Клименко Б.В. Исследование возможности применения интерфейсных реле в системах гибридной коммутации обмоток бистабильных актуаторов / Б.В. Клименко, А.В. Ересько, И.С. Варшамова, Н.А. Лелюк // Електротехніка і Електромеханіка, (2016), – №1, – С. 21-25.
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. Heyun Lin, Xianbing Wang, Shuhua Fang: Design, optimization, and intelligent control of permanent-magnet contactor. IEEE Transactions on Industrial Electronics, (2013), vol. 60, No. 11, 5148-5159.
13. Xianbing Wang, Heyun Lin, S.L.No, Shuhua Fang, and Ping Jin: Analysis of dynamic characteristics of permanent magnet contactor with sensorless displacement profile control. IEEE Transactions on Magnetics, (2010), vol. 46, No. 6, 1633-1636.
14. Xianbing Wang, Heyun Lin, Shuhua Fang, Ping Jin, Junhua Wang, and S. L. No: Dynamic performance analysis of permanent magnet contactor with a flux-weakening control strategy. Journal Of Applied Physics, (2011), vol. 109, No. 7, 07E707- 07E707-3.
15. Патент України № 126923 МПК: H01F 7/06 H01H 33/42, Система керування електромагнітним приводом комутаційного апарата / Бугайчук В.М., Клименко Б.В., Лелюк М.А. Ересько О.В.; Форкун Я.Б. / № u201801171; заявл. 07.02.2018; опубл. 10.07.2018, Бюл.№ 13.– 4 с.: 1 іл.

References (transliterated)

1. Medium Voltage Products V-Contact Medium voltage vacuum contactors. Technical Catalogue 2009. www.abb.com.
2. 3TL Vacuum Contactors Selection and Ordering Data Medium-Voltage Equipment. Catalog HG 11.21 2014. www.siemens.com/3TL.
3. Medium Voltage Distribution. CPX – CLX – CBX – CVX. Vacuum contactors up to 12 kV. Fixed and with drawable range of contactors. Catalogue 2014. www.schneider-

4. U-Series Vakuumnyiy kontaktor srednego napryazheniya. www.hyundai-elec.com.
5. Tri-MEC LS Vakuumnyie kontaktoryi srednego napryazheniya. Elektrooborudovanie. Catalogue 2011. eng.lsis.biz..
6. Medium voltage products V-Contact VSC. Vakuumnyie kontaktoryi srednego napryazheniya. Technical catalogue 2015. www.abb.com..
7. Klivenko B.V., Leliuk M.A., Bugaychuk V.M., Forkun Ya.B. Elektromagnitnyy aktuator dlya vakuumnogo kontaktora srednih naprug. Visnik Natsionalnogo tehnicnogo universitetu "Harkivskiy politekhnichnyy Institut". Kharkiv: NTU «KhPI». 2018. No 32. Pp. 27-33.
8. Leliuk M.A. Struktura ta kinematychni skhemy vakuumnykh kontaktoriv serednoi napruhy. Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu "Kharkivskiy politekhnichnyy instytut". Kharkiv: NTU «KhPI». 2016. No 32. Pp. 29-31.
9. Korol O.H., Klivenko B.V., Eres'ko O.V. Doslidzhennya perekhidnykh protsesiv v prystroyi forsovanoho keruvannya monostabil'nym elektromahnitom vakuumnogo kontaktora. Visnyk Natsional'nogo tekhnichnogo universytetu "Kharkivs'kyu politekhnichnyy instytut". Kharkiv: NTU «KHPI». 2018. No 32. Pp. 34-40.
10. Klivenko B.V., Eresko A.V., Varshamova I.S., Lelyuk N.A. Issledovanie vozmozhnosti primeneniya interfeysnyih rele v sistemah gibridnoy kommutatsii obmotok bistabilnyih aktuatorov. Elektrotehnika i elektromekhanika, 2016, No 1. Pp. 21-25.
11. Klymenko B.V., Leliuk M.A. Prystriy keruvannya obmotkoy aktuatora vakuumnogo kontaktora. Informatsiyi tekhnolohiyi: nauka, tekhnika, tekhnolohiya, osvita, zdorov'ya: XXVI mizhn. nauk.-praktychna konf. (microCAD-2018), 16-18 travnya: tezy dop. Kharkiv: NTU «KhPI». 2018. P. 78.
12. Heyun Lin, Xianbing Wang, Shuhua Fang: Design, optimization, and intelligent control of permanent-magnet contactor. IEEE Transactions on Industrial Electronics, (2013), vol. 60, No. 11, 5148-5159.
13. Xianbing Wang, Heyun Lin, S.L.Ho, Shuhua Fang, and Ping Jin: Analysis of dynamic characteristics of permanent magnet contactor with sensorless displacement profile control. IEEE Transactions on Magnetics, (2010), vol. 46, No. 6, 1633-1636.
14. Xianbing Wang, Heyun Lin, Shuhua Fang, Ping Jin, Junhua Wang, and S. L. Ho: Dynamic performance analysis of permanent magnet contactor with a flux-weakening control strategy. Journal Of Applied Physics, (2011), vol. 109, No. 7, 07E707- 07E707-3.
15. Patent Ukrainy № 126923 MPK: H01F 7/06 H01H 33/42, Systema keruvannya elektromahnitnym pryvodom komutatsiinoho aparata. Buhaichuk V.M., Klymenko B.V., Leliuk M.A. Yeresko O.V.; Forkun Ya.B. u201801171; zaiavl. 07.02.2018; opubl. 10.07.2018, Biul.№ 13. 4 p.

Надійшла (received) 18.03.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах /About the Authors

Лелюк Микола Анатолійович (Лелюк Николай Анатольевич, Leliuk Mykola Anatoliyovych) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач навчальної лабораторії кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; e-mail: Lelyuk.nik@gmail.com

Клименко Борис Володимирович (Клименко Борис Владимирович, Klymenko Borys Volodymyrovych) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач, професор кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7860-4937>; e-mail: b.v.klymenko@gmail.com

ГОРКУНОВ Б. М., БОРИСЕНКО Е. А., ЛЬВОВ С. Г., ШИБАН ТАМЕР

ВЛИЯНИЕ МЕСТА РАСПОЛОЖЕНИЯ НАМАГНИЧИВАЮЩИХ ОБМОТОК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА ГАРМОНИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОЛЯ

В данной работе рассмотрен первичный электромагнитный преобразователь с неоднородным зондирующим полем структура которого представлена в виде пространственно-периодических гармоник. Для исключения влияния на результат измерения высших гармоник и выделения необходимых информативных гармоник предложено несколько различных систем намагничивающих полюсов преобразователя что позволило выделять необходимые сочетания четных или нечетных гармоник выходного сигнала преобразователя и повысило точность многопараметрового контроля электрических, магнитных и геометрических параметров исследуемых изделий. Выполнен расчет и показано влияние высших гармоник поля на выходные сигналы в измерительных обмотках преобразователя.

Ключевые слова: вихреговой измерительный преобразователь, пространственно-периодическая структура поля, неразрушающий контроль, цилиндрические металлические изделия.

ГОРКУНОВ Б. М., БОРИСЕНКО Е. А., ЛЬВОВ С. Г., ШИБАН ТАМЕР

ВПЛИВ МІСЦЯ РОЗТАШУВАННЯ НАМАГНІЧУВАЛЬНИХ ОБМОТОК ПЕРЕТВОРЮВАЧА НА ГАРМОНІЧНИЙ СКЛАД ПОЛЯ

У даній роботі розглянуто первинний електромагнітний перетворювач з неоднорідним зондуємим полем структура якого представлена у вигляді просторово-періодичних гармонік. Для виключення впливу на результат вимірювання вищих гармонік і виділення необхідних інформативних гармонік запропоновано кілька різних систем намагнічуючих полюсів перетворювача, що дозволило виділяти необхідні поєднання парних або непарних гармонік вихідного сигналу перетворювача і підвищило точність багатопараметрового контролю електричних, магнітних і геометричних параметрів досліджуваних виробів. Виконано розрахунок і показано вплив вищих гармонік поля на вихідні сигнали в вимірювальних обмотках перетворювача.

Ключові слова: вихрострумний вимірювальний перетворювач, просторово-періодична структура поля, неруйнівний контроль, циліндричні металеві вироби.

B. GORKUNOV, Y. BORYSENKO, S. LVOV, SHAIWAN TAMER

THE INFLUENCE OF THE TRANSDUCER'S MAGNETIZING WINDINGS LOCATION ON THE HARMONIC COMPOSITION OF THE FIELD

In this paper, we consider a primary electromagnetic transducer with an inhomogeneous probe field whose structure is represented as spatially periodic harmonics. The number different systems of magnetizing poles of the transducer was proposed in order to eliminate the higher harmonics effect on the measurement result and to highlight the required informative harmonics. This made it possible to select necessary combinations of even or odd harmonics of the transducer's output signal and to increase the accuracy of the multi-parameter control of the products under study. It was performed calculation and the effect of the field higher harmonics on the output signal in the transducer's measuring windings was shown. It was proposed to estimate the value of the error caused by other harmonics elimination when calculating as the ratio of the first harmonic amplitude to the algebraic sum of the EMF of this eliminated and accounted harmonics. It was established that for a transducer with one exciting winding, elimination the third harmonic results in an error calculation of the resulting EMF of 5%, and the calculation error for a transducer with two exciting windings associated with elimination of the fifth harmonic is 1.5%.

Key words: eddy current measuring transducer, spatial-periodic field structure, non-destructive testing, cylindrical metal products.

Введение. В работах [1-3] описаны методы многопараметрового контроля электромагнитных и геометрических параметров цилиндрических токопроводящих изделий. Получены выражения, которые описывают характеристики магнитного поля нитевидного проводника с током, имеющего бесконечно малые поперечные размеры и размещенного вдоль образующей цилиндрического изделия, как показано на рис. 1. Основными недостатками такого электромагнитного преобразователя (ЭМП) есть сильное влияние высших гармоник на результат измерения амплитуд и фаз выделенных информативных гармоник.

На практике преимущественно используются проводники с конечной шириной и радиальной высотой. Последнее удобно реализовать в одном из двух конструктивных вариантах: использование ленточного проводника с током либо наборного полюса, содержащего множество тонких проводников с токами, текущими вдоль образующей цилиндра в одном и том же направлении. В последнем случае токи отдельных проводников создают суммарный ток полюса.

Выражения для нахождения распределения напряженности магнитного поля внутри и снаружи изделия для любого номера пространственных гармо-

© Б. М. Горкунов, Е. А. Борисенко, С. Г. Львов, Шибан Тамер, 2019

ник, как показано в [4, 5] имеют вид:

$$H_r(r, \varphi, t) = e^{i\omega t} \sum_n \frac{\sin(n\gamma)}{n\gamma} f_n(r) \sin(n\varphi); \quad (1)$$

$$H_\varphi(r, \varphi, t) = e^{i\omega t} \sum_n \frac{\sin(n\gamma)}{n\gamma} g_n(r) \cos(n\varphi); \quad (2)$$

где $f_n(r)$, $g_n(r)$ – функции, определяющие реакцию электромагнитного поля на исследуемое изделие.

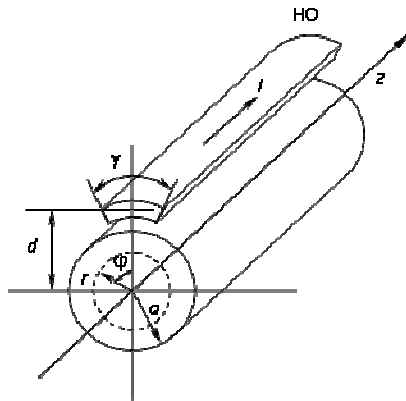


Рис. 1. Цилиндрический объект радиуса a в поле ЭМП с угловой шириной γ

Основная часть. Для исключения из картины пространственного распределения поля четных и нечетных гармоник можно использовать систему проводников с одинаковыми и чередующимися направлениями токов в них.

Причем, для сохранения определенной симметрии эти проводники удобно сдвигать друг относительно друга по азимуту на углы $\varphi=2\pi/m$, где m – число проводников.

На рис. 2 показаны, сечения намагничивающих систем, состоящих из двух (а), трех (б) и четырех (в) ленточных проводников или полюсов с возбуждающими токами I одного и того же направления и равными по величине.

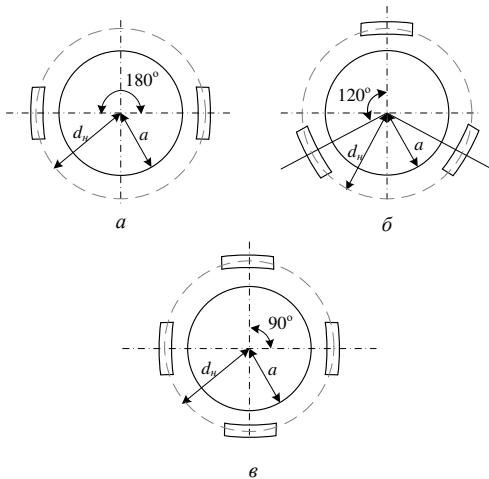


Рис. 2. Сечения намагничивающих систем с токами одного и того же направления и равными по величине

Электромагнитное поле m проводников с токами можно получить из выражений для поля одного проводника путем замены в (1) и (2) угловой координаты φ на $\varphi + (2\pi/m)k$, где $k = 1, 2, 3, \dots$ В таком случае по-

лученные формулы содержат двойные суммы.

Простое выражение для описания картины распределения полей в данном случае может быть найдено при использовании формулы суммирования, которая имеет вид:

$$\sum_{k=1}^{m-1} \sin \left[n \left(\varphi + \frac{2\pi}{m} k \right) \right] = m \sin(n\varphi), \quad (3)$$

где $n = pm, p = 0, 1, 2, \dots$

При $n \neq pm$ левая часть выражения (3) обращается в нуль. Аналогичный вид имеет формула суммирования для косинусов.

Используя формулу (3), приведем, к примеру, выражение для радиальной компоненты напряженности поля в системе с одинаковыми направлениями токов:

$$H_r(r, y, t) = e^{i\omega t} m \sum_{p=1}^{\infty} \frac{\sin(n\gamma)}{n\gamma} f_n(r, i, \omega) \sin(n\varphi). \quad (4)$$

Из (4) следует, что амплитуда поля m проводников с одинаковым направлением токов в m раз больше амплитуды поля одного проводника.

Отметим, что H_r компонента в данном случае содержит только гармоники, кратные числу проводников.

Например, если рассматривается система из двух проводников (см. рис. 2, а), то магнитное поле складывается из четных гармоник, а при $m = 3$ (см. рис. 2, б), поле содержит третью, шестую, девятую и т.д. гармоники.

На рис. 3 представлены сечения намагничивающих систем содержащих два (а), четыре (б) и шесть (в) проводников с равными по величине и чередующимися по направлению токами в них.

Знаки «+» и «-» указывают направления токов I вдоль и против направления оси z .

Поле m пар проводников с чередующимися направлениями токов в них (см. рис. 3) найдем, воспользовавшись формулой суммирования (3). При этом, после некоторых преобразований, получим выражение для радиальной компоненты поля:

$$H_r(r, \varphi, t) = 2m e^{i\omega t} \sum_{p=0}^{\infty} \frac{\sin(n\gamma)}{n\gamma} f_n(r, i, \omega) \sin(n\varphi), \quad (5)$$

где $n = (2p + 1)$, m – число пар проводников.

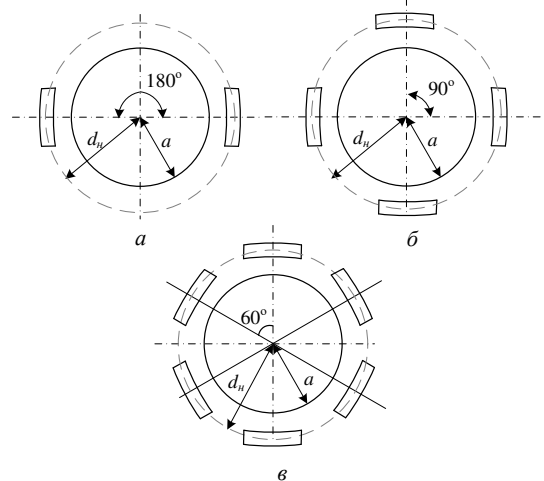


Рис. 3. Сечения намагничивающих систем с равными по величине и чередующимися направлениями токов в них

Как видно из (5), амплитуда поля m пар проводников с чередующимися направлениями токов больше в $2m$ раз амплитуды поля одного проводника. При этом H_z компонента магнитного поля в данном случае включает в себя гармоники, кратные числу пар проводников.

Например, при одной паре проводников (см. рис. 3, а), описываемое магнитное поле (5), содержит

только нечетные гармоники: первую, третью, пятую и т.д. При числе пар $m = 2$ (рис. 3, б) – только четные гармоники: вторую, шестую, десятую и т.д.

На рис. 4 а – и показаны способы получения специальных намагничивающих систем на основе сочетания двух возбуждающих обмоток с определенными размещениями проводников и направлениями токов в них.

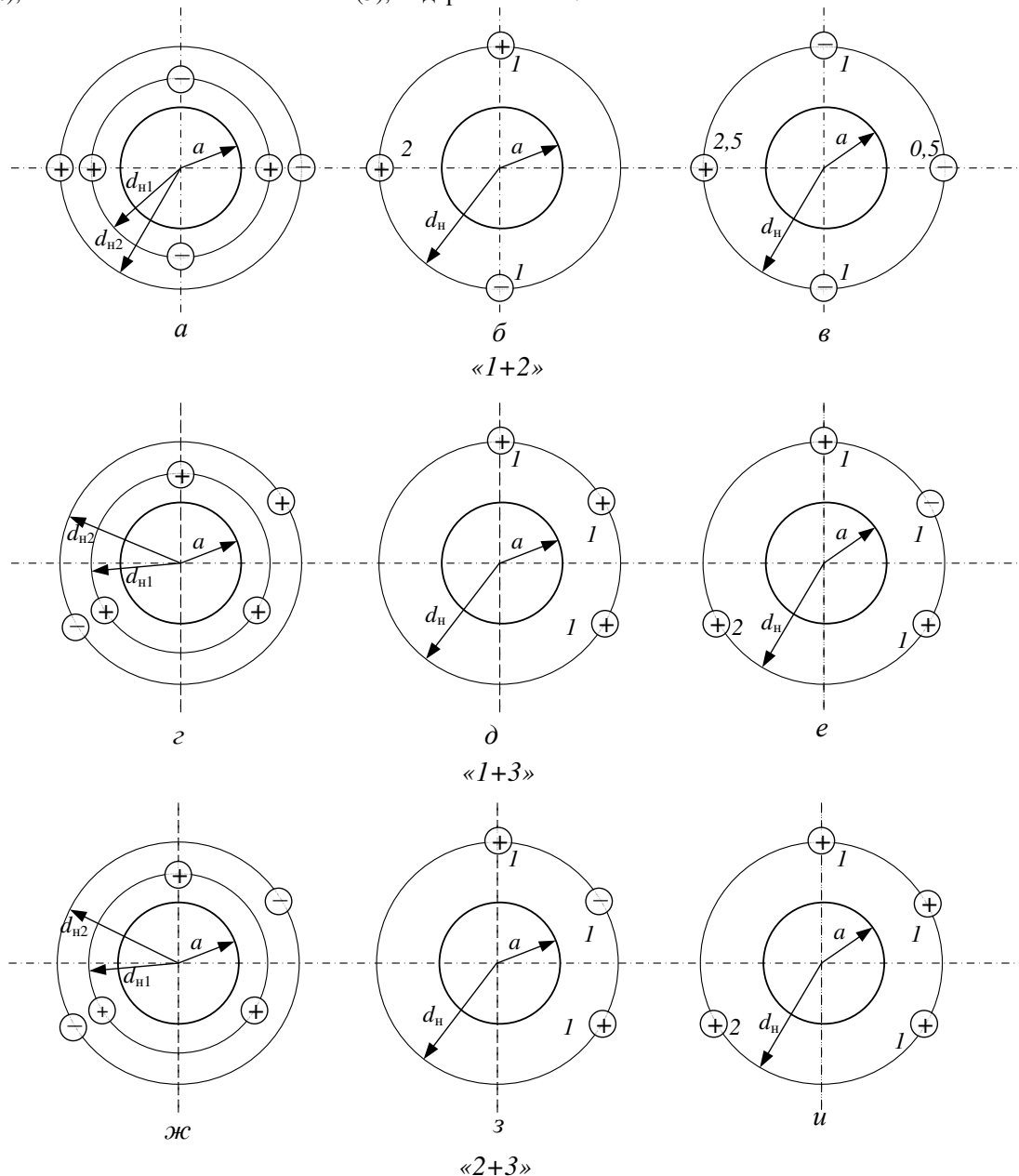


Рис. 4. Различные комбинации намагничивающих систем преобразователей с требуемой суммой преобладающих пространственных гармоник зондирующего поля.

Используя комбинации отдельных намагничивающих систем с чередующимися и однонаправленными токами в проводниках можно выделить сумму двух требуемых преобладающих пространственных гармоник.

На рис. 4 а, г, ж показаны пары возбуждающих обмоток расположенных на разных близких друг к другу радиусах a_{n1} и a_{n2} . Причем, к примеру, обмотка, имеющая радиус a_{n2} , создает поле (см. рис. 4 а) с пре-

обладающей 1-й пространственной гармоникой, а обмотка, размещенная на радиусе a_{n1} , возбуждает поле с преимущественной 2-й гармоникой.

Отсюда следует, что на рис. 4 а – в показанные комбинации двух обмоток образует намагничивающую систему, условно названную "1+2".

Из рис. 4 б, в видно, что такая система существенно упрощается по сравнению с исходной (см. рис.

4 а), поскольку она размещается на одном радиусе a_n и имеет меньше проводников.

Цифры, указанные на рис. 4 б, в, д, е, з, и характеризуют отношение тока в обмотке, расположенной на радиусе a_{n2} , к току в обмотке с радиусом a_{n1} .

Например, если использовать одинаковые по величине токи в обмотках, то в системе "1+2" можно обойтись всего тремя полюсами (см. рис. 4, б), правда, в одном из них число ампер-витков должно быть в 2 раза больше, чем в остальных.

Представленные на рис. 4 комбинации намагничивающих систем позволяют регулировать величины амплитуд соответствующих пространственных гармоник за счет изменения токов в обмотках и размещения полюсов указанным образом.

К примеру, в системе "1+2" при отношении токов в обмотках, не равном 1, возникает необходимость использования 4-х полюсов с различными ампер-витками в них (см. рис. 4 в, соответствующий отношению токов, равному 1,5).

На рис. 4 г, д, е и рис. 4 ж, з, и показаны комбинации намагничивающих систем на основе суперпозиции преобладающих 1-й и 3-й ("1+3"), 2-й и 3-й ("2+3") пространственных гармоник с возможностью регулирования их амплитуд. Как видно из этих рисунков, данные комбинации осуществляются аналогично комбинациям системы "1+2".

Случаи, показанные на рис. 4 д и рис. 4 з соответствуют отношениям токов в обмотках, равным 1 (при направлениях токов, в полюсах, указанных на рис. 4 г и рис. 4 ж). Намагничивающие системы "1+3" и "2+3", представленные на рис. 4 е и рис. 4 и получены при смене на обратные направления токов в полюсах, размещенных на радиусах a_{n2} (отношения токов в обмотках равно 1).

Данные намагничивающие системы при наличии регулирования величины токов такой полярности позволяют получить усиление амплитуд 1-й и 3-й (см. рис. 4 е) и 2-й и 3-й (см. рис. 4 и) пространственных гармоник магнитного поля.

При измерении параметров исследуемых изделий одним из главных вопросов является определение способов и средств выделения требуемых гармоник из результирующих сигналов преобразователя и ослабления влияния на результаты контроля гармоник с более высокими номерами, чем номера требуемых.

Отметим здесь основные пути подавления амплитуд мешающих пространственных гармоник:

– размещение секций измерительных обмоток на радиусах, меньших радиусов намагничивающих полюсов;

– рациональный выбор числа полюсов с однонаправленными токами в них ($m \geq 2$, см. рис. 2 а – в) и числа пар полюсов с противоположно направленными токами ($m \geq 1$, см. рис. 3 а – в);

– увеличение угловой ширины возбуждающих полюсов;

– размещение секций измерительных обмоток на определенных лучах $\varphi = \text{const}$ и соответствующее включение таких секций;

– выбор угловой ширины секций измерительной обмотки.

К примеру, для преобразователя, имеющего два полюса с токами противоположных направлений (см. рис. 3 а), при $\gamma = 36^\circ$ и $d/a = 0,5$ влияние 5-й мешающей пространственной гармоники на выделяемые 1-ю и 3-ю равно нулю, а 7-й на 1-ю и 3-ю составляет соответственно 0,36% и 2,7%. Воздействие 7-й гармоники на 3-ю можно уменьшить до 1%, если принять $d/a = 0,4$.

Для преобразователя с двумя полюсами, по которым протекают однонаправленные токи (см. рис. 2 в) при $\gamma = 30^\circ$ и $d/a = 0,5$ отсутствует влияние 6-й гармоники на выделяемые 2-ю и 4-ю, а воздействие 8-й на 2-ю и 4-ю составляет 0,4% и 3,1%. При выборе $d/a = 0,4$ последнюю цифру можно уменьшить до 1,3%.

Выводы. В настоящей статье предложено использовать систему проводников с одинаковыми и чередующимися направлениями токов в них для исключения из картины пространственного распределения поля четных или нечетных гармоник. Причем используя комбинации отдельных намагничивающих систем с чередующимися и однонаправленными токами в проводниках можно выделить сумму двух требуемых преобладающих пространственных гармоник. Показано, что для сохранения определенной симметрии эти проводники удобно сдвигать друг относительно друга по азимуту на углы $\varphi = 2\pi/m$, где m – число проводников.

Выполнен расчет и показано влияние высших гармоник поля на выходные сигналы в измерительных обмотках преобразователя. Значение погрешности, связанной с не учётом при вычислениях остальных гармоник оценивалась по отношению амплитуды первой отбрасываемой гармоники к алгебраической сумме ЭДС этой отбрасываемой и учитываемых гармоник. Так, например, для преобразователя с одним возбуждающим проводником, отбрасывание третьей гармоники приведет к погрешности расчета результирующей ЭДС, равной 5%, а погрешность расчета для преобразователя с двумя возбуждающими проводниками, связанная с отбрасыванием, к примеру, пятой гармоники при определении результирующей ЭДС, составляет 1,5%.

Список литературы

1. Сухоруков В.В. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 3. Электромагнитный контроль. -М.: Высшая школа, 1992.- 312 с.
2. Gorkunov, V.M., Lvov, S.G. Borisenko, Y.A. Uncertainty estimation while proceeding multi-parameter eddy current testing // Information Processing Systems, Vol. 4(155), pp. 92-97. <https://doi.org/10.30748/soi.2018.155.12>.
3. Горкунов Б. М., Львов С. Г., Борисенко Е. А., Шибан Тамер. Нормированные функции вихрековых измерительных преобразователей с пространственно-периодической структурой поля при многопараметровом контроле металлических изделий //Украинский метрологический журнал, Харьков. – № 3. – 2018. – С. 28–35.
4. Горкунов Б. М., Тюпа И. В. Вихрековый двухпараметровый контроль ферромагнитных цилиндрических изделий //Вестник НТУ "ХПИ", Харьков. – № 5. – 2004. – С. 93–99.
5. Б.М. Горкунов, А.А. Тищенко, И.Б. Горкунова. Многопараметровый электромагнитный контроль токопроводов в пространственнопериодических полях // Актуальные проблемы автоматизации и приладобудування. – Х: НТУ"ХПИ". – 2014. – С. 39-40.

References (transliterated)

1. Suhorukov V.V. Nerazrushayushiy kontrol. V 5 kn. Kn. 3. Elektromagnitnyy kontrol. -M.: Vysshaya shkola, 1992.- 312 s.
2. Gorkunov, B.M., Lvov, S.G. Borisenko, Y.A. Uncertainty estimation while proceeding multi-parameter eddy current testing. Information Processing Systems, Vol. 4(155), pp. 92-97. <https://doi.org/10.30748/soi.2018.155.12>.
3. Gorkunov B. M., Lvov S. G., Borisenko E. A., Shiban Tamer. Normirovannyye funktsii vihretokovykh izmeritelnykh preobrazovatelye s prostanstvenno-periodicheskoy strukturoy po-lya pri mnogoparametrovom kontrole metallicheskih izdeliy. Ukrainskiy metrologicheskii zhurnal, Harkov. – 3. – 2018. – P. 28–35.
4. Gorkunov B. M., Tyupa I. V. Vihretokovyiy dvuhparametrovyiy kontrol ferromagnitnykh tsilindricheskikh izdeliy. Vesnik NTU "HPI", Harkov. – 5. – 2004. – P. 93–99.
5. B. M. Gorkunov, A. A. Tischenko, I. B. Gorkunova. Mnogoparametrovyiy elektromagnitnyiy kontrol tokoprovodov v prostanstvennoperiodicheskikh polyah. Aktualni problemi avtomatiki i priladobuduvannya. – H: NTU"HPI". – 2014. – P. 39-40.

Поступила (received) 11.01.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Горкунов Борис Митрофанович (Горкунов Борис Митрофанович, Gorkunov Borys Mytrofanovych) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8175-858X>; e-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua

Борисенко Євген Анатолійович (Борисенко Евгений Анатольевич, Borysenko Yevhen Anatoliiovych) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7511-2590>; e-mail: 4borisea@gmail.com.

Львов Сергій Геннадійович (Львов Сергей Геннадьевич, Lvov Sergii Gennadiiovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3830-0570>; e-mail: sgl8ntu@gmail.com.

Шибан Тамер (Шибан Тамер, Shaiban Tamer) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем; м. Харків, Україна;

I. O. KOSTIUKOV

DETERIORATION OF XLPE INSULATION IN HIGH VOLTAGE CABLE SYSTEMS AND TESTING OF QUALITY BY APPLYING PULSES OF HIGH VOLTAGE

The wide spreading of energy distribution power cable lines made by means of applying cables with insulation made of cross-linked polyethylene usually is associated with a significant number of advantages in terms of better technical performance that such cables have in comparison with traditional cables with paper-impregnated insulation. Nevertheless, the necessity to ensure a sufficient level of production quality, as well as the requirements for increasing the operating time of power cable lines, make it urgent to develop insulation quality control methods, including control methods which imply applying of testing impulses that simulate overvoltages that occur in power systems due to lightning strikes. The other aspect of this problem is the necessity of the elaboration of physical models for the description of deterioration of XLPE insulation of power cables under the impact of various external factors. For recent years the problem of testing XLPE insulation by high voltage pulses, similarly to the problem of elaboration of physical models for the description of deterioration of XLPE insulation, have been considered by many authors. This paper gives a brief review of some main recent research that have been focused on the problem of endurance and aging of XLPE insulation due to overvoltage caused by various reasons. The main scope was focused on the problem of testing the endurance of XLPE insulation to the voltage pulses that imitate overvoltage due to lightning strikes. Some of the theories of aging of dielectric materials under the impact of impulse and alternating electrical fields and the influence of these factors on lifetime of dielectric materials have also been discussed.

Keywords: pulse overvoltage, deterioration of XLPE insulation, space charge, water tree channels.

I. O. КОСТЮКОВ

СТАРІННЯ ПОЛІЕТИЛЕНОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ У ВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛЬНИХ СИСТЕМАХ ТА КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ІМПУЛЬСІВ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

Проведено стислий огляд основних наукових досліджень, в яких розглядається проблема стійкості ізоляції із зшитого поліетилену до дії перенапруг, що викликані різними причинами, а також проблема старіння ізоляції вказаного типу під дією перенапруг різного характеру. Основна увага приділена проведенню випробувань стійкості поліетиленової ізоляції до сформованих імпульсів, що імітують перенапруги які виникають внаслідок ударів блискавки. Проведено огляд деяких теорій старіння діелектричних матеріалів під дією змінних та імпульсних електричних полів та вплив цих факторів на ресурс ізоляції.

Ключові слова: імпульсні перенапруги, старіння ізоляції із зшитого поліетилену, об'ємний заряд, водні трірінги.

I. A. KOSTIUKOV

СТАРЕНИЕ ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМПУЛЬСОВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Проведен краткий анализ основных научных исследований, в которых рассматривается проблема стойкости изоляции из сшитого полиэтилена к воздействию перенапряжений, возникающих под действием различных причин, а также проблема старения изоляции указанного типа под действием перенапряжений различного характера. Основное внимание уделяется проведению испытаний стойкости полиэтиленовой изоляции к сформированным импульсам перенапряжения, которые имитируют перенапряжения возникающие вследствие ударов молнии. Проведен анализ некоторых теорий старения диэлектрических материалов под действием переменных и импульсных полей и влияния этих факторов на ресурс изоляции.

Ключевые слова: импульсные перенапряжения, старение изоляции из сшитого полиэтилена, объемный заряд, водные тринги.

Introduction. The reliability of modern high voltage power cable systems with cross-linked polyethylene insulation and the endurance of such insulation to numerous disruptive external factors are of considerable interest from the point of view of reducing the expenses on renovation and the increasing the reliability of energy

distribution systems. The solution of this problem partially may be achieved by applying comprehensive system of control tests, that can allow to control the quality of manufacturing process. Recent trends in practice of diagnostics the technical state of power cable lines enhance the responsibility of manufacturer for the

© I. O. Kostiukov 2019

technical performance of their production.

According to the statistics obtained in practice of KEMA high-voltage laboratory for 6 years (1993-1998) and described in [1], the level of failures during testing procedures can reach 26% (including the amount of failures in cable accessories). Such result, obviously, can be considered as quite a substantial level, which can be a consequence of an insufficient level of manufacturing or miscounts on a stage of elaboration of constructions. Problems of this kind cause quite a significant interest to the elaboration of models for the deterioration of dielectric materials under the influence of certain factors and to the development of different techniques for their testing.

The purpose of this paper is to provide a succinct review of recent models that describe the deterioration of XLPE insulation and requirements to the process of testing of XLPE insulation of power cables by applying pulses of high voltage.

Basic mechanisms of deterioration of XLPE insulation. Classical theories of breakdown in solid dielectric materials distinguish several main types of breakdown [2]. Electrical type of breakdown usually takes place due to the disruption of structure of solid material which is caused by the avalanche of electrons that can occur during the collision ionization in dielectric. This type of breakdown can be characterized by the short duration of development and insignificant impact of temperature rise due to power losses in dielectric material. Mentioned aspects make it rather difficult to attain this type of breakdown under practical conditions of operation of power cable lines. Thermal type of breakdown usually takes place due to the heating of dielectric material caused by power losses. This type of breakdown has longer duration of development in time in comparison with previously mentioned electrical breakdown.

The majority of models for electrical or thermal aging of insulation imply exponential expressions for lifetime. Nevertheless, for the case of aging of dielectric material under the influence of electrical field the expression for lifetime for many practical cases quite often can be written in the following form [3]:

$$\tau = A \cdot E^{-m}, \quad (1)$$

where τ – lifetime of dielectric material;

E – electric field strength;

A and m – empirical coefficients.

Thermal aging of dielectric materials can be described by means of applying exponential expression (Arrhenius equation):

$$\tau = A \cdot e^{\frac{W}{kT}}, \quad (2)$$

where k – Boltzmann constant;

T – temperature;

W – activation energy of aging process.

Many of recently developed models for electrical aging of dielectric materials have been built on the bases of exponential expressions for lifetime of dielectric material, similarly to the case of thermal aging. Nevertheless, the applying of such models often implies dealing only with certain parameters that characterize conditions of carried out experiment, for example the

value of electric field strength of the beginning of partial discharges, or the value of frequency of applied electric field.

The most significant drawback of models of mentioned type is that they hardly can accurately predict the influence of such important factors as humidity, variation of temperature, and morphology of dielectric materials on their lifetime. In fact, in this case many models of electrical aging partially can be taken as models for approximation of experimental data which include certain parameters, quite often with the unknown origin. In other cases such models can include certain parameters that determine the conditions of held experiment.

Aging of dielectric materials under the influence of electric field is often attributed to the action of partial discharges and to the presence of some volume charge in dielectric materials due to the injection of electrons from the surface of electrodes. One of the first of suggested models of aging that involves parameters of dielectric material was described in [4]:

$$\tau = \frac{h}{2kT} e^{\frac{\Delta G - e\lambda E}{kT}}, \quad (3)$$

where h – Plank constant;

λ – scattering length;

e – the value of electrical charge of electrons;

ΔG – Gibbs free energy, which can be determined by using (4) [3]:

$$-\frac{\Delta G}{kT} = \ln E(c + \frac{d}{T}), \quad (4)$$

where c and d – adjustable constants.

Further development of aging model (3) has been made in [5]. This model is based on the considerations of the disruption of van der Waals forces between the molecules of polymeric material, which are considerably weaker in comparison with intramolecular bonds, as an important stage of the breakdown process. This disruption of intermolecular bonds occurs due to the injection of charges in submicrocavities formed in dielectric material with their further acceleration under the forces of applied field and gaining their kinetic energy up to values which can be sufficient for the disruption of intramolecular bonds. The elaborated in [5] model of aging was intended for the description of the prebreakdown processes in dielectric i. e. for the intermediate region between the area of comparably low electric fields, that correspond to sufficient endurance of dielectric material, and the region of high electric field and short lifetime of dielectric. According to this theory the time, which is necessary in order to attain the final state of aging, can be expressed as [5]:

$$t = \frac{h}{2kT} e^{\frac{\Delta G}{kT}} \csc h\left(\frac{e\lambda E}{kT}\right) \quad (5)$$

The process of destruction of intramolecular bonds can be accompanied with the process of rebound of separated chains. The difference between the rate of breaking chains and the rate of rebound chains in fact represents the rate of bonds disruption according to [5]:

$$t = \frac{h}{2kT} e^{-\frac{\Delta G}{kT}} \sinh\left(\frac{e\lambda E}{kT}\right). \quad (6)$$

However, the analysis of the endurance of cables with XLPE insulation to the applied voltage, especially after some aging during their service under practical conditions of operation, usually is carried out on the basis of consideration of electrochemical type of breakdown. In the context of applying to the issue of endurance of polyethylene insulation to applied voltage, including the endurance to overvoltage pulses with high frequency components, the consideration of such type of breakdown often includes models that intent to describe the development of electric and water tree channels in XLPE insulation, which eventually can lead to the breakdown.

Recent studies have established a drastic effect of service aging of XLPE insulation with tree-retardant additive on impulse electric strength, which can lead to approximately 50% decreasing of impulse electric strength after two years of service [6]. Such result has been explained by the development of water tree channels in insulation. Statistical model of water tree growth in XLPE insulation with tree-redundant additive, which has been described in [7], takes into consideration thermal effects that can lead to rather prompt disruption of cross-linked polyethylene. Proposed in [7] mechanism of deterioration is based on a comparison of time constants of polarization for a water filled channel with the duration of a rise time of applied pulse of voltage. The value of time constant of a water filled channel can be determined according to (7) [7].

$$\tau = \frac{10^{-19}}{r^2 \sigma}, \quad (7)$$

where r – radius of water channel;

σ – electrical conductivity of water.

According to the mentioned model for the mechanism of deterioration, the increasing of time constant (7) above the duration of a rise time of applied pulse leads to the increasing of heat diffusion due to the currents in the channel. Smaller values of time constant lead to the decreasing of heat due to conduction in water tree channels.

Sometimes the modeling of distortions of electrical field caused by water tree channels is carried out by applying numerical methods and modern software for calculation of three-dimensional electromagnetic fields. Such modeling, which has been carried out in [8], displayed the effects of destruction of polyethylene structure by compression forces acting at the ends of the water-filled channels.

The endurance of XLPE insulation to the development of water tree channels can be determined according to testing method described in [9]. The implementation of testing method implies formation of water needles, in a form of a recess which is filled with an electrolyte, in a sample of tested material. During the testing procedure this water needle acts as a high-voltage electrode. The criterion for failure of tested sample usually is accepted as the breakdown of tested sample, the formation of electrical tree channels or the increasing of the length of water tree channel to any value above the $300 \cdot 10^{-6}$ m.

Testing of quality of high voltage cable systems by applying pulses of high voltage. Practical conditions of operation of power cable with XLPE insulation demand to take into consideration the influence of overvoltage on the reliability of power cable lines, as their insulation can be subjected to overvoltage of different origin. Typical examples of such overvoltage can be induced overvoltages which occur due to lightning strikes that can penetrate in cable line in combined power transmission lines that consist of overhead lines and underground power cable lines [10]. Another reason for overvoltage can be caused by arc discharges which can occur in three-phase power transmission lines which operate with insulated neutral in case of phase to earth fault [11].

In practice it is possible to distinguish several different techniques for carrying out such high voltage tests, which intend to determine the endurance of XLPE insulation to high voltage pulses. According to described in [12] requirements, testing procedure can contain tests with the level of voltage that corresponds to the general requirements to dielectric strength of XLPE insulation and with the level of voltage that exceeds these requirements.

General requirements to the procedures of testing of power cables 6-36 kV by means of applying pulses of high voltage described in [12].

Table 1 gives general requirements to the values of endurable testing voltage for such cables according to [12].

Table 1 – General technical requirements to the value of endurable amplitude of pulse voltage for cables with plastic insulation according to [12]

Voltage of power cable, kV	Amplitude of pulse voltage, kV
6	60
10	75
15	95
20	125
30	170
35	190

Table 2 – General technical requirements to the value of endurable amplitude of pulse voltage for cables according to [13]

Voltage of power cable, kV	Amplitude of pulse voltage, kV
11	75
33	170
66	325
132	550

Generated pulses of high voltage should fit pretty strict requirements to their time dependences. Usually generated pulse of voltage that imitates overvoltage due to the lightning strike should have the duration of rise time equal to 1.2 μ s. The duration of fall time of generated pulses is supposed to be equal to 50 μ s. For power cables within the rate of voltage 6-36 kV the admissible deviation of amplitude of generated pulse should be within the borders of $\pm 3\%$. Admissible deviation of the

duration for the fall time of generated pulse should be within the borders of $\pm 20\%$. For the case of long samples and, therefore, significant electrical capacitance of tested sample, the increasing of rise time to $5 \mu\text{s}$ is permitted. In case of distortions of the form of generated high voltage pulse near its amplitude caused by high frequency oscillations their amplitude should not exceed the value of the amplitude of main pulse more than on 5%. According to the general requirements described in [12] the insulation of tested cable should be able to endure 10 pulses of voltage with positive polarity and 10 pulses of voltage with the opposite polarity.

Besides the electrical tests which can be carried out by applying pulses of high voltage with their amplitude that corresponds to the necessary values (for example the values of amplitude given in table 1), it is possible to carry out tests by applying pulses with amplitude that exceeds necessary values. In this case testing process consists of several series of applying high voltage pulses to the tested sample with further gradual increasing of voltage with some necessary step. For example, according to [14] the first stage of high voltage tests contains applying of 3 pulses of positive and negative polarity with amplitude that corresponds to the basic requirements to the endurance of pulse voltage. Further stages imply increasing of voltage in steps of 25% above the basic level with further applying of 3 negative pulses on each step. According to the other requirements, which have also been described in [14], tests on the basic level of applied voltage, similarly to [12], contain 10 pulses of high voltage of positive and negative polarity. Further stages of the test are carried out with increased on 5% amplitude above the level of the previous step. Each stage should contain 10 voltage pulses of each polarity. Such tests can detect impurities and protrusions in insulation due to their deterioration under the impact of such pulses [15]. Another important aspect of such type of tests is that they can be used for the purposes of studying the accumulation of space charge in insulation layers. Aging of high density polyethylene insulation by applying series of 3000 pulses that imitate overvoltage due to lightning strikes, which was carried out in [16], has shown rather significant injection of space charge after the process of aging.

In practice in the majority of cases generation of voltage pulses is carried out by applying scheme of Marx generator, despite such disadvantages as necessity of applying significant amount of spark gaps and considerable geometrical size. For this case forming of necessary voltage pulse is carried out by applying front resistance and tail resistance. Mathematical modeling of transients in testing systems based on applying of equivalent circuit of high voltage generator and detailed scheme of generator, that takes into consideration electrical parameters of each stage, in case of operation of Marx generator on a capacitive load has shown quite a significant difference between the values of tail resistance which have been obtained by means of applying the equivalent circuit model of high voltage generator and detailed model, which contains parameters of stages. This modeling was carried out under the assumption of

capacitive load of generator that corresponds to the case of tested power cable. In some cases the presence of semi conductive screens that cover the core and insulation of power cable and some stray inductance can demand to take into consideration the influence of mentioned parameters on transients and not to consider tested power cable as a purely capacitive object. More detailed equivalent scheme of tested power cable includes stray inductance of power cable and parameters that describe properties of semi conductive screens [17].

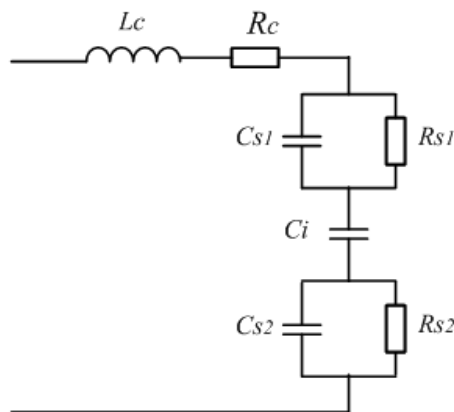


Fig.1. Detailed equivalent scheme of short sample of power cable

On the equivalent scheme presented on Fig.1 C_{S1} and C_{S2} designate the values of electrical capacitance of semi conductive layers that cover the surface of the core of power cable and its insulation. R_{S1} and R_{S2} designate the values of electrical resistance of semi conductive layers. C_i is the value of electrical capacitance of the main insulation. L_s and R_s designate the values of series inductance and resistance.

Conclusions. Pulse overvoltage in high voltage cable systems usually is considered in the context of aging of XLPE insulation due to the injection of space charge and disruption of van der Waals forces between the molecules of polymeric material. High voltage tests with applying generated pulses of high voltage are among other typical techniques to ensure sufficient level of manufacturing. This urges manufacturers of cable production to carry out such kinds of tests. However, pretty strict requirements to generated pulses of high voltage in some cases demand to take into consideration the presence of stray parameters of power cable.

References

1. *Berlijn S. M.* Type testing of cables and accessoires / *S. M. Berlijn, R. J. B. Gruntjes, G. P. T. Roelofs* // Proceedings of the 5th International Conference on Power Cables. Paris-Versailles 1999.
2. *Tareev B. M.* Electrical engineering materials / *B. M. Tareev, N. P. Bogorodickij, V. V. Pasyukov.* – Moscow.: Mir, 1979. – 360 p.
3. *Parpal Jean-Luc.* Electrical aging of extruded dielectric cables. Review of existing theories and data / *Luc Parpal, Jean-Pierre Crine, Chinh Dang* // IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation. – 1996. – Vol. 3. – № 2. – p. 237 – 247.

4. *Crine J. P.* A molecular approach to the physico-chemical factors in the electrical breakdown of polymers / *J. P. Crine, A. K. Vijh* // Applied Physical Communications. – 1985. – Vol. 3. – p. 139 – 163.
5. *Parpal Jean-Luc.* Electrical aging of extruded dielectric cables. A physical model / *Jean-Luc Parpal, Jean-Pierre Crine, Chinh Dang* // IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation. – 1997. – Vol. 4. – № 2. – p. 197 – 209.
6. *Katz C.* Field monitoring of parameters and testing of EP and TR-XLPE distribution cables / *C. Katz, B. Fryszczyn, M. Regan, W. Banker, B. Bernstein* // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1999. – Vol. 14. – p. 679 – 684.
7. *Boggs S. A.* Mechanisms for degradation of TR-XLPE impulse strength during service aging / *S. A. Boggs* // IEEE Transactions on power delivery. – 2002. – Vol. 17. – № 2. – p. 308 – 312.
8. *Kucheriava I. M.* Coupled electrical and mechanical processes in polyethylene insulation with water tree having brunches of complex structure / *I. M. Kucheriava* // Technical Electrodynamics. – 2016. – № 5. – p. 5 – 10.
9. *Пешков И. Б.* Специальные методы исследований и испытаний электрической изоляции силовых кабелей среднего и высокого напряжения / *И. Б. Пешков, В. Л. Овсиенко, М. Ю. Шувалов* // Кабели и провода. – 2015. – № 1. – с. 9 – 14.
10. *Borghetti A.* Insulation coordination of MV cables against lightning-induced overvoltages generated by LEMP-coupled overhead lines / *A. Borghetti, M. Marzinotto, C. Mazzetti, C. A. Nucci, M. Paolone* // Proceedings of the 28th International Conference on Lightning Protection. Kanazava 2006. p. 783 – 788.
11. *Екимукон С. С.* Особенности эксплуатации кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (защита от перенапряжений, диагностика и испытания) / *С. С. Екимукон, И. Ю. Цивилев* // Кабели и провода. – 2011. – № 2. – с. 22 – 27.
12. ГОСТ Р 55025-2012. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение 6 – 35 кВ включительно. Общие технические условия. Москва, Стандартинформ, 2014. 35 с.
13. *Kumar A.* Simulation of impulse voltage generator in different impulse voltages for testing of underground power cables in MATLAB/SIMULINK / *A. Kumar, R. Singh* // Global journal of engineering science and researches. – 2016. – Vol. 3. – № 10. – p. 31 – 35.
14. *Barmji S. S.* Electroluminescence technique to evaluate the effect of impulse tests on high voltage cables / *S. S. Barmji, M. Kaufhold, A. T. Bulinsli* // IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation. – 1998. – Vol. 5. – № 2. – p. 204 – 210.
15. *Woschitz R.* Quality control of XLPE cables by means of impulse voltage test / *R. Woschitz, W. Panosch, G. Knollseisen, C. Sumereder* // Proceedings of the Conference on Electrical Insulating Materials. Vol. 2. Kitakyushu, 2005.
16. *Dao N. L.* Lightning impulse aging of HV cable insulation / *N. L. Dao, P. L. Lewin, S. G. Swinger* // Proceedings of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering. Johannesburg, 2009. Paper C-6.
17. *Bhuyan K.* Simulation of lightning impulse voltage stress in underground cables / *K. Bhuyan, M. Taro, S. Chatterjee* // Proceedings of the International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems. Bangalore 2009. p. 34 – 39.

References (transliterated)

1. *Berlijn S. M.* Type testing of cables and accessoires / *S. M. Berlijn, R. J. B. Gruntjes, G. P. T. Roelofs* // Proceedings of the 5th International Conference on Power Cables. Paris-Versailles 1999.
2. *Tareev B. M.* Electrical engineering materials / *B. M. Tareev, N. P. Bogorodickij, V. V. Pasyukov.* – Moscow.: Mir, 1979. – 360 p.
3. *Parpal Jean-Luc.* Electrical aging of extruded dielectric cables. Review of existing theories and data / *Jean-Luc Parpal, Jean-Pierre Crine, Chinh Dang* // IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation. – 1996. – Vol. 3. – № 2. – p. 237 – 247.
4. *Crine J. P.* A molecular approach to the physico-chemical factors in the electrical breakdown of polymers / *J. P. Crine, A. K. Vijh* // Applied Physical Communications. – 1985. – Vol. 3. – p. 139 – 163.
5. *Parpal Jean-Luc.* Electrical aging of extruded dielectric cables. A physical model / *Jean-Luc Parpal, Jean-Pierre Crine, Chinh Dang* // IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation. – 1997. – Vol. 4. – № 2. – p. 197 – 209.
6. *Katz C.* Field monitoring of parameters and testing of EP and TR-XLPE distribution cables / *C. Katz, B. Fryszczyn, M. Regan, W. Banker, B. Bernstein* // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1999. – Vol. 14. – p. 679 – 684.
7. *Boggs S. A.* Mechanisms for degradation of TR-XLPE impulse strength during service aging / *S. A. Boggs* // IEEE Transactions on power delivery. – 2002. – Vol. 17. – № 2. – p. 308 – 312.
8. *Kucheriava I. M.* Coupled electrical and mechanical processes in polyethylene insulation with water tree having brunches of complex structure / *I. M. Kucheriava* // Technical Electrodynamics. – 2016. – № 5. – p. 5 – 10.
9. *Peshkov I. B., Ovsienko V. L., Shuvalov M. Ju.* / Special'nye metody issledovanij i ispytanij jelektricheskoy izoljacji silovyh kabelej srednego i vysokogo naprjazhenija [Special methods of research and testing of electrical insulation of power cables of medium and high voltage]. Kabeli i provoda. 2015, no. 1, pp. 9 – 14.
10. *Borghetti A.* Insulation coordination of MV cables against lightning-induced overvoltages generated by LEMP-coupled overhead lines / *A. Borghetti, M. Marzinotto, C. Mazzetti, C. A. Nucci, M. Paolone* // Proceedings of the 28th International Conference on Lightning Protection. Kanazava 2006. p. 783 – 788.
11. *Екимукон С. С., Цивилев И. Ю.* Особенности эксплуатации кабелей с изоляцией из сшитого

- polijetilena (zashhita ot perenaprjazhenij, diagnostika i ispytaniya) [Features of operation of cables with insulation made of cross-linked polyethylene (overvoltage protection, diagnostics and testing)]. Kabeli i provoda. 2011, no. 2, pp. 22 – 27.
12. GOST P 55025-2012 Kabeli silovye s plastmassovoj izoljaciej na nominal'noe naprjazhenie 6 – 35 kV vkljuchitel'no. Obshhie tehicheskie uslovija. [GOST P 55025-2012 Power cables with plastic insulation for rated voltage 6 - 35 kV. General technical circls]. Moscow, Standartinform, 2014. 35 p.
 13. Kumar A. Simulation of impulse voltage generator in different impulse voltages for testing of underground power cables in MATLAB/SIMULINK / A. Kumar, R. Singh // Global journal of engineering science and researches. – 2016. – Vol. 3. – № 10. – p. 31 – 35.
 14. Barmji S. S. Electroluminescence technique to evaluate the effect of impulse tests on high voltage cables / S. S. Barmji, M. Kaufhold, A. T. Bulinsli // IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation. – 1998. – Vol. 5. – № 2. – p. 204 – 210.
 15. Woschitz R. Quality control of XLPE cables by means of impulse voltage test / R. Woschitz, W. Panosch, G. Knollseisen, C. Sumeder // Proceedings of the Conference on Electrical Insulating Materials. Vol. 2. Kitakyushu, 2005.
 16. Dao N. L. Lightning impulse aging of HV cable insulation / N. L. Dao, P. L. Lewin, S. G. Swingler // Proceedings of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering. Johannesburg, 2009. Paper C-6.
 17. Bhuyan K. Simulation of lightning impulse voltage stress in underground cables / K. Bhuyan, M. Taro, S. Chatterjee // Proceedings of the International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems. Bangalore 2009. p. 34 – 39.

Received 01.04.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Костюков Іван Олександрович (Костюков Иван Александрович, Kostiukov Ivan Aleksandrovich) – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри електроізоляційної та кабельної техніки НТУ «ХПІ», м. Харків. e-mail: iakostiukow@gmail.com 70-76-544

Н.П. ПЕТРЕНКО

О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА В ОДНОВИТКОВОМ МАССИВНОМ СОЛЕНОИДЕ СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ

Криволинейный контур профиля массивного одновиткового соленоида для создания заданного распределения импульсного магнитного поля на цилиндрической поверхности при магнитно-импульсной обработке металлов можно существенно упростить, аппроксимируя многоугольником. Распределение тока вблизи острых кромок таких соленоидов, соответствующих вершинам многоугольника, представляет теоретический и практический интерес. Однако в реальных условиях идеально острые кромки не достижимы и в высоковольтной и сильноточной технике их обычно скругляют, чтобы избежать локального перегрева. Такое скругление может вызывать перераспределение тока. Получены распределения импульсного тока в системе массивный одновитковый соленоид – соосный проводящий цилиндр при помощи численного решения интегрального уравнения для поверхностной плотности тока в приближении идеального поверхностного эффекта. При этом интегральное уравнение аппроксимировали системой линейных алгебраических уравнений на сетке, нанесенной на контур профиля соленоида и образующую цилиндра. Установлено, что аппроксимация точного контура многоугольником ведет к существенному перераспределению тока в соленоиде. Имеет место значительное возрастание поверхностной плотности тока вблизи кромок соответствующих вершинам многоугольника, величина внутреннего угла которых меньше π , и уменьшение поверхностной плотности тока, если величина такого угла больше π . Сделана оценка влияния скругления острых кромок дугами относительно малого радиуса на получаемые распределения поверхностной плотности тока. Показано, что увеличение радиуса скругления приводит к уменьшению максимальной плотности тока вблизи скругляемой кромки, если внутренний угол при соответствующей вершине меньше π . При этом, относительная величина этого уменьшения зависит преимущественно от величины угла и практически не зависит от расположения. Максимальное уменьшение наблюдается вблизи вершин, угол при которых равен $\pi/2$: плотность тока уменьшается в 2.5÷4 раза в зависимости от радиуса скругления. Для вершин, угол при которых больше π , характерно увеличение минимальной плотности тока вследствие усиления кольцевого эффекта и эффекта близости.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка металлов, массивный одновитковый соленоид, контур профиля, распределение импульсного тока, поверхностный эффект, кольцевой эффект, эффект близости, скругление кромок.

М.П. ПЕТРЕНКО

ПРО РОЗПОДІЛ ІМПУЛЬСНОГО СТРУМУ В ОДНОВИТКОВОМУ МАСИВНОМУ СОЛЕНОІДІ СКЛАДНОГО ПРОФІЛЮ

Криволінійний контур профілю масивного одновиткового соленоїда для створення заданого розподілу імпульсного магнітного поля на циліндричній поверхні при магнітно-імпульсній обробці металів можна суттєво спростити, апроксимуючи багатокутником. Розподіл струму поблизу гострих кромок таких соленоїдів, відповідних вершинам багатокутника, становить теоретичний і практичний інтерес. Однак в реальних умовах ідеально гострі кромки недосяжні і в високовольтній та потужнострумівій техніці їх зазвичай округлюють, щоб уникнути локального перегріву. Таке округлення може викликати перерозподіл струму. Отримано розподіли імпульсного струму в системі масивний одновитковий соленоїд – співвісний провідний циліндр за допомогою чисельного рішення інтегрального рівняння для поверхневої густини струму в наближенні ідеального поверхневого ефекту. При цьому інтегральне рівняння апроксимували системою лінійних алгебраїчних рівнянь на сітці, нанесеній на контур профілю соленоїда та утворюючу циліндра. Встановлено, що апроксимація точного контуру багатокутним веде до суттєвого перерозподілу струму в соленоїді. Має місце значне зростання поверхневої густини струму поблизу кромок, величина відповідного внутрішнього кута при яких менше π , та зменшення поверхневої густини струму, якщо величина такого кута більше π . Зроблена оцінка впливу округлення гострих кромок дугами відносно малого радіусу на отримуваний розподіл поверхневої густини струму. Показано, що збільшення радіусу округлення призводить до зменшення максимальної густини струму, якщо внутрішній кут при відповідній вершині менше π . При цьому, відносна величина такого зменшення залежить переважно від величини кута і практично не залежить від розташування. Максимальне зменшення спостерігається поблизу вершин, кут при яких дорівнює $\pi/2$: густина струму зменшується в 2.5÷4 рази залежно від радіусу округлення. Для вершин, кут при яких більше π , характерно збільшення мінімальної густини струму внаслідок посилення кільцевого ефекту та ефекту близькості.

Ключові слова: магнітно-імпульсна обробка металів, масивний одновитковий соленоїд, контур профілю, розподіл імпульсного струму, поверхневий ефект, кільцевий ефект, ефект близькості, округлення кромок.

M.P. PETRENKO

ABOUT THE PULSED CURRENT DISTRIBUTION IN THE MASSIVE SINGLE-TURN SOLENOID

A curvilinear contour of a massive single-turn solenoid for generating a given distribution of pulse magnetic field on the cylindrical workpiece during magnetic pulse forming process can be significantly simplified using approximation by a polygon. The current distribution near the sharp edges of such solenoids is of theoretical and practical interest. However, in real conditions the ideally sharp edges are not achievable. Besides, in high-voltage and high-current equipment they are usually rounded to avoid local overheating. Therefore, the current redistribution may be caused by such rounding. The distributions of pulsed current in system of massive single-turn solenoid and coaxially placed conductive cylinder is received with help of numerical solution of integral equation for surface current density using ideal skin effect approximation. In this the integral equation is approximated by a system of linear algebraic equations on the grid applied on the solenoid profile contour and the cylinder generatrix. It is established that approximation of the exact contour by a polygon leads to the significant redistribution of the current in the solenoid. If the interior angle of corresponding vertex is less than π , the surface current density will be highly increased on the approach of the sharp edge. If the interior angle is more than π , the surface current density will be highly decreased on the approach of the sharp edge. Redistribution of the current due to rounding of the polygonal profile contour using arcs with different radius is considered. It is shown that increase in the arc radius leads to decrease in the maximum of surface current density near the edges if their interior angle is less than π . In this, the relative magnitude of such decrease depends mainly on the angle and is almost independent of the location. The maximum decrease corresponds to the vertices which angle is $\pi/2$, the current density decreased by 2.5÷4 times, depending on the radius of the rounding. If the interior angle is more than π the rounding leads to increase in the minimum current density due to strengthening of ring effect and proximity effect.

Keywords: magnetic pulse forming, massive single-turn solenoid, profile contour, pulse current distribution, skin effect, ring effect, proximity effect, edge rounding.

© Н.П. Петренко, 2019

Введение. Контур профиля массивного соленоида для обеспечения заданного распределения индукции магнитного поля на цилиндрической поверхности обрабатываемой заготовки, полученный при помощи методов [1,2], может иметь достаточно сложную форму (рис. 1, кривая 1). Для упрощения изготовления соленоида её можно аппроксимировать n -сторонним многоугольником (рис. 2), что не приводит к значительным изменениям распределения осевой составляющей индукции магнитного поля на поверхности цилиндрической заготовки [3]. Кромки таких соленоидов, соответствующие вершинам многоугольника, полагались «острыми». Однако на практике их скругляют и возникает вопрос, как это влияет на получаемое распределение индукции. Можно ожидать, что на кромках соленоида в сильном импульсном магнитном поле, необходимом для деформации заготовки, плотность тока резко возрастает, следствием чего является локальный перегрев. Для ослабления этого эффекта представляет интерес, во-первых, определение плотности тока на острых кромках, во-вторых, влияние их скруглений. В работе [4] было показано, что задача о распределении импульсного тока на поверхности тел вращения произвольной формы может быть сведена к решению интегрального уравнения, а в [5,6] авторами рассматривалось распределение импульсного тока на скругленных кромках соленоида прямоугольной формы.

Цель работы – исследование распределения тока в одновитковом массивном соленоиде, точный профиль которого аппроксимирован многоугольником, влияние на него, а также на получаемое распределение индукции магнитного поля скруглений острых кромок при резком поверхностном эффекте.

Распределение тока вдоль контура меридианного сечения соленоида. Для расчета распределений тока в системе соленоид-цилиндр и распределения индукции магнитного поля на поверхности цилиндра в приближении идеального поверхностного эффекта используем численное решение интегрального уравнения [7]

$$\int_l \eta(M) \sqrt{r_M} K(P, M) dl_M = \begin{cases} \frac{\Phi_0}{\mu_0 \sqrt{r_P}}, & P \in l_1 \\ 0, & P \in l_2 \end{cases} \quad (1)$$

где η – поверхностная плотность тока,
 P, M – точка наблюдения поля и точка с текущими координатами; $P, M \in l, l = l_1 + l_2$;
 l – суммарный контур;
 l_1 – контур профиля соленоида;
 l_2 – образующая поверхности цилиндра;
 dl_M – элемент суммарного контура;
 r_P, r_M – радиальные координаты точек P и M соответственно;
 $K(P, M) = (2/k-k)K(k) - (2/k)E(k)$ [8, с.304];
 $K(k), E(k)$ – полные эллиптические интегралы первого и второго рода модуля k [9];
 μ_0 – магнитная постоянная;

Φ_0 – магнитный поток на контуре соленоида, постоянная.

Для каждого варианта соленоида рассчитывается своё значение Φ_0 для обеспечения условия неизменности тока.

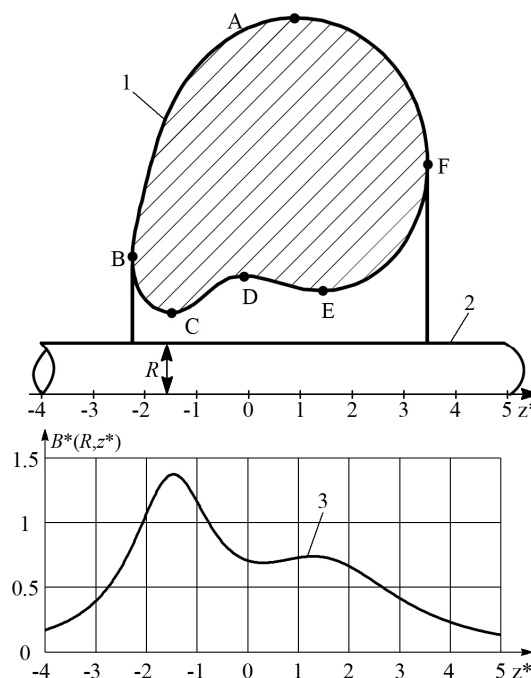


Рис. 1 – Точный профиль массивного соленоида (1) расположенного снаружи соосного бесконечно длинного проводящего цилиндра (2) и создаваемое им распределение индукции магнитного поля (3)

После решения уравнения (1) индукцию магнитного поля определяем по формуле

$$B(M) = -\mu_0 \eta(M), \quad (2)$$

которая является следствием граничного условия на поверхности раздела идеального сверхпроводника и непроводящей немагнитной среды [10]. Знак минус в правой части (2) обусловлен тем, что при $\Phi_0 > 0$ для $M \in l_2$ значения $\eta(M) < 0$, а $B(M) > 0$.

Интегральное уравнение (1) аппроксимировали системой алгебраических уравнений на равномерной сетке с шагом $h = 0.002$, нанесенной на контур профиля соленоида и образующую цилиндра, расчетную длину которого ограничивали величиной $l = 16R$.

На рис. 3 показаны развертки распределений поверхностной плотности тока в соленоиде точного (а) и аппроксимированного (б - $n = 10$, $z - n = 7$) профилей. Использовано обозначение $\eta^* = \eta/\eta_0$, где $\eta_0 = I/(2\pi R)$.

Для точного профиля характерны гладкость и расположение максимумов η^* над максимумами заданного распределения индукции магнитного поля (точки C и E на кривой 1 рис. 1 и на рис. 3. а), что вполне объяснимо гладкостью контура профиля и проявлением кольцевого эффекта и эффекта близости [8, 10-12].

Возрастание η^* на кромках торцов соленоидов обычно называют краевым эффектом. В системе соленоид-цилиндр на краевой эффект влияют как кольцевой эффект, так и эффект близости, которые существенно изменяют η^* вблизи вершин многоугольного контура и вызывают перераспределение тока вдоль контура соленоида. Вблизи кромок, соответствующий внутренний угол при которых меньше π , наблюдается существенное возрастание поверхностной плотности тока. При $n=10$ наибольшее действие рассматриваемых эффектов и максимальные значения η^* наблюдаем у вершин C, D (рис. 2, *a* и рис. 3, *б*), находящихся на минимальном расстоянии от поверхности цилиндра. С увеличением указанного расстояния уменьшаются максимумы η^* (вершины H, B, G, I), а вблизи наиболее удаленных вершин A и J возрастание η^* невелико по сравнению с вершинами B и I вследствие ослабления указанных эффектов.

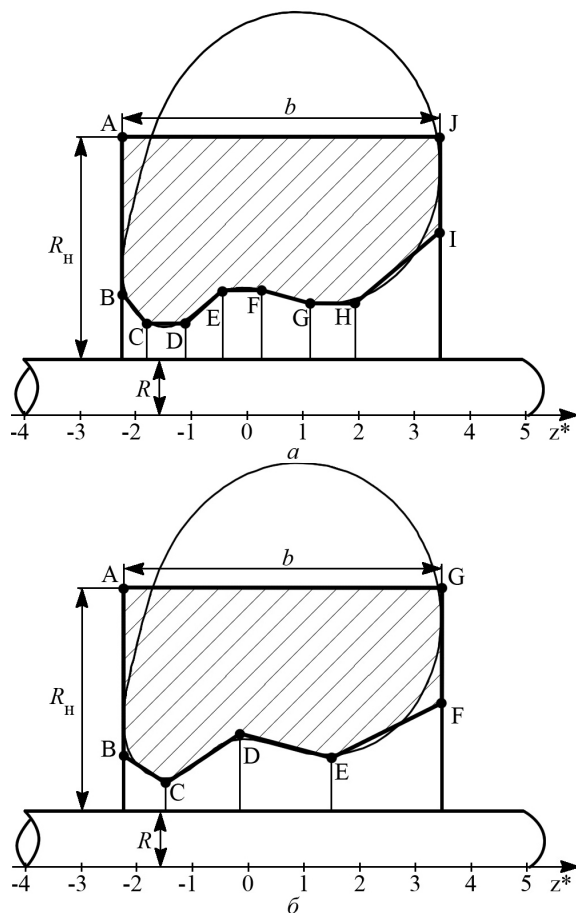


Рис.2. Аппроксимированные контуры профилей соленоида (*a* – $n = 10$, *б* – $n = 7$)

Установлено уменьшение η^* вблизи вершин E и F (рис. 2. *a* и рис. 3. *б*) внутренних углов, больших π . Расчеты показали такое же изменение η^* вблизи вершины D многоугольного контура при $n = 7$ (рис. 2, *б* и рис. 3. *з*), что можно объяснить ослаблением кольцевого эффекта и эффекта близости в сравнении с соседними вершинами контура.

Влияние скруглений кромок соленоида. Для исследования этого эффекта участки контура,

прилегающие к вершинам, аппроксимировали дугами окружностей относительно малого радиуса $R_{ск}$. Распределения поверхностной плотности тока при скруглении кромок становятся более гладкими (рис. 3, *в, д*) по сравнению с распределениями в соленоидах с острыми кромками (*б, з*).

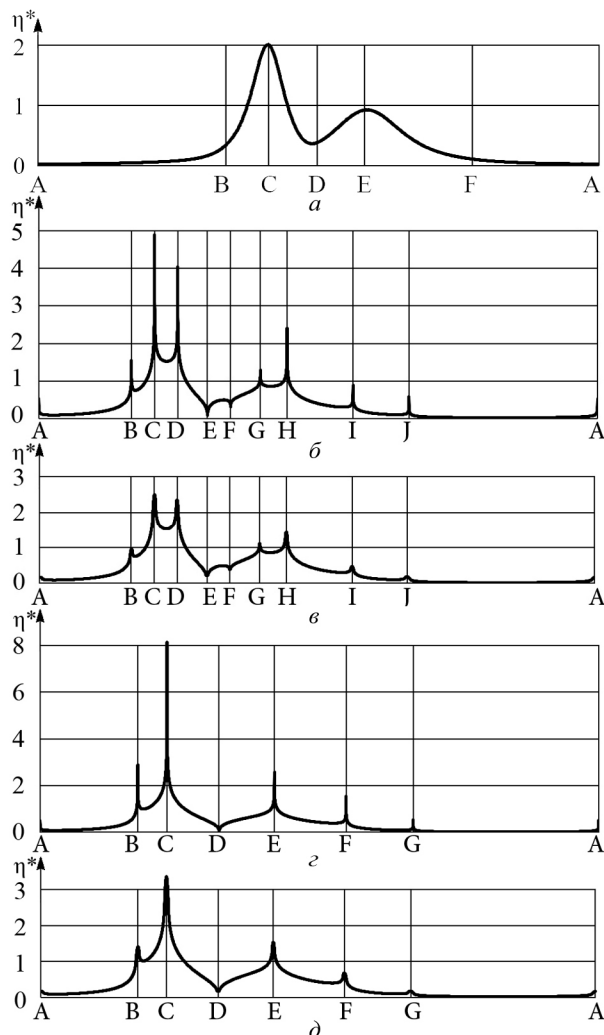


Рис.3. Распределения поверхностной плотности тока в соленоиде точного (*a*) и аппроксимированных профилей при $n = 10$ (*б* – без скругления, *в* – $R_{ск} = 0.1R$) и при $n = 7$ (*г* – без скругления, *д* – $R_{ск} = 0.1R$)

Детальное распределение поверхностной плотности тока вблизи точки C ($n = 7$) показано на рис. 4. Можно увидеть значительное уменьшение максимальной плотности тока и небольшое увеличение на краях скругляемого участка (пунктирные линии $C_{0.1}^I, C_{0.1}^{II}$ – границы дуги скругления при $R_{ск} = 0.1R$; $C_{0.2}^I, C_{0.2}^{II}$ – при $R_{ск} = 0.2R$). Рассматриваемое распределение симметрично относительно прямой, параллельной оси η^* и проходящей через точку C , что объясняется формой и расположением выбранной кромки. В общем случае такие распределения не симметричны.

Влияние скругления кромок аппроксимированного профиля зависит от величин углов и их расположения относительно цилиндра. Если величина этих углов меньше π , то, как правило, скругление

приводит к уменьшению максимума η^* (например, вершина C при $n = 10$). Если рассматриваемый угол больше π (вершины E, F при $n = 10$ и вершина D при $n = 7$), точки области скругления приближаются к цилиндру и плотность тока в них возрастает (рис. 3).

В таблице приведены численные значения поверхностной плотности тока в двух узловых точках сетки, прилегающих острой кромке, η_{σ}^* , а также максимальное значение на скруглении $\eta_{ск}^*$ ($1 - R_{ск} = 0.05R, 2 - 0.1, 3 - 0.2$). Установлено, что при помощи скругления относительно небольшого радиуса $R_{ск} = 0.05R$ можно существенно снизить максимум поверхностной плотности тока вблизи кромок на 10-60% процентов в зависимости от величины внутреннего угла, соответствующего кромке. Дальнейшее увеличение радиуса $R_{ск}$ вдвое приводит к уменьшению плотности тока на величину до 20% по сравнению с предыдущим вариантом скругления.

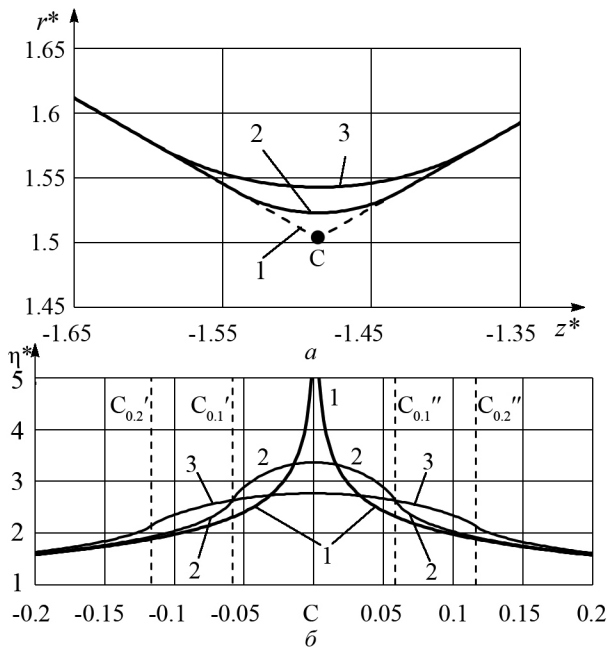


Рис. 4. Скругления кромки вершины C профиля $n = 7$ (а) и соответствующие распределения тока (б) (кривая 1 – не скругленный угол, 2- $R_{ск} = 0.1, 3 - 0.2$)

На рис.5 показано влияние величины внутреннего угла $\pi/2 \leq \alpha < \pi$ многоугольного профиля на относительное уменьшение максимумов поверхностной плотности тока для всех вершин обоих вариантов аппроксимации

$$\theta = \frac{|\eta_{\sigma_{ск}}^* - \eta_{ск}^*|}{\eta_{\sigma}^*}$$

где $\eta_{\sigma_{ск}}^*$ – максимальные значения поверхностной плотности тока вблизи острой кромки.

Пунктирными вертикальными линиями показаны значения внутренних углов при вершинах прямоугольного профиля: 4, 5, 6 – C, F, B ($n = 7$); 7, 8, 9, 10 – C, I, B, G ($n = 10$). Значения θ на оси ординат относятся к вершинам A, J ($n = 10$) и A, G ($n = 7$). Видим, что при увеличении величины

соответствующего внутреннего угла α уменьшается влияние скругления на плотность тока. Для вершин A, J ($n = 10$) и A, G ($n = 7$), угол при которых равен $\pi/2$ эта величина максимальна. Очевидно, что при величине внутреннего угла π такое влияние будет минимальным.

Таблица – Поверхностная плотность тока при скруглении вершин многоугольного профиля соленоида

Профиль	Вершина	α	η_{σ}^*	$\eta_{ск}^*$		
				1	2	3
$n=10$	A	$\pi/2$	<u>0.5329</u> 0.5379	0.2142	0.1721	0.1411
	B	2.469	<u>1.5446</u> 1.5446	1.0769	0.9609	0.8733
	C	2.245	<u>4.8790</u> 4.9022	2.9188	2.5084	2.1695
	D	2.408	<u>4.0443</u> 4.0286	2.6870	2.3610	2.0863
	E	3.875	<u>0.0817</u> 0.0817	0.1754	0.2173	0.2694
	F	3.409	<u>0.3124</u> 0.3125	0.3544	0.3785	0.4048
	G	2.874	<u>1.2912</u> 1.2923	1.1728	1.1115	1.0551
	H	2.438	<u>2.4069</u> 2.4006	1.6312	1.4375	1.2703
	I	2.275	<u>0.8956</u> 0.8917	0.5447	0.4706	0.4102
	J	$\pi/2$	<u>0.5771</u> 0.5710	0.2300	0.1852	0.1528
$n=7$	A	$\pi/2$	<u>0.5174</u> 0.5223	0.2082	0.1674	0.1376
	B	2.156	<u>2.8778</u> 2.9039	1.6387	1.4085	1.2445
	C	1.976	<u>8.1474</u> 8.1464	4.0779	3.3658	2.7652
	D	3.976	<u>0.0484</u> 0.0484	0.1278	0.1649	0.2135
	E	2.424	<u>2.5966</u> 2.5949	1.7455	1.5353	1.3534
	F	2.034	<u>1.5383</u> 1.5284	0.8015	0.6736	0.5738
	G	$\pi/2$	<u>0.5501</u> 0.5447	0.2195	0.1768	0.1460

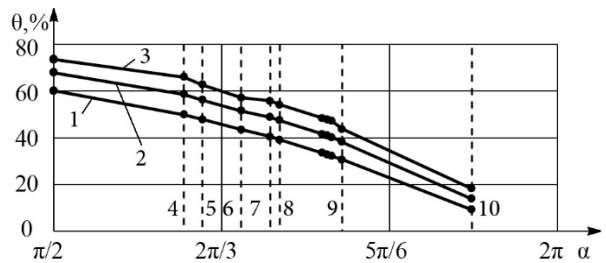


Рис. 5. Зависимость изменения максимума плотности тока от величины угла скругляемой вершины: кривая 1 – $R_{ск} = 0.05, 2 - 0.1, 3 - 0.2$.

Ранее было установлено, что расхождения, вызванные аппроксимацией точного профиля многоугольником составляют 4-8 процентов в зависимости от точности аппроксимации [3]. Расчеты

для случая скругленных кромок показали, что эти расхождения увеличились на десятки доли процента для обоих вариантов аппроксимации.

Отметим также незначительное возрастание индуктивности системы соленоид-цилиндр при увеличении радиуса скругления.

Выводы. 1. Аппроксимация криволинейного точного профиля массивного соленоида n -сторонним многоугольником вызывает перераспределение тока, которое характеризуется значительным увеличением поверхностной плотности тока вблизи вершин, угол при которых меньше π , и уменьшением – если такой угол больше π .

2. Установлено, что для вершин, внутренний угол которых меньше π , при скруглении кромок значительно уменьшается максимальное значение поверхностной плотности тока: максимальное уменьшение в 2,5-4 раза наблюдается, вблизи вершин, угол при которых равен $\pi/2$. При этом, относительная величина этого уменьшения зависит преимущественно от величины угла и практически не зависит от его расположения. Для вершин с внутренним углом больше π наблюдается возрастание поверхностной плотности тока, которое объясняется усилением кольцевого эффекта и эффекта близости, вследствие приближения точек скругленной кромки к внутреннему проводящему цилиндру.

Список литературы

1. Коновалов О.Я., Михайлов В.М., Петренко Н.П. Решение задачи продолжения магнитного поля с цилиндрической поверхности при помощи функции Грина. *Технічна електродинаміка*. 2016. №5. С. 11-13.
2. Коновалов О.Я. Определение формы соленоида по заданному граничному распределению поля. *Електронне моделювання. Київ: Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України*. 2009. №1, Т. 31. С. 116-127.
3. Mikhailov V.M., Petrenko M.P. Approximation of exact massive solenoid profile for generating pulsed magnetic field. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 1. С. 13-16.
4. Шнеерсон Г.А. К расчету распределения переменного тока на поверхности тел вращения при резком скин-эффекте. *Журнал технической физики*. 1961. №1. С. 51-54.
5. Михайлов В.М., Мовмыга И.Н. Распределение тока на кромках отверстия соленоида с соосным цилиндром при резком скин-эффекте. *Техническая электродинамика*. 1988. №4. С. 16-19.
6. Горелик Е.И., Михайлов В.М., Мовмыга И.Н. Максимальная плотность тока на скругленных кромках отверстия соленоида. *Техническая электродинамика*. 1990. №4. С. 109-111.

7. Михайлов В.М. Расчет магнитного поля при резком скин-эффекте с помощью интегральных уравнений первого рода. *Электричество*. 1981. №8. С. 37-41.
8. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. *Теоретические основы электротехники. Том 2*. Ленинград: Энергоиздат, 1981. 416 с.
9. Янке Е., Эмде Ф., Леш. Ф. *Специальные функции*. Москва: Наука, 1977. 344 с.
10. Шнеерсон Г.А. *Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов*. Ленинград: Энергоиздат, 1981. 200 с.
11. Бабат Г.И. *Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение*. Москва, Ленинград: Энергия, 1965. 552 с.
12. Михайлов В.М. Определение профилей электродов и соленоидов для создания заданных распределений поля. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск: Проблеми сучасної електротехніки*. 2000. №6. С.13-16.

References (transliterated)

1. Konovalov O.Ya., Mikhailov V.M., Petrenko N.P. Reshenie zadachi prodolzheniya magnitnogo polya s tsilindricheskoj poverkhnosti pri pomoshchi funktsii Grina [Solution of the problem of the magnetic field continuation from cylindrical surface by using Green's function]. *Tekhnichna elektrodinamika*. 2016. no. 5. pp. 11-13.
2. Konovalov O.Ya. Opredelenie formy solenoida po zadannomu granichnomu raspredeleniyu polya. *Elektronne modelyuvannya. - Kyiv: Instytut problem modelyuvannya v energetitsi im. G.E. Pukhova NAN Ukraini*. 2009. no. 1, vol. 31. pp. 116-127.
3. Mikhailov V.M., Petrenko M.P. Approximation of exact massive solenoid profile for generating pulsed magnetic field. *Tekhnichna elektrodinamika*. 2018. no. 1. pp. 13-16.
4. Shneerson G.A. K raschetu raspredeleniya peremennogo toka na poverkhnosti tel vrashcheniya pri rezkom skin-effekte. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 1961. no. 1. pp. 51-54.
5. Mikhailov V.M., Movmyga I.N. Raspredelenie toka na kromkakh otverstiya solenoida s soosnym tsilindrom pri rezkom pri rezkom skin-effekte. *Tekhnicheskaja elektrodinamika*. no.4. pp. 16-19.
6. Gorelik E.I., Mikhailov V.M., Movmyga I.N. Maksimal'naya plotnost' toka na skruglennykh kromkakh otverstiya solenoida. *Tekhnicheskaja elektrodinamika*. 1990. no. 4. pp. 109-111.
7. Mikhailov V.M. Raschet magnitnogo polya pri rezkom skin-effekte s pomoshch'yu integral'nykh uravneniy pervogo roda. *Elektrichestvo*. 1981. no. 8. pp. 37-41.
8. Neyman L.R., Demirchyan K.S. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. vol. 2*. Leningrad: Energoizdat, 1981. 416p.
9. Yanke E., Emde F., Lesh. F. *Spetsial'nye funktsii*. Moscow: Nauka, 1977. 344 p.
10. Shneerson G.A. *Polya i perekhodnye protsessy v apparature sverkhstil'nykh tokov*. Leningrad: Energoizdat, 1981. 200 p.
11. Babat G.I. *Induktsionnyy nagrev metallov i ego promyshlennoe primenenie*. Moscow, Leningrad: Energiya, 1965. 552 p.
12. Mikhailov V.M. Opredelenie profiley elektrodov i solenoidov dlya sozdaniya zadannykh raspredeleniy polya. *Tekhnichna elektrodinamika. Tematichnyy vipusk: Problemi suchasnoy elektrotehniki*. 2000. no. 6. pp.13-16.

Поступила (received) 06.03.2019

Відомості про авторів / Сведения про авторов / About the authors

Петренко Микита Павлович (Петренко Никита Павлович, Petrenko Mykyta Pavlovych) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри інженерної електрофізики; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7413-9908>; email: mykyta.petrenko@gmail.com.

К. В. ЧУНИХИН

ВЛИЯНИЕ ОБМОТКИ И МЕРИДИАННОГО СЕЧЕНИЯ СЕРДЕЧНИКА НА МАГНИТНЫЙ МОМЕНТ ЭЛЕКТРОМАГНИТА

Описана проблема, возникающая при проектировании электромагнитов постоянного тока, которая связана с ограничением применения известных методов расчета магнитного момента электромагнита. Проведен анализ влияния неоднородности внешнего магнитного поля намагничивающей катушки на магнитный момент электромагнита для определения границ применимости допущения однородности внешнего магнитного поля. Для этого был использован итерационный алгоритм численного решения интегрального уравнения относительно поверхностной плотности фиктивных магнитных зарядов, находящихся на поверхностях цилиндрических элементов сердечника, с учетом неоднородности внешнего магнитного поля. Установлено, что основной причиной расхождения между значениями магнитного момента сердечника электромагнита и сердечника, расположенного в однородном магнитном поле, является степень неоднородности внешнего магнитного поля катушки, а также участок кривой намагничивания, на который попадает напряженность результирующего магнитного поля для преобладающей части сердечника. Указано, что область применения допущения однородности внешнего магнитного поля ограничена относительной длиной сердечника и уровнем внешнего магнитного поля. Исследовано влияние формы меридианного сечения сердечника на магнитный момент электромагнита. Для сердечника с шайбами был применен итерационный алгоритм с разбиением среды сердечника как на цилиндрические, так и на кольцевые элементы для учета дополнительного краевого эффекта, обусловленного наличием шайб. Результаты расчета показали, что их наличие дает существенный вклад в магнитный момент электромагнита, иногда дающий рост в два раза, а уровень вклада зависит от положения и размеров шайб, а также на каком участке кривой намагничивания находится напряженность результирующего магнитного поля для большей части сердечника в отсутствие шайб. Показано, что с увеличением радиуса шайб и уменьшением расстояния от шайб до торцов растет магнитный момент электромагнита, что более выражено для коротких сердечников и менее выражено для длинных.

Ключевые слова: магнитный момент электромагнита, неоднородное внешнее магнитное поле, катушка, сердечник, участок кривой намагничивания, шайба.

К. В. ЧУНИХІН

ВПЛИВ ОБМОТКИ І МЕРИДІАННОГО ПЕРЕРІЗУ ОСЕРДЯ НА МАГНІТНИЙ МОМЕНТ ЕЛЕКТРОМАГНІТА

Описана проблема, що виникає при проектуванні електромагнітів постійного струму, яка пов'язана з обмеженням застосування відомих методів розрахунку магнітного моменту електромагніта. Проведено аналіз впливу неоднорідності зовнішнього магнітного поля котушки, що намагнічує, на магнітний момент електромагніта для визначення меж застосовності допущення однорідності зовнішнього магнітного поля. Для цього був використаний ітераційний алгоритм чисельного розв'язання інтегрального рівняння відносно поверхневої густини фіктивних магнітних зарядів, що знаходяться на поверхнях циліндричних елементів осердя, з урахуванням неоднорідності зовнішнього магнітного поля. Встановлено, що основною причиною розбіжності між значеннями магнітного моменту осердя електромагніту і осердя, розташованого в однорідному магнітному полі, є ступінь неоднорідності зовнішнього магнітного поля котушки, а також ділянка кривої намагнічування, на яку потрапляє напруженість результуючого магнітного поля для переважної частини осердя. Вказано, що область застосування допущення однорідності зовнішнього магнітного поля обмежена відносною довжиною осердя та рівнем зовнішнього магнітного поля. Досліджено вплив форми меридіанного перерізу осердя на магнітний момент електромагніта. Для осердя із шайбами був застосований ітераційний алгоритм з розбиттям середовища осердя як на циліндричні, так і на кільцеві елементи для врахування додаткового крайового ефекту, обумовленого наявністю шайб. Результати розрахунку показали, що їх наявність дає істотний внесок у магнітний момент електромагніта, що іноді дає зростання в два рази, а рівень внеску залежить від положення і розмірів шайб, а також на якій ділянці кривої намагнічування знаходиться напруженість результуючого магнітного поля для більшої частини осердя в відсутності шайб. Показано, що зі збільшенням радіуса шайб і зменшенням відстані від шайб до торців зростає магнітний момент електромагніта, що більш виражено для коротких осердь менш виражено довгих.

Ключові слова: магнітний момент електромагніта, неоднорідне зовнішнє магнітне поле, котушка, осердя, ділянка кривої намагнічування, шайба.

K. V. CHUNIKHIN

THE INFLUENCE OF THE WINDING AND THE MERIDIAN SECTION OF THE CORE ON THE MAGNETIC MOMENT OF THE ELECTROMAGNET

The problem arising in the design of DC electromagnets, which is associated with the limitation of the application of the known methods for calculating the magnetic moment of an electromagnet, is described. The influence of the nonuniformity of the external magnetic field of the magnetizing coil on the magnetic moment of an electromagnet is analyzed to determine the limits of applicability of the assumption of uniformity of the external magnetic field. For this purpose, an iterative algorithm was used to numerically solve the integral equation for the surface density of fictitious magnetic charges on the surfaces of cylindrical elements of the core, considering the nonuniformity of the external magnetic field. It is established that the main cause of the discrepancy between the magnetic moment of the core of the electromagnet and the core, located in a uniform magnetic field, is the degree of nonuniformity of the external magnetic field of the coil, as well as the section of the magnetization curve, which corresponds to the strength of the resulting magnetic field for the dominant part of the core. It is indicated that the region of application of the assumption of uniformity of the external magnetic field is limited by a relative core length and level of an external field. The influence of the shape of the meridian section of the core on the magnetic moment of the electromagnet is investigated. For core with washers, an iterative algorithm was used with a partitioning of the core medium into both cylindrical and ring elements to account for the additional edge effect due to the presence of washers. The results of the calculation have shown that their presence makes a significant contribution to the magnetic moment of the electromagnet, sometimes giving growth twice, and the level of contribution depends on the position and size of the washers, as well as on which section of the magnetization curve is the strength of the resulting magnetic field for most of the core in the absence of washers. It is shown that with increasing

©К. В. Чунихин, 2019

washer radius and a decrease of the distance from the washer to the ends the magnetic moment of the electromagnet increases, which is more pronounced for short cores and less pronounced for long cores.

Keywords: magnetic moment of an electromagnet, nonuniform external magnetic field, coil, core, section of magnetization curve, washer.

Введение. Ключевым фактором управления космического аппарата при помощи магнитных исполнительных органов является магнитный момент электромагнита [1]. Для достижения необходимого его значения решают задачу минимизации массы сердечника электромагнита и энергетических затрат, необходимых для питания намагничивающей катушки. При этом находят оптимальную относительную длину сердечника в зависимости от магнитных свойств материала и обмоточных данных катушки. В последнее время для увеличения магнитного момента электромагнита усложняют форму меридианного сечения сердечника [1], а также уменьшают длину катушки при сохранении ее магнитодвижущей силы.

Основная проблема при проектировании электромагнитов заключается в том, что известных работах [1–8] применяют недостаточно строго обоснованную математическую модель расчета магнитного поля электромагнита. Широко распространенные методы расчета магнитного момента с применением коэффициентов размагничивания [1–4] имеют ряд ограничений, в частности, это необходимость их экспериментального определения [1–2] или определение их при допущении постоянства магнитной проницаемости [3–4]. Однако, как это было показано в работе [9], неоднородность намагничивания сердечника, расположенного в однородном магнитном поле, противоречит допущению постоянства магнитной проницаемости. Расчет магнитного поля цилиндрического сердечника, расположенного в однородном магнитном поле, при помощи интегральных уравнений осуществлено в работах [5–8], причем в [5–7] магнитная проницаемость считалась постоянной.

В рассматриваемых работах не уделено внимание вопросу о влиянии неоднородности внешнего магнитного поля, создаваемого катушкой, на магнитный момент сердечника. Кроме того, представляет интерес влияние формы меридианного сечения сердечника на его магнитный момент.

Целью данной работы является анализ влияния неоднородного внешнего магнитного поля катушки, а также формы меридианного сечения сердечника на магнитный момент сердечника и электромагнита в целом.

Анализ влияния катушки на магнитный момент цилиндрического сердечника и электромагнита. Рассмотрим электромагнит постоянного тока, представляющий собой цилиндрический сердечник длины b радиуса R из пермаллоя 50Н, расположенный соосно с намагничивающей катушкой с внутренним R и наружным R_c радиусами и длиной $L_c = b$, в неограниченном немагнитном и непроводящем пространстве (рис. 1). Катушка имеет w витков с диаметром витка d_c , по которым течет ток I_c . Магнитный момент такой системы, в силу осевой

симметрии плоскомеридианного магнитного поля, будет иметь только осевую проекцию:

$$M_{em} = M_z + M_c, \quad (1)$$

где M_z и M_c – осевые проекции магнитного момента сердечника и катушки;

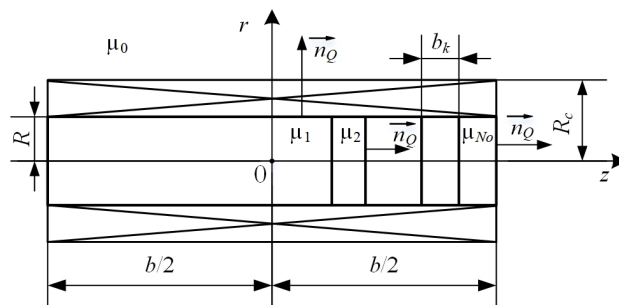


Рис. 1. Меридианное сечение электромагнита с сердечником цилиндрической формы

Эти проекции определяются следующим образом [1, 9]:

$$M_z = 4\pi \int_S r_M J_z(M) dS_M; \quad (2)$$

$$M_c = I_c \pi \sum_{k=1}^w r_k^2, \quad (3)$$

где $J_z(M)$ – осевая проекция вектора намагниченности;

S, dS_M – часть площади меридианного сечения в положительной полуплоскости $z > 0$ и его элемент с центром в точке M ;

$M \in S$ – точка с текущими координатами;

r_M, r_k – радиальные цилиндрические координаты точки M и k -го витка катушки.

Для определения J_z внутри сердечника необходимо рассчитать магнитное поле, напряженность которого представляем в таком виде [10, 11]:

$$\vec{H} = \vec{H}_c + \vec{H}_m, \quad (4)$$

где \vec{H}_c – напряженность внешнего магнитного поля, создаваемого катушкой;

\vec{H}_m – напряженность магнитного поля, обусловленного магнитными свойствами сердечника.

Проводник, из которого намотана катушка, является относительно тонким. Поэтому, заменяя витки катушки их геометрическими осями и пренебрегая винтовым характером намотки, имеем формулы для расчета соответственно радиальной и осевой проекций \vec{H}_c [12]:

$$H_{cr}(Q) = \frac{I_c}{2\pi} \sum_{k=1}^w \left\{ \frac{z_Q - z_k}{r_Q \sqrt{(r_k + r_Q)^2 + (z_Q - z_k)^2}} \times \right. \\ \left. \times \left[\frac{r_k^2 + r_Q^2 + (z_Q - z_k)^2}{(r_k - r_Q)^2 + (z_Q - z_k)^2} E(k_c) - K(k_c) \right] \right\}; \quad (5)$$

$$H_{cz}(Q) = \frac{I_c}{2\pi} \sum_{k=1}^w \left\{ \frac{1}{\sqrt{(r_k + r_Q)^2 + (z_Q - z_k)^2}} \times \right. \\ \left. \times \left[K(k_c) + \frac{r_k^2 - r_Q^2 - (z_Q - z_k)^2}{(r_k - r_Q)^2 + (z_Q - z_k)^2} E(k_c) \right] \right\}, \quad (6)$$

где Q – точка наблюдения;
 $K(k_c), E(k_c)$ – полные эллиптические интегралы первого и второго рода модуля k_c [13];

$$k_c = 2 \sqrt{\frac{r_Q r_k}{(z_Q - z_k)^2 + (r_Q + r_k)^2}};$$

r_Q и z_Q, z_k – радиальная цилиндрическая координата точки Q и осевые цилиндрические координаты точки Q и k -го витка.

Поле вектора \vec{H}_m является потенциальным и связано со скалярным потенциалом φ_m соотношением

$$\vec{H}_m = -\text{grad } \varphi_m. \quad (7)$$

Используя электростатическую аналогию [10, 14], представляем φ_m в таком виде [15, 16]:

$$\varphi_m(Q) = \frac{1}{\pi \mu_0} \int_l \frac{\sigma_m(M) r_M K(k)}{\sqrt{(z_Q - z_M)^2 + (r_Q + r_M)^2}} dl_M, \quad (8)$$

где l, dl_M – контур меридианного сечения и его элемент с центром в точке M ;

$M \in l$ – точка с текущими координатами;

$\sigma_m(M)$ – поверхностная плотность фиктивных магнитных зарядов;

μ_0 – магнитная постоянная;

z_M – осевая цилиндрическая координата точки M .

Модуль k вычисляется по такой же формуле, как и k_c , если в нем заменить координаты r_k, z_k на r_M, z_M .

Для определения σ_m при помощи итерационного алгоритма [9, 17] решаем интегральное уравнение для неоднородно намагничиваемой и нелинейной среды цилиндрического сердечника [17], которое в случае неоднородного внешнего магнитного поля \vec{H}_c принимает вид:

$$\sigma_m(Q) - \frac{\lambda_\mu}{\pi} \int_{l-l_3} \sigma_m(M) [s(Q, M) - s(Q, M')] dl_M - \\ - \frac{\lambda_\mu}{\pi} \sum_{k=1}^{N_o-1} \sigma_m(M_k) \int_{l_k} [s(Q, M) - s(Q, M')] dl_M = \\ = 2\mu_0 \lambda_\mu H_{cn}(Q), \quad (9)$$

где $l = l_1 + l_2 + l_3$, l – суммарный контур меридианного сечения сердечника в расчетной области (первая четверть координатной плоскости zOr);

l_1 и l_2 – контуры боковой и торцевой поверхностей;

$$l_3 = \sum_{k=1}^{N_o-1} l_k^c, \quad l_k^c - \text{граница между } k \text{ и } k+1$$

цилиндрическими элементами в расчетной области;

N_o – общее число однородных цилиндрических элементов в положительной полуплоскости ($z > 0$) с абсолютной магнитной проницаемостью $\mu_k, k = \overline{1, N_o}$,

имеющих длину b_k , причем $\sum_{k=1}^{N_o} b_k = b/2$ (рис. 1);

$$H_{cn}(Q) = H_{cr}(Q) \text{ для } Q \in l_1 \text{ и } H_{cn}(Q) = H_{cz}(Q) \text{ для } Q \in l_2 \cup l_3;$$

$$\lambda_\mu = \begin{cases} (\mu_k - \mu_0)/(\mu_k + \mu_0), & Q \in l_1 \cup l_2; \\ (\mu_k - \mu_{k+1})/(\mu_k + \mu_{k+1}), & Q \in l_3; \end{cases}$$

M' – точка, симметричная точке M относительно оси r .

Функция $S(Q, M)$ интегрального уравнения (9) принимает следующий вид: при $Q \in l_1$ $S(Q, M) = S_r(Q, M)$; при $Q \in l_2 \cup l_3$ – $S(Q, M) = S_z(Q, M)$, где

$$S_r(Q, M) = \frac{k}{2} \sqrt{\frac{r_M}{r_Q^3}} \left[K(k) + \frac{1}{k'^2} \left(\frac{r_M + r_Q}{2r_M} k^2 - 1 \right) E(k) \right];$$

$$S_z(Q, M) = \frac{z_Q - z_M}{4\sqrt{r_Q^3 r_M}} \frac{k^3}{k'^2} E(k); \quad k' - \text{дополнительный}$$

модуль полных эллиптических интегралов,

$k' = \sqrt{1 - k^2}$ [13]. Отметим, что $S_r(Q, M'), S_z(Q, M')$

определяется по таким же формулам, как и $S_r(Q, M), S_z(Q, M)$, если в них заменить координаты точки M на M' .

Проекция вектора \vec{H}_m определяем следующим образом:

$$H_{mr}(Q) = \frac{1}{2\pi \mu_0} \int_l \sigma_m(M) [S_r(Q, M) - S_r(Q, M')] dl_M; \quad (10)$$

$$H_{mz}(Q) = \frac{1}{2\pi \mu_0} \int_l \sigma_m(M) [S_z(Q, M) - S_z(Q, M')] dl_M. \quad (11)$$

Применяя итерационный алгоритм, формулы (5) и (6), (10) и (11), найдем проекции \vec{H} при помощи (4). Для определения J_z используем аппроксимированную зависимость кривой намагничивания пермаллоя 50Н [1]

$$J(H) = aH/(H + c) \quad (12)$$

и известную связь

$$\vec{J} = [\mu_r(H) - 1] \vec{H}, \quad (13)$$

где $a = 1,25 \cdot 10^6$ А/м, $c = 40$ А/м;

$\mu_r(H)$ – относительная магнитная проницаемость.

После нахождения J_z рассчитываем M_z , M_c и M_{em} по формулам (2), (3) и (1).

В табл. 1 представлены результаты расчета M_c , M_z и M_{em} , а также $M_z(H_0)$ сердечника в однородном магнитном поле [17] и относительные расхождения ξ между M_z и $M_z(H_0)$ по отношению к $M_z(H_0)$ при разных b (b/R) и уровнях H_0 . Ток витка I_c и число витков w подбирались так, чтобы соблюдалось условие $H_0 = I_c w / b$. Радиус сердечника оставался неизменным и равным $R = 5$ мм. Число цилиндрических элементов N_o при всех уровнях H_0 было выбрано в соответствии с рекомендованными в работе [17]: $N_o = 4, 8$ и 8 для $b = 80, 165$ и 330 мм. Для иллюстрации и определения длины области однородности внешнего магнитного поля b_{h0} на рис. 2 показано распределение H_{cz} (вертикальными пунктирными линиями отмечены положения торцов для разных длин, горизонтальной – уровень $H_0 = 6586,62$ А/м; $b_{330} = 330$ мм). Потребуем, чтобы в области однородности b_{h0} относительное отклонение между H_{cz} и H_0 не превышало 3%. Тогда для $b = (80; 165; 330)$ мм область $b_{h0} = (34,4; 122,6; 288,1)$ мм, а его относительное значение $b_{h0}/b = (0,43; 0,74; 0,87)$.

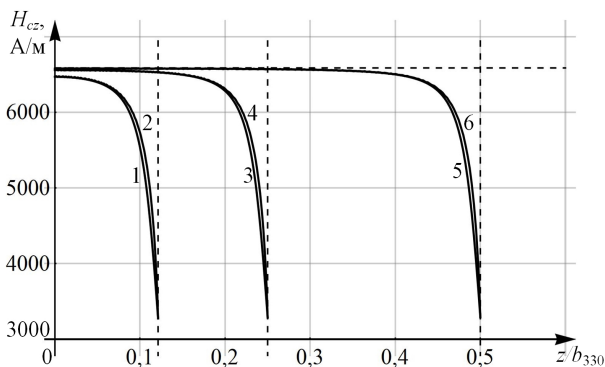


Рис. 2. Распределение осевой проекции напряженности внешнего магнитного поля катушки при $I_c w / b = 6586,62$ А/м для трех длин: $b = 80$ мм (кривая 1, 2), $b = 165$ мм (кривая 3, 4), $b = 330$ мм (кривая 5, 6); для кривых 1, 3, 5 – $r = 0$, для 2, 4, 6 – $r = 0,99R$

Таблица 1 – Сравнение M_z цилиндрического сердечника с катушкой и $M_z(H_0)$ сердечника в однородном магнитном поле H_0

b , мм; b/R	$H_0 = I_c w / b$, А/м	M_c , А·м ²	M_z , А·м ²	M_{em} , А·м ²	$M_z(H_0)$, А·м ²	ξ , %
80; 16	1646,66	0,024	0,471	0,495	0,499	5,630
	3293,31	0,048	0,931	0,980	0,986	5,581
	6586,62	0,097	1,823	1,919	1,926	5,369
	9879,93	0,145	2,675	2,819	2,822	5,230
165; 33	1646,66	0,050	3,019	3,069	3,083	2,070
	3293,31	0,100	5,786	5,886	5,904	1,990
	6586,62	0,199	10,593	10,792	10,776	1,697
	9879,93	0,299	12,858	13,156	12,972	0,886
330; 66	1646,66	0,100	17,657	17,756	17,834	0,994
	3293,31	0,199	25,095	25,294	25,288	0,763
	6586,62	0,398	28,106	28,504	28,342	0,834
	9879,93	0,597	29,229	29,827	29,481	0,854

Из табл. 1 следует, что с увеличением относительной длины b/R и уровня H_0 уменьшаются расхождения ξ . Первое связано с тем, что при увеличении b/R относительное значение области b_{h0}/b растет (см. рис. 2 и выше соответствующие значения b_{h0}/b для b), а второе – что с увеличением H_0 значения J_z смещаются в область насыщения кривой намагничивания (исключением является $b = 330$ мм при $H_0 = (6586,62 \div 9879,93)$ А/м, поскольку преобладающая часть сердечника уже находится в состоянии насыщения).

Анализ влияния формы меридианного сечения на магнитный момент сердечника и электромагнита. Вначале рассмотрим сердечник осесимметричной формы, помещенный соосно в однородное постоянное магнитное поле напряженностью \vec{H}_0 (рис. 3). Форма меридианного сечения этого сердечника отличается от цилиндрического наличием шайб (полюсных наконечников) вблизи торцов сердечника. Эти шайбы имеют следующие размеры: R_w – наружный радиус шайбы; h_w – его толщина; h_c – расстояние от торца сердечника к ближайшему основанию шайбы. Известно [1], что M_z такой формы сердечника заметно превышает M_z цилиндрического сердечника с теми же R и b .

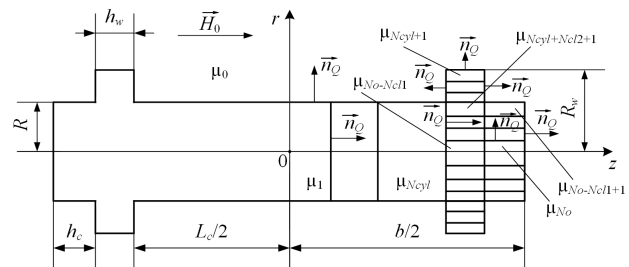


Рис. 3. Меридианное сечение сердечника сложной формы

Учет дополнительного краевого эффекта, обусловленного наличием шайб, осуществим разбиением сердечника как на цилиндрические, так и на кольцевые элементы. Причем участок сердечника длиной L_c будем разбивать на N_{cyl} однородных цилиндрических элементов, а остальные участки – на N_{cl} однородных кольцевых элементов с абсолютной магнитной проницаемостью μ_k , $k = 1, N_o$ так, что $N_o = N_{cyl} + N_{cl}$. Эти остальные участки разбиваем на два цилиндрических элемента шириной h_w и h_c , каждый из которых в свою очередь разбиваем на N_{cl1} кольцевых, а область шайбы – на N_{cl2} кольцевых элементов (см. рис. 3). Таким образом, общее число кольцевых элементов равно $N_{cl} = 2N_{cl1} + N_{cl2}$. Интегральное уравнение (9) для такой геометрии, с учетом однородности внешнего магнитного поля, преобразуется к следующему виду:

$$\sigma_m(Q) - \frac{\lambda_\mu}{\pi} \int_{l_1+l_2} \sigma_m(M) [S(Q, M) - S(Q, M')] dl_M - \frac{\lambda_\mu}{\pi} \sum_{k=1}^{N_3+N_4} \sigma_m(M_k) \int_{l'_k} [S(Q, M) - S(Q, M')] dl_M = 2\mu_0 \lambda_\mu H_{0n}(Q), \quad (14)$$

где $l = l_1 + l_2 + l_3 + l_4$;

$$l_3 = \sum_{k=1}^{N_3} l_k^c, \quad l_3 - \text{суммарный контур границы между}$$

основаниями цилиндрических и кольцевых элементов;

$$l_4 = \sum_{k=N_3+1}^{N_3+N_4} l_k^c, \quad l_4 - \text{суммарный контур границы}$$

между боковыми поверхностями кольцевых элементов;

l_k^c – граница между цилиндрическими и кольцевыми элементами в расчетной области;

$$N_3 = N_{cyl} - 1 + 2N_{cl1}, \quad N_4 = 2(N_{cl1} - 1) + N_{cl2};$$

$H_{0n}(Q) = 0$ для $Q \in l_1 \cup l_4$ (исключением является участок l_1 , принадлежащий левому и правому основанию шайбы, где для левого основания $H_{0n}(Q) = -H_0$, а для правого – $H_{0n}(Q) = H_0$) и $H_{0n}(Q) = H_0$ для $Q \in l_2 \cup l_3$.

При $Q \in l_1 \cup l_2 \cup l_3$, за исключением границ между основаниями кольцевых и цилиндрического с кольцевыми элементами, параметр λ_μ определяется по формуле как для уравнения (9). На границе между основаниями цилиндрического и кольцевых

элементов: $\lambda_\mu = \frac{\mu_{N_{cyl}} - \mu_{N_{cyl}+N_{cl2}+k}}{\mu_{N_{cyl}} + \mu_{N_{cyl}+N_{cl2}+k}}, k = \overline{1, N_{cl1}}$; на

границе между основаниями кольцевых элементов:

$\lambda_\mu = \frac{\mu_{N_{cyl}+N_{cl2}+k} - \mu_{N_{cyl}+N_{cl2}+N_{cl1}+k}}{\mu_{N_{cyl}+N_{cl2}+k} + \mu_{N_{cyl}+N_{cl2}+N_{cl1}+k}}, k = \overline{1, N_{cl1}}$; на границе

между боковыми поверхностями кольцевых элементов предпоследнего цилиндрического элемента

и шайбы: $\lambda_\mu = \frac{\mu_{N_{cyl}+k+1} - \mu_{N_{cyl}+k}}{\mu_{N_{cyl}+k+1} + \mu_{N_{cyl}+k}}, k = \overline{1, N_{cl2} + N_{cl1} - 1}$;

на границе между боковыми поверхностями кольцевых элементов последнего цилиндрического

элемента: $\lambda_\mu = \frac{\mu_{N_o - N_{cl1} + k + 1} - \mu_{N_o - N_{cl1} + k}}{\mu_{N_o - N_{cl1} + k + 1} + \mu_{N_o - N_{cl1} + k}}, k = \overline{1, N_{cl1} - 1}$.

При $Q \in l_1 \cup l_4$ (кроме участка l_1 , принадлежащему левому и правому основанию шайбы, в которых $S(Q, M) = -S_z(Q, M)$ для левого основания и $S(Q, M) = S_z(Q, M)$ – для правого) $S(Q, M) = S_r(Q, M)$, а при $Q \in l_2 \cup l_3 - S(Q, M) = S_z(Q, M)$.

Заметим, что для расчета M_z при такой форме меридианного сечения сердечника в третьем блоке итерационного алгоритма работ [9, 17] необходимо дополнительно определять среднюю по объему каждого кольцевого элемента относительную магнитную проницаемость следующим образом:

$$\mu_{kr}^{-(j)} = \frac{2}{(R_k^2 - R_{k+1}^2)h_w} \int_{S_k} r_M \mu_r(M) dS_M, \quad k = \overline{N_{cyl} + 1, N_o - N_{cl1}};$$

$$\mu_{kr}^{-(j)} = \frac{2}{(R_k^2 - R_{k+1}^2)h_c} \int_{S_k} r_M \mu_r(M) dS_M, \quad k = \overline{N_o - N_{cl1} + 1, N_o},$$

где R_k – больший радиус k -го кольцевого элемента;

S_k – площадь меридианного сечения k -го кольцевого элемента.

В табл. 2 представлены результаты расчета M_z сердечника сложной формы для разных положений шайб (h_c) и их размеров (R_w, h_w) и M_z сердечника цилиндрической формы (в таблице h_w, R_w, h_c, ξ обозначены “_”), а также относительные расхождения ξ между M_z сердечника сложной и цилиндрической форм по отношению к M_z сердечника цилиндрической формы. При расчете M_z было выбрано следующие числа цилиндрических и кольцевых элементов: $N_{cyl} = 7, N_{cl1} = 10, N_{cl2} = 5$. Радиус здесь и далее оставался неизменным и равным $R = 5$ мм. На рис. 4–5 графически проиллюстрировано влияние положения шайб (h_c) и наружного радиуса шайб (R_w) на распределение J_z сердечника сложной формы, а для сравнения показано распределение J_z сердечника цилиндрической формы.

Из табл. 2 видно, что шайбы существенно увеличивают M_z , причем это влияние более выражено для коротких сердечников ($b/R = 16$). Это объясняется тем, что изначально, в случае коротких сердечников, в силу большого значения размагничивающего поля, намагниченность находится на начальном участке кривой намагничивания и поэтому влияние шайб дает наиболее эффективный вклад в M_z . Это иллюстрируют расхождения ξ в табл. 2: для длинных сердечников ($b/R = 66$) при $H_0 = 1646,66$ А/м они составляют (44–48) % и с увеличением до $H_0 = 3293,31$ А/м ξ уменьшается до 16 %, что свидетельствует о насыщении и неэффективном влиянии шайб на M_z , в то время M_z коротких сердечников цилиндрической и сложной форм могут отличаться более чем в два раза.

Таблица 2 – Сравнение M_z сердечника сложной и цилиндрической формы в однородном магнитном поле

$b, \text{ мм}; b/R$	$h_w, \text{ мм}$	$R_w, \text{ мм}$	$h_c, \text{ мм}$	$H_0, \text{ А/м}$	$M_z, \text{ А} \cdot \text{м}^2$	$\xi, \%$
330; 66	–	–	–	1646,66	17,834	–
	4	9	4		26,322	47,6
	4	9	8		25,989	45,7
	4	9	12		25,633	43,7
	–	–	–	3293,31	25,294	–
	4	9	8		29,257	15,7
80; 16	–	–	–	9879,93	2,822	–
	1	9	1		6,314	123,7
	1	9	4		6,068	115,0
	1	9	8		5,226	85,2
	3	9	3		5,864	107,8
	5	9	2		5,903	109,2
	1	7	1		4,825	71,0
	1	11	1		6,553	132,2
	1	7	4		4,808	70,4
	1	11	4		6,657	135,9
	1	7	8		4,538	60,8
	1	11	8		6,032	113,7

Причиной такого сильного влияния шайб на M_z является то, что их наличие формирует дополнительный краевой эффект. Этот эффект уменьшает размагничивающее поле H_{mz} , что дает

увеличение H_z , J_z и M_z . На рис. 4–5 это проиллюстрировано. Например, при перемещении шайб ближе к торцам (рис. 4) усиливается влияние дополнительного краевого эффекта, что дает увеличение M_z . Для коротких сердечников это более выражено (при фиксированных $h_w = 1$ мм и $R_w = 9$ мм и уменьшении h_c от 8 до 1 мм значение ξ увеличивается от 85 до 124 %). При увеличении внешнего радиуса шайб (рис. 5) также увеличивается M_z , вследствие усиления влияния краевого эффекта, обусловленного увеличением площади поверхности шайбы.

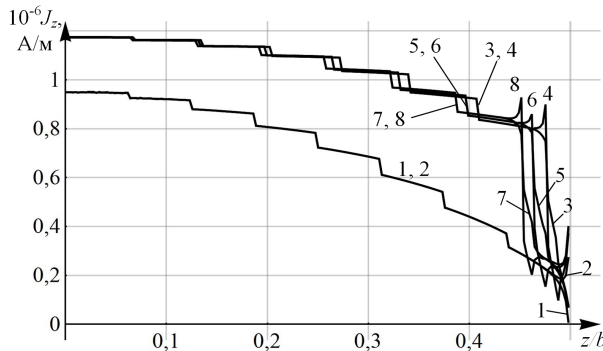


Рис. 4. Распределение осевой проекции намагниченности вдоль оси (кривые 1, 3, 5, 7) и при $r = 0,99R$ (2, 4, 6, 8) при $H_0 = 1646,66$ А/м для $b = 330$ мм: кривые 1, 2 соответствуют сердечнику цилиндрической формы, 3–8 – сложной формы с $h_w = 4$ мм, $R_w = 9$ мм и $h_c = 4$ мм (кривые 3, 4), $h_c = 8$ мм (5, 6), $h_c = 12$ мм (7, 8)

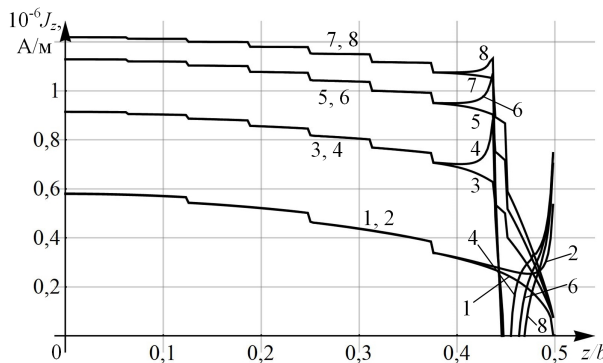


Рис. 5. Распределение осевой проекции намагниченности вдоль оси (кривые 1, 3, 5, 7) и при $r = 0,99R$ (2, 4, 6, 8) при $H_0 = 9879,93$ А/м для $b = 80$ мм: кривые 1, 2 соответствуют сердечнику цилиндрической формы, 3–8 – сложной формы с $h_w = 1$ мм, $h_c = 4$ мм и $R_w = 7$ мм (кривые 3, 4), $R_w = 9$ мм (5, 6), $R_w = 11$ мм (7, 8)

Теперь рассмотрим влияние катушки на M_z сердечника сложной формы. Итерационный алгоритм такой же, как и в случае однородного внешнего магнитного поля за исключением того, что проекции напряженности этого поля определяются по формулам (5), (6), а в правой части уравнения (14) вместо $H_{0n}(Q)$ необходимо использовать $H_{cn}(Q)$. Отметим, что $H_{cn}(Q)$ будет принимать значения $H_{cz}(Q)$ вместо H_0 и, соответственно, $-H_{cz}(Q)$ вместо $-H_0$, и $H_{cr}(Q)$ вместо 0. Числа цилиндрических и кольцевых элементов были выбраны такими же. В табл. 3 представлены результаты расчета M_c , M_z и M_{em} для сердечников сложной формы при разных R_w и для

сердечников цилиндрической формы при разных L_c , а также относительные расхождения ξ между M_z сердечников цилиндрической и сложной форм без катушки и с катушкой по отношению к M_z без катушки (знак “-” в ячейках таблицы свидетельствует об отсутствии шайб, либо об отсутствии катушки, либо об отсутствии и того и другого). Наблюдаем, как и в случае с однородным магнитным полем, существенное увеличение M_z и M_{em} при появлении шайб, иногда достигающее более чем в два раза. Влияние катушки на M_z сердечника сложной и цилиндрической форм незначительное и составляет (3–4) %. Влияние уменьшения длины катушки на M_z цилиндрического сердечника и того меньше и составляет 1,6 %.

Таблица 3 – Сравнение M_z сердечника сложной и цилиндрической форм с катушкой и без нее при $H_0 = I_c w / L_c = 1646,66$ А/м

$b, \text{мм};$ b/R	$h_w, \text{мм}$	$R_w, \text{мм}$	$h_c, \text{мм}$	$L_c, \text{мм}$	$M_c,$ $\text{А} \cdot \text{м}^2$	$M_z,$ $\text{А} \cdot \text{м}^2$	$M_{em},$ $\text{А} \cdot \text{м}^2$	$\xi, \%$
165; 33	-	-	-	-	-	3,083	-	-
	-	-	-	165	0,050	3,019	3,069	2,07
	-	-	-	157	0,047	2,970	3,017	3,66
	2	7	2	-	-	5,494	-	-
	2	7	2	157	0,047	5,294	5,342	3,64
	2	9	2	-	-	6,176	-	-
	2	9	2	157	0,047	5,976	6,024	3,23
	2	11	2	-	-	7,013	-	-
2	11	2	157	0,047	6,801	6,848	3,02	

Выводы.

1. Допущение однородности внешнего магнитного поля катушки, при помощи которого возможно применение коэффициентов размагничивания для расчета магнитного момента цилиндрического сердечника M_z , справедливо для $b/R \geq 33$ при условии, что это поле обеспечивает насыщение преобладающей части сердечника. Для $b/R = 33$ достаточно $H_0 (I_c w / b) \geq 9879,93$ А/м, а для $b/R = 66$ достаточно $H_0 (I_c w / b) \geq 1646,66$ А/м, при этом относительные расхождения между соответствующими M_z не превышают 1 %.

2. С увеличением внешнего радиуса шайб сердечника сложной формы и уменьшением их расстояния до торцов растет M_z и M_{em} , причем это более выражено для коротких сердечников ($R = 5$ мм, $b/R = 16$, $\xi = (70 \div 136) \%$) даже при большем уровне $H_0 = 9879,93$ А/м, чем для длинных ($R = 5$ мм, $b/R = 66$, $\xi = (44 \div 48) \%$) при меньшем $H_0 = 1646,66$ А/м.

3. Уровень влияния катушки для сердечников сложной формы примерно такой же как и для цилиндрических сердечников и составляет (3–4) % при $R = 5$ мм, $b/R = 33$, $R_w = (7–11)$ мм, $h_w = h_c = 2$ мм, $L_c = 157$ мм, $H_0 (I_c w / L_c) = 1646,66$ А/м.

Список литературы

1. Коваленко А. П. *Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами.* М.: Машиностроение, 1975. 248 с.

2. Розенблат М. А. Коэффициенты размагничивания стержней высокой проницаемости. *Журнал технической физики*. 1954. Т. 24, № 4. С. 637–661.
3. Матюк В. Ф., Осипов А. А., Стрелюхин А. В. Распределение намагниченности вдоль цилиндрического стержня круглого сечения, находящегося в продольном постоянном однородном магнитном поле. *Электротехника*. 2009. № 8. С. 37–46.
4. Yamamoto Y., Yamada H. New analytical expressions for flux distribution and demagnetizing factor of cylindrical core. *Electrical Engineering in Japan*. 1982. Vol. 102, no. 3. pp. 1–8. doi: 10.1002/ecja.4391020302.
5. Kobayashi M., Ishikawa Y. Surface magnetic charge distributions and demagnetizing factors of circular cylinders. *IEEE transactions on magnetics*. 1992. Vol. 28, no. 3. pp. 1810–1814. doi: 10.1109/20.141290.
6. Chen D. X., Pardo E., Sanchez A. Fluxmetric and magnetometric demagnetizing factors for cylinders. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2006. Vol. 306. pp. 135–146. doi: 10.1016/j.jmmm.2006.02.235.
7. Chadebec O., Rouve L.–L., Coulomb J.–L. New methods for a fast and easy computation of stray fields created by wound rods. *IEEE Transaction on Magnetics*. 2002. Vol. 38, no. 2. pp. 517–520. doi: 10.1109/20.996136.
8. Матюк В. Ф., Осипов А. А., Стрелюхин А. В. Моделирование магнитного состояния ферромагнитного стержня в продольном постоянном магнитном поле. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2011. № 1. С. 20–27.
9. Чуніхін К. В. Про неоднорідність намагнічування циліндричних осердь в однорідному магнітному полі. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 1. С. 3–6. doi: 10.15407/techned2019.01.003.
10. Гринберг Г. А. *Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений*. М. – Л.: Изд. АН СССР, 1948. 730 с.
11. Тозони О. В., Маергойз И. Д. *Расчет трехмерных электромагнитных полей*. К.: «Техника», 1974. 352 с.
12. Смайт В. *Электростатика и электродинамика*. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1954. 604 с.
13. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. *Специальные функции*. М.: Наука, 1977. 344 с.
14. Михайлов В. М., Чунихин К. В. Об электростатической аналогии магнитостатического поля в неоднородной намагничивающейся среде. *Электротехника и электромеханика*. 2017. № 5. С. 38–40. doi: 10.20998/2074–272X.2017.5.05.
15. Jungerman J. A. Fourth-order uniform electric field form two charged rings. *Review of Scientific Instruments*. 1984. Vol. 55, no. 9. pp. 1479–1482. doi: 10.1063/1.1137962.
16. Михайлов В. М. *Расчет электрических и магнитных полей с помощью интегральных и интегродифференциальных уравнений*. К.: УМК ВО, 1988. 60 с.
17. Чунихин К. В. О влиянии уровня внешнего магнитного поля и длины на магнитный момент цилиндрических сердечников. *Электротехника и электромеханика*. 2018. № 6. С. 33–37. doi: 10.20998/2074–272X.2018.6.06.
3. Matyuk V. F., Osipov A. A., Strelyukhin A. V. Raspreделение namagnichennosti vdol' tsilindricheskogo sterzhnya kruglogo secheniya, nakhodyashchegosya v prodol'nom postoyannom odnorodnom magnitnom pole [Magnetization distribution along the cylindrical rod in longitudinal constant uniform magnetic field]. *Elektrotehnika*. 2009, no. 8, pp. 37–46.
4. Yamamoto Y., Yamada H. New analytical expressions for flux distribution and demagnetizing factor of cylindrical core. *Electrical Engineering in Japan*. 1982, vol. 102, no. 3, pp. 1–8. doi: 10.1002/ecja.4391020302
5. Kobayashi M., Ishikawa Y. Surface magnetic charge distributions and demagnetizing factors of circular cylinders. *IEEE transactions on magnetics*. 1992, vol. 28, no. 3, pp. 1810–1814. doi: 10.1109/20.141290.
6. Chen D. X., Pardo E., Sanchez A. Fluxmetric and magnetometric demagnetizing factors for cylinders. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2006, vol. 306, pp. 135–146. doi: 10.1016/j.jmmm.2006.02.235.
7. Chadebec O., Rouve L.–L., Coulomb J.–L. New methods for a fast and easy computation of stray fields created by wound rods. *IEEE Transaction on Magnetics*. 2002, vol. 38, no. 2, pp. 517–520. doi: 10.1109/20.996136.
8. Matyuk V. F., Osipov A. A., Strelyukhin A. V. Modelirovanie magnitnogo sostoyaniya ferromagnitnogo sterzhnya v prodol'nom postoyannom magnitnom pole [Modeling of the magnetic state of a ferromagnetic rod in longitudinal constant magnetic field]. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchii kontrol'*. 2011, no. 1, pp. 20–27.
9. Chunikhin K. V. Pro neodnorodnist' namagnichuvannya tsylindrychnykh oserd' v odnorodnomu mahnitnomu poli [On the inhomogeneity of the magnetization of cylindrical cores in the uniform magnetic field]. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2019, no. 1, pp. 3–6. doi: 10.15407/techned2019.01.003.
10. Grinberg G. A. *Izbrannyye voprosy matematicheskoi teorii elektricheskikh i magnitnykh yavlenii* [Selected questions of mathematical theory of electric and magnetic phenomena]. Moscow-Leningrad, Acad. of Sci. USSR Publ., 1948. 730 p.
11. Tozoni O. V., Maergoiz I. D. *Raschet trekhmernykh elektromagnitnykh polei* [Calculation of three-dimensional electromagnet fields]. Kiev, Tekhnika Publ., 1974. 352 p.
12. Smythe W. *Elektrostatika i elektrodynamika* [Static and dynamic electricity]. Moscow, Izdatel'stvo inostrannoy literatury Publ., 1954. 604 p.
13. Yanke E., Emde F., Lesh F. *Spetsial'nye funktsii* [Special functions]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 344 p.
14. Mikhailov V. M., Chunikhin K. V. Ob elektrostatocheskoy analogii magnitostatocheskogo polya v neodnorodnoy namagnichivayushcheysya srede [On electrostatic analogy of magnetostatic field in inhomogeneous magnetized medium]. *Elektrotehnika i elektromekhanika*. 2017, no. 5, pp. 38–40. doi: 10.20998/2074–272X.2017.5.05.
15. Jungerman J. A. Fourth-order uniform electric field form two charged rings. *Review of Scientific Instruments*. 1984, vol. 55, no. 9, pp. 1479–1482. doi: 10.1063/1.1137962.
16. Mikhailov V. M. Raschet elektricheskikh i magnitnykh polei s pomoshch'yu integral'nykh i integrodifferentsial'nykh uravnenii [Calculation of electric and magnetic fields using integral and integrodifferential equations]. Kiev, UMC VO Publ., 1988. 60 p.
17. Chunikhin K. V. O vliyaniy urovnya vneshnego magnitnogo polya i dliny na magnitnyy moment tsilindricheskikh serdechnikov [On the influence of the level of an external magnetic field and the length on the magnetic moment of cylindrical cores]. *Elektrotehnika i elektromekhanika*. 2018, no. 6, pp. 33–37. doi: 10.20998/2074–272X.2018.6.06.

References (transliterated)

1. Kovalenko A. P. *Magnitnye sistemy upravleniya kosmicheskimi letatel'nyimi apparatami* [Magnetic control systems for space vehicles]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 248 p.
2. Rozenblat M. A. Koeffitsienty razmagnichivaniya sterzhney vysokoy pronitsaemosti [Demagnetization factors for high permeability rods]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 1954, vol. 24, no. 4, pp. 637–661.

Поступила (received) 28.03.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Чуніхін Костянтин Вадимович (Чунихин Константин Вадимович, Chunikhin Kostiantyn Vadymovych)

– Державна установа «Інститут технічних проблем магнетизму Національної Академії Наук України», молодший науковий співробітник; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9822-58704>; e-mail: kvchunikhin@gmail.com.

М.Г. ПАНТЕЛЯТ, Ю.С. ГРИЩУК, А.А. ЧЕПЕЛЮК, А.К. ЕЛОЕВ

НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ИНДУКЦИОННЫХ КУХОННЫХ ПЛИТ

Широкое использование в современном быту и в ресторанном производстве индукционных кухонных плит делает актуальными задачи расчетного и экспериментального исследования процессов и явлений, имеющих место при их эксплуатации. Представляет интерес составление перечня прикладных задач исследования процессов и конструкций индукционных кухонных плит, решение которых будет представлять интерес с точки зрения совершенствования конструктивных решений и режимов эксплуатации исследуемого оборудования. Обзор литературных источников показал, что авторы исследований индукционных кухонных плит обошли вниманием несколько важных прикладных задач, а именно: – исследование теплового состояния индукционной кухонной плиты в случае выхода из строя ее вентилятора; – исследование распределения электромагнитного поля плиты, а также процессов нагрева посуды и индуктора плиты в следующих ситуациях: нагреваемая посуда расположена не по центру индуктора индукционной кухонной плиты, а смещена и частично занимает часть поверхности плиты, не занятой индуктором; используется посуда меньшего диаметра, чем диаметр индуктора; – исследование процессов в индукционных кухонных плитах и посуде, нагреваемой на разных частотах поля в диапазоне 20-100 кГц; – сравнение распределения электромагнитного поля плиты и теплового поля посуды в случаях наличия и отсутствия магнитопровода в конструкции плиты, а также сравнение процессов при использовании магнитопровода, изготовленного из различных магнитных материалов. Решение указанных задач предлагается выполнять методами компьютерного моделирования мультифизических электромагнитных и тепловых процессов, а также экспериментально.

Ключевые слова: индукционная плита, обзор литературных источников, выход из строя вентилятора, расположение посуды на плите, частоты поля плиты, наличие и материалы магнитопровода, компьютерное моделирование, эксперименты.

М.Г. ПАНТЕЛЯТ, Ю.С. ГРИЩУК, О.О. ЧЕПЕЛЮК, А.К. ЕЛОЕВ

НАПРЯМКИ ДОСЛІДЖЕНЬ ІНДУКЦІЙНИХ КУХОННИХ ПЛИТ

Широке використання у сучасному побуті та у ресторанному виробництві індукційних кухонних плит робить актуальними задачі розрахункового й експериментального дослідження процесів і явищ, що мають місце при їх експлуатації. Представляє інтерес укладання переліку прикладних задач дослідження процесів і конструкцій індукційних кухонних плит, розв'язання яких буде представляти інтерес з точки зору вдосконалення конструктивних рішень і режимів експлуатації обладнання, що досліджується. Огляд літературних джерел показав, що автори досліджень індукційних кухонних плит обійшли увагою декілька важливих прикладних задач, а саме: – дослідження теплового стану індукційної кухонної плити у випадку виходу з ладу її вентилятора; – дослідження розподілу електромагнітного поля плити, а також процесів нагріву посуду й індуктора плити у наступних ситуаціях: посуд, що нагрівається, розташовано не по центру індуктора індукційної кухонної плити, а зміщено та частково займає частину поверхні плити, що не зайнята індуктором; використовується посуд меншого діаметра, ніж діаметр індуктора; – дослідження процесів у індукційних кухонних плитах і посуді, що нагрівається, на різних частотах поля в діапазоні 20-100 кГц; – порівняння розподілу електромагнітного поля плити та теплового поля посуду у випадках наявності та відсутності магнітопроводу в конструкції плити, а також порівняння процесів при використанні магнітопроводу, виготовленого з різноманітних магнітних матеріалів. Розв'язання зазначених задач пропонується виконувати методами комп'ютерного моделювання мультифізичних електромагнітних і теплових процесів, а також експериментально.

Ключові слова: індукційна кухонна плита, огляд літературних джерел, вихід з ладу вентилятора, розташування посуду на плиті, частоти поля плити, наявність та матеріали магнітопроводу, комп'ютерне моделювання, експерименти.

M.H. PANTELIAT, Yu.S. HRYSHCHUK, O.O. CHEPELIUK, A.K. YELOIEV

DIRECTIONS OF RESEARCHES OF INDUCTION KITCHEN PLATES

Introduction. The widespread use in modern life and in the restaurant production of induction cookers makes relevant the problem of computational and experimental study of the processes and phenomena that occur during their operation. It is of interest to compile a list of applied research problems of the processes and designs of induction cookers, the solution of which will be of interest from the point of view of improving the design solutions and operating modes of the investigated equipment. A review of literary sources showed that the authors of research on induction cookers ignored several important applied problems, namely: – study of the thermal state of the induction cooker in case of failure of its fan; – study of the distribution of the electromagnetic field of the cooker, as well as the processes of heating the dishes and the inductor of the cooker in the following situations: the heated dishes are not located in the center of the inductor of the induction cooker, but are partially offset and occupy part of the surface of the cooker not occupied by the inductor; dishes of smaller diameter than the diameter of the inductor are used; – study of processes in induction cookers and dishes heated at different field frequencies in the range of 20-100 kHz; – comparison of the distribution of the electromagnetic field of the cooker and the thermal field of the dishes in cases of the presence and absence of a magnetic core in the design of the plate, as well as a comparison of the processes when using a magnetic core made of various magnetic materials. The solution of these problems is proposed to perform using computer simulation of multiphysical electromagnetic and thermal processes, as well as experimentally.

Key words: induction cooker, review of literary sources, failure of the fan, location of cookware on the cooker, frequency of the field board, presence and materials of the magnetic circuit, computer simulation, experiments.

Вступ. Все більш широке використання у сучасному побуті та у ресторанному виробництві індукційних кухонних плит [1] робить актуальними задачі розрахункового й експериментального дослідження процесів і явищ, що мають місце при їх експлуатації, з метою визначення раціональних конструкцій і режимів роботи плит, а також аналізу поведінки обладнання та

посуду, що нагрівається, в різноманітних умовах експлуатації.

Нагадаємо, що індукційні плити являють собою відносно новий клас сучасної електропобутової техніки – кухонні електричні плити, які розігрівають металевий посуд вихровими струмами, які створюються електромагнітним полем частотою 20-100 кГц [1, 2].

© М.Г. Пантелят, Ю.С. Грищук, А.А. Чепелюк, А.К. Елоев, 2019

Зовнішній вигляд сучасних індукційних плит різних виробників наведено на рис. 1. Основні конструктивні елементи індукційної плити показані на рис. 2.

Представляє інтерес укладання переліку прикладних задач розрахункового та експериментального дослідження процесів і конструкцій індукційних кухонних плит, розв'язання яких буде представляти практичний інтерес з точки зору вдосконалення конструктивних рішень і режимів експлуатації обладнання, що досліджується. Отже, **мета роботи** – визначення напрямків комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень індукційних кухонних плит для отримання результатів, цікавих з практичної точки зору.



Рис. 1. Сучасні індукційні кухонні плити.

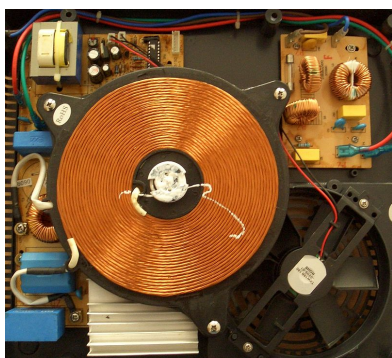


Рис. 2. Індукційна кухонна плита у розібраному стані.

Огляд літературних джерел. У роботах [1-7] розроблено методики аналітичного розрахунку та проектування індукторів індукційних кухонних плит, а також запропоновано методи комп'ютерного моделювання мультифізичних процесів і явищ, що мають місце в процесі експлуатації обладнання.

У вітчизняній науково-технічній літературі наразі не знайдено робіт, присвячених визначенню напрямків розрахункових і експериментальних досліджень

індукційних кухонних плит, що представляють практичний інтерес. Розглянемо інформацію, що наведена у закордонних виданнях.

У роботах [8-10] виконані розрахункові та експериментальні дослідження електромагнітних процесів у запропонованій авторами новій конструкції індуктора плити – з двома концентричними котушками та концентраторами електромагнітного поля. Виконано значний обсяг досліджень, детально проаналізовано отримані результати. Недоліками робіт є відсутність аналізу теплових процесів у конструкції, що розглядається, а також, що найголовніше, розроблені методики не використано для вдосконалення конструктивних рішень і режимів експлуатації найбільш поширених конструкцій індукційних кухонних плит, які наразі продаються у магазинах побутової техніки та досить широко використовуються використання у сучасному побуті та у ресторанному виробництві (див. рис. 2).

Робота [11] присвячена розв'язанню актуальної задачі зниження зовнішнього електромагнітного поля індукційної кухонної плити й електромагнітних сил, що діють на індуктор плити. Однак робота має здебільшого суто теоретичний характер, реальні конструкції індукційних кухонних плит не досліджуються.

Крім того, суттєвими недоліками використаної методики є розв'язання рівнянь електромагнітного поля у магнітостатичному наближенні (тобто знехтування вихровими струмами в першу чергу у посуді, що нагрівається), а також знехтування реальними магнітними властивостями матеріалів плити та посуду (всі матеріали вважаються немагнітними). Це не дозволяє отримати уяву про реальні процеси, що мають місце в процесі експлуатації індукційної кухонної плити.

Автори роботи [12] досліджують розподіл амплітудних значень щільності вихрових струмів і теплових втрат у запропонованій конструкції індукційної кухонної плити з індуктором у вигляді спіралі. Як і у [8-10], розробки авторів не використовуються для вдосконалення конструкцій і режимів роботи найбільш поширених сучасних моделей індукційних кухонних плит. У роботі не зроблено наступний логічний крок – комп'ютерне моделювання теплового стану індуктора та посуду, що нагрівається.

Робота [13] присвячена розв'язанню задачі електромагнітної сумісності стосовно сучасного побутового обладнання з частотою електромагнітних коливань до 100 кГц, у тому числі побутових індукційних плит. Конкретні конструкції і режими роботи індукційних плит не досліджуються.

У статті [14] досліджується запропонована авторами конструкція індукційної кухонної плити з індуктором, оптимізованим з використанням наведеної в роботі методики. Метою оптимізації є визначення геометричних параметрів індуктора, які забезпечують відносно рівномірний розподіл температури посуду, що нагрівається. Мета роботи (отримання рівномірного теплового поля посуду) є насправді важливою, але досягається вона за рахунок суттєвого ускладнення конструкції індуктора плити. Крім того, суттєвим недоліком роботи є розв'язання саме стаціонарного рівняння теплопровідності, в той час як температура посуду в процесі нагрівання суттєво змінюється не лише

у просторі, а також у часі, що теж повинно бути враховано.

В роботі [15] метод скінчених елементів використовується для комп'ютерного моделювання розподілу тривимірного електромагнітного поля запропонованої конструкції індукційної кухонної плити з індуктором досить складної конструкції. У порівнянні з традиційною конструкцією індуктора, запропонований авторами варіант дозволяє отримати більш рівномірний розподіл електромагнітного та теплового полів посуду, що нагрівається. В той же час, різноманітні режими та особливості експлуатації плити (частота струму в індукторі, процеси охолодження індуктора, матеріали та форма посуду, та ін.) у роботі не досліджені.

У статті [16] метод скінчених елементів використано для комп'ютерного аналізу зв'язаних тривимірних електромагнітного та нестационарного теплового полів у запропонованій авторами конструкції індукційної кухонної плити з дуже складним індуктором з 9 ідентичними прямокутними котушками. Порівняння отриманих результатів з розподілом електромагнітного і теплового поля традиційної плити не наведено.

Підсумовуючи, можна зробити висновок, що огляд літературних джерел, головним чином закордонних [8-16], показав, що автори розрахункових і експериментальних досліджень індукційних кухонних плит обійшли увагою декілька цікавих із суто наукової точки зору і, найголовніше, важливих для практики конструювання й експлуатації обладнання прикладних задач, наведених нижче.

Актуальність даної роботи полягає у формулюванні не розв'язаних у літературі задач розрахункового та експериментального дослідження процесів і конструкцій індукційних кухонних плит, що буде представляти практичний інтерес з точки зору вдосконалення конструктивних рішень і режимів експлуатації обладнання, що досліджується.

Пропозиції щодо напрямків розрахункових і експериментальних досліджень.

1. Дослідження теплового стану індукційної кухонної плити у випадку виходу з ладу її вентилятора.

Вентилятор (див. рис. 1 – внизу справа) є важливим конструктивним елементом індукційної кухонної плити, необхідним для охолодження індуктора та радіатора електроніки плити. Приклади конструкцій вентиляторів (напряга і струм живлення – 18 В постійного струму, 0,16 А) наведено на рис. 3. Електро-двигун і електричний привід вентилятора зображено на рис. 4.



Рис. 3. Вентилятори індукційних кухонних плит.



Рис. 4. Електродвигун і електричний привід вентилятора індукційної кухонної плити.

У разі виходу вентилятора з ладу припиниться потік повітря, спрямованого на індуктор плити для його охолодження, що призведе до дуже швидкого перегріву мідного індуктора. Отже, представляє значний інтерес задача дослідження розподілу у просторі та у часі теплового поля індукційної кухонної плити не тільки в процесі її експлуатації з нормально функціонуючим вентилятором, а також у випадках повної зупинки вентилятора та при його обертанні зі зниженою швидкістю.

Розв'язання задачі повинне в першу чергу виконуватися методами комп'ютерного моделювання мультифізичних (зв'язаних) електромагнітних і теплових процесів у індукційних кухонних плитах [2, 5]. При цьому, процес конвективного теплообміну при різних швидкостях обертання вентилятору описується відповідними коефіцієнтами теплообміну поверхні індуктора з повітрям при вимушеній конвекції, а при нерухомому вентиляторі – коефіцієнтами теплообміну з повітрям при природній конвекції. Експериментальні дослідження з використанням відповідного обладнання для реєстрації температури (тепловізор, пірометр, термопари) можливі у суттєво обмеженому обсязі у зв'язку із можливістю виходу плити з ладу в процесі проведення експериментів.

2. Дослідження розподілу електромагнітного поля плити, а також процесів нагріву посуду й індуктора плити у наступних ситуаціях:

2.1. Посуд, що нагрівається, розташовано не по центру індуктора (тобто «конфорки») індукційної кухонної плити, а зміщено та частково займає частину поверхні плити, що не зайнята індуктором.

2.2. Використовується посуд меншого діаметра, ніж діаметр індуктора («конфорки»).

У вказаних ситуаціях, які з достатньо великою вірогідністю можуть мати місце на кухнях житлових приміщень та ресторанів, можна очікувати зростання рівня зовнішнього електромагнітного поля індукційної кухонної плити, а також досить суттєвого уповільнення процесу нагріву посуду з їжею.

Запропонована задача дослідження теплового стану посуду та плити може бути розв'язана як методами комп'ютерного моделювання мультифізичних процесів [2, 5], так і експериментально. Доцільно виконати розрахункові та експериментальні дослідження при різному розташуванні посуду на плиті, різних значен-

нях діаметрів індуктору та посуду, та ін. Цікавим видається також порівняння отриманих результатів розрахунків і вимірювань.

Задача дослідження електромагнітного поля плити повинна бути розв'язана в першу чергу чисельно [3, 6]. Експериментальні дослідження можливі лише при наявності відповідної вимірювальної апаратури.

3. Дослідження мультифізичних електромагнітних і теплових процесів у індукційних кухонних плитах і посуді, що нагрівається, на різних частотах поля в діапазоні 20-100 кГц.

Метою досліджень є визначення раціональної частоти електромагнітного поля при нагріванні посуду з різними геометричними параметрами (в першу чергу, з різною товщиною днища), а також виготовленого з різноманітних матеріалів. Дослідження доцільно виконувати в першу чергу методами комп'ютерного моделювання. Експериментальні дослідження стануть можливими у випадку, якщо буде знайдено шлях «примусового» регулювання частоти електромагнітних коливань поля індуктора плити.

4. Порівняння розподілу електромагнітного поля плити та теплового поля посуду у випадках наявності та відсутності магнітопроводу в конструкції плити, а також порівняння процесів при використанні магнітопроводу, виготовленого з різноманітних магнітних матеріалів.

Як і у п. 2, задача дослідження електромагнітного поля плити повинна бути розв'язана в першу чергу чисельно [3, 6]. В якості вихідної інформації задається основна крива намагнічування відповідних магнітних матеріалів. Експериментальні дослідження можливі лише при наявності відповідної вимірювальної апаратури. Задача дослідження теплового стану посуду та плити може бути розв'язана як методами комп'ютерного моделювання мультифізичних процесів [2, 5], так і експериментально.

Висновки. Запропоновано перелік прикладних задач розрахункового та експериментального дослідження процесів і конструкцій індукційних кухонних плит, розв'язання яких представляє практичний інтерес з точки зору вдосконалення конструктивних рішень і режимів експлуатації обладнання, що досліджується.

Список літератури

1. Пантелія М.Г., Гуренцов Ю.В., Трофімов А.В. Методика розрахунку індукторів індукційних кухонних плит // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2014. – № 20 (1063). – С. 13-24.
2. Пантелія М.Г., Гришук Ю.С., Чепелюк О.О., Єлоєв А.К. Стан і перспективи мультифізичного моделювання індукційних кухонних плит // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2018. – № 32 (1308). – С. 87-92.
3. Пантелія М.Г., Гуренцов Ю.В. Методика комп'ютерного моделювання методом скінчених елементів розподілу електромагнітного поля індукційної кухонної плити // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2014. – № 41 (1084). – С. 16-24.
4. Пантелія М.Г., Трофімов А.В. Методика скінченоелементного аналізу теплового стану індукційної кухонної плити та посуду, що нагрівається // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 36-44.

5. Пантелія М.Г., Трофімов А.В. Методика мультифізичного аналізу електромагнітних і теплових процесів в індукційній кухонній плиті та посуді, що нагрівається // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 42 (1151). – С. 3-7.
6. Пантелія М.Г., Гуренцов Ю.В. Скінченоелементний аналіз розподілу електромагнітного поля індукційної кухонної плити // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 32-36.
7. Пантелія М.Г., Єлоєв А.К. Скінченоелементний аналіз розподілу температурного поля посуду, що нагрівається на індукційній кухонній плиті // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 26-28.
8. Carretero C., Lucia O., Acero J., Bordio J.M., Alonso R. Passive network equivalent of an induction system for domestic cookers application based on FEA tool simulation // Proceedings of the 26th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – 6-11 March 2011, Fort Worth, Texas, USA. – 2011. – P. 1753-1758.
9. Carretero C., Lucia O., Acero J., Bordio J.M. FEA tool based model of partly coupled coils used in domestic induction cookers // Proceedings of the 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2011). – 7-10 November 2011, Melbourne, Victoria, Australia. – 2011. – P. 2533-2538.
10. Carretero C., Lucia O., Acero J., Bordio J.M. Computational modeling of two partly coupled coils supplied by a double half-bridge resonant inverter for induction heating appliances // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2013. – v. 60, No. 8. – P. 3092-3105.
11. Hosseini S.H., Kashtiban A.M., Alizadeh G. Particle swarm optimization and finite-element based approach for induction heating cooker design // Proceedings of the SICE-ICASE International Joint Conference. – 18-21 October 2006, Busan, Korea. – 2006. – P. 4624-4627.
12. Hediehloo M., Akhbari M. New approach in design of planar coil of induction cooker based on skin and proximity effect analysis // Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). – 10-13 February 2009, Churchill, Victoria, Australia. – 2009. – P. 1100-1105.
13. Yamazaki K., Kawamoto T., Fujinami H., Shigemitsu T. Equivalent dipole moment method to characterize magnetic field generated by electric appliances: extension to intermediate frequencies of up to 100 kHz // IEEE Transactions on Electro-magnetic Compatibility. – 2004. – v. 46, No. 1. – P. 115-120.
14. Jin-Kyu Byun, Kyung Choi, Hee-Suce Roh, Song-yop Hahn. Optimal design procedure for a practical induction heating cooker appliances // IEEE Transactions on Magnetics. – 2000. – v. 36, No. 4. – P. 1390-1393.
15. Meng L.C., Cheng K.W.E., Chan K.W. Heating performance improvement and field study of the induction cooker // Proceedings of the 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA). – 20-22 May 2009, Hong Kong. – 2009. – P. 313-317.
16. Meng L.C., Cheng K.W.E., Luk P.C.K. Field analysis of an induction cooker with square 9-coil system by applying diverse exciting pattern // Proceedings of the 6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012). – 27-29 March 2012, Bristol, United Kingdom. – 2012. – P. 1-5.

References (transliterated)

1. Panteliat M.H., Hurentsov Yu.V., Trofimov A.V. Metodyka rozrakhunku induktoriv induktsiynykh kukhonnykh plyt. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. – Kh.: NTU "KhPI", 2014. No 20 (1063). P. 13-24.
2. Panteliat M.H., Hryshchuk Yu.S., Chepeliuk O.O., Yeloev A.K. Stan i perspektyvy multyfizychnoho modeliuвання induktsiynykh kukhonnykh plyt. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. – Kh.: NTU "KhPI", 2018. No 32 (1308). P. 87-92.
3. Panteliat M.H., Hurentsov Yu.V. Metodyka komp'uternoho modeliuвання metodom skinchenykh elementiv rozpodilu elektromagnitnoho polia induktsiinoi kukhonnoi plyty. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. – Kh.: NTU "KhPI", 2015. – № 13 (1122). – С. 36-44.

- aparativ. Teoriia i praktyka. – Kh.: NTU "KhPI", 2014. No 41 (1084). P. 16-24.
4. Panteliat M.H., Trofimov A.V. Metodyka skinchenoele–mentnoho analizu teplovoho stanu induktsiinoi kukhonnii plyty ta posudu, shcho nahrivaietsia. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. – Kh.: NTU "KhPI", 2015. No 13 (1122). P. 36-44.
 5. Panteliat M.H., Trofimov A.V. Metodyka multyfizychnoho analizu elektromahnitnykh i teplovykh protsesiv v induktsiinoi kukhonnii plyty ta posudi, shcho nahrivaietsia. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. Kharkov: NTU "KhPI", 2015. No 42 (1151). P. 3-7.
 6. Panteliat M.H., Hurentsov Yu.V. Skinchenoelementnyi analiz rozpodilu elektromahnitnoho polia induktsiinoi kukhonnii plyty. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. Kharkov: NTU "KhPI", 2016. No 32 (1204). P. 32-36.
 7. Panteliat M.H., Yeloviev A.K. Skinchenoelementnyi analiz rozpodilu temperaturnoho polia posudu, shcho nahrivaietsia na induktsiinoi kukhonnii plyty. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. Kharkov: NTU "KhPI", 2017. No 34 (1256). P. 26-28.
 8. Carretero C., Lucia O., Acero J., Bordio J.M., Alonso R. Passive network equivalent of an induction system for domestic cookers application based on FEA tool simulation. Proceedings of the 26th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – 6-11 March 2011, Fort Worth, Texas, USA. – 2011. – P. 1753-1758.
 9. Carretero C., Lucia O., Acero J., Bordio J.M. FEA tool based model of partly coupled coils used in domestic induction cookers. Proceedings of the 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2011). – 7-10 November 2011, Melbourne, Victoria, Australia. – 2011. – P. 2533-2538.
 10. Carretero C., Lucia O., Acero J., Bordio J.M. Computational modeling of two partly coupled coils supplied by a double half-bridge resonant inverter for induction heating appliances. IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2013. – v. 60, No. 8. – P. 3092-3105.
 11. Hosseini S.H., Kashtiban A.M., Alizadeh G. Particle swarm optimization and finite-element based approach for induction heating cooker design. Proceedings of the SICE-ICASE International Joint Conference. – 18-21 October 2006, Busan, Korea. – 2006. – P. 4624-4627.
 12. Hediehloo M., Akhbari M. New approach in design of planar coil of induction cooker based on skin and proximity effect analysis. Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). – 10-13 February 2009, Churchill, Victoria, Australia. – 2009. – P. 1100-1105.
 13. Yamazaki K., Kawamoto T., Fujinami H., Shigemitsu T. Equivalent dipole moment method to characterize magnetic field generated by electric appliances: extension to intermediate frequencies of up to 100 kHz. IEEE Transactions on Electro-magnetic Compatibility. – 2004. – v. 46, No. 1. – P. 115-120.
 14. Jin-Kyu Byun, Kyung Choi, Hee-Suce Roh, Song-yop Hahn. Optimal design procedure for a practical induction heating cooker appliances. IEEE Transactions on Magnetics. – 2000. – v. 36, No. 4. – P. 1390-1393.
 15. Meng L.C., Cheng K.W.E., Chan K.W. Heating performance improvement and field study of the induction cooker. Proceedings of the 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA). – 20-22 May 2009, Hong Kong. – 2009. – P. 313-317.
 16. Meng L.C., Cheng K.W.E., Luk P.C.K. Field analysis of an induction cooker with square 9-coil system by applying diverse exciting pattern. Proceedings of the 6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012). – 27-29 March 2012, Bristol, United Kingdom. – 2012. – P. 1-5.

Поступила (received) 11.02.19

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Пантеліят Михайло Гарієвич (Пантеліят Михаил Гарриевич, Panteliat Mikhail Garrievich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1357-2134>; e-mail: m150462@yahoo.com.

Гришук Юрій Степанович (Гришук Юрий Степанович, Hryshchuk Yuri Stepanovych) – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7427-5419>; e-mail: grischuk-kri@ukr.net.

Чепелюк Олександр Олександрович (Чепелюк Александр Александрович, Chepelyuk 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: chepl@i.ua.

Слоєв Алан Казбекович (Слоев Алан Казбекович, Yeloviev Alan Kazbekovich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант, кафедра електричних апаратів; м. Харків, Україна; e-mail: mauser98kar@gmail.com.

С.Ю. КРИВОШЕЄВ, В.В. ВАРВ'ЯНСЬКА, О.В. ЄРЕСЬКО, О.О. ЧЕПЕЛЮК, О.О. ДАВИДЕНКО

ФОТОЕЛЕКТРИЧНА СТАНЦІЯ

Розглянута структура фотоелектричної станції середньої потужності з можливістю передачі енергії в промислову мережу. Запропоновані рішення для спрощення схемотехніки перетворювальної частини сонячної станції, спрямовані на зниження її собівартості. Проведено експериментальні дослідження особливостей функціонування сонячної станції. Розглянуто можливі аварійні режими роботи сонячної станції та надано рекомендації щодо їх усунення. Проведено аналіз експериментальних досліджень і на їх основі запропоновано шляхи підвищення ККД станції.

Ключові слова: фотоелектрична станція, сонячна батарея, ШПП, інвертор, перетворювач, МРРТ.

С.Ю. КРИВОШЕЄВ, В.В. ВАРВ'ЯНСКАЯ, А.В. ЕРЕСЬКО, А.А. ЧЕПЕЛЮК, А.А. ДАВИДЕНКО

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ

Рассмотрена структура фотоэлектрической станции средней мощности с возможностью передачи энергии в промышленную сеть. Предложены решения для упрощения схемотехники преобразовательной части солнечной станции, направленные на снижения ее себестоимости. Проведены экспериментальные исследования особенностей функционирования солнечной станции. Рассмотрены возможные аварийные режимы работы солнечной станции и даны рекомендации по их устранению. Проведен анализ экспериментальных исследований и на их основании предложены пути повышения КПД станции.

Ключевые слова: фотоэлектрическая станция, солнечная батарея, ШИП, инвертор, преобразователь, МРРТ.

S.Yu. KRYVOSHEIEV, V.V. VARVIANSKA, O.V. ERESKO, O.O. CHEPELUK, O.O. DAVYDENKO

SUN STANSHE

The structure of a small-scale photovoltaic station, which can be used on single structures, is considered. At the same time, it is desirable to have a backup the battery on accumulators for reliable power supply and to be connected to the industrial network. Thus, the structure of the photovoltaic station, which has the ability to accumulate energy in the battery on accumulators and transfer the remnants to the industrial network, using it as a reservoir of infinite capacity, is proposed. The influence on the production of electricity from the photovoltaic station is shown due to the unevenness of the illumination of the surface of the solar panels. The possibilities of reducing losses from the unevenness of generation of electric energy are considered. The proposed solutions for simplification of the circuitry of the converting part of the solar station, aimed at reducing its cost. A substantiation of the transformer part of the solar station, which includes a unit of couplers with solar panels and an inverter unit, is grounded. The algorithm of operation of the control system aimed at supporting the current, selected from the solar station is proportional to the power of this station, is proposed. The structure of the physical model of the transforming part of the solar station is proposed. Selected main active components of the power unit of the solar station. The physical model of the transforming part of the solar station with microcontroller control was performed, which confirmed the effectiveness of the technical solutions proposed in the work. Estimated losses on the main elements of the transforming part of the solar station. It is indicated that the losses are due to low voltage supply. Considered possible emergency modes of operation of the solar station and provided recommendations for their elimination. The proposed solutions for the simplification of the circuitry of the converting part of the solar station, aimed at reducing its cost and increasing the efficiency of the station.

Key words: photovoltaic station, solar battery, pulse-width converter, inverter, converter, МРРТ.

Вступ. Одним із напрямків розвитку відновлюваної енергетики в Україні є фотовольтаїка, що передбачає, в тому числі, перетворення енергії фотоелектричної станції в енергію змінного струму з віддачею в промислову мережу, яку можна уявити як акумулятор практично нескінченної ємності [1].

У статті розглядається структура сонячної станції, яка об'єднує невелику групу сонячних панелей (від двох до п'яти) і при потужності одиночної панелі від 20 Вт до 50 Вт, здатну працювати як на промислову мережу, так і на акумулятор. При цьому акумулятор розрахований на прийом не більше 10% максимальної енергії сонячних панелей. Такі сонячні станції можуть експлуатуватися як в індивідуальному господарстві [2], так і на деяких одиночних об'єктах [3]. Вартість обладнання і складність схемотехніки таких систем є важливим фактором.

Огляд систем перетворення світлової енергії. Одним із недоліків, що впливають на якісні

показники перетворення світлової енергії, є нерівномірність інтенсивності сонячного випромінювання. Зокрема, частина панелей може перебувати в тіні, що негативно впливає на продуктивність усіх без винятку модулів і навіть тих, які знаходяться під сонцем. Практично неможливо уникнути затемнення частини поверхні сонячних панелей, особливо в ранковий або вечірній час, коли кут між напрямком падіння світлового променя і нормаллю до поверхні панелі великий, що призводить до нерівномірності генерування. Для отримання необхідної потужності та робочої напруги модулі панелі з'єднують послідовно і паралельно.

На виході сонячних панелей з'єднаних послідовно напруга, що генерується, підсумовується, але сила струму в усіх модулях буде однаковою. На рис.1а шунтуючі діоди VD (Bypass diode), що вбудовуються в сучасні сонячні панелі, при послідовному з'єднанні відсікають панель з низькими енергопоказниками, що призводить до зниження сумарної напруги [4].

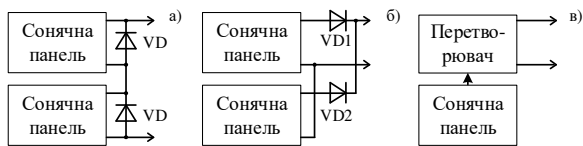


Рис. 1. Варіанти з'єднання сонячних панелей:
 а – послідовно, з шунтуючими діодами (Bypass diode);
 б – паралельно, з розділювальними діодами;
 в – з узгоджувальним перетворювачем.

Паралельне з'єднання сонячних панелей призводить до підсумовування струмів всіх панелей. Однак, щоб струм панелей з більшою напругою не перетікав в панель з меншою, яка знаходиться в тіні, вводяться розділювальні діоди VD1 та VD2, показані на рис. 1б.

З метою підвищення ефективності виробництва електроенергії рекомендується використовувати власний узгоджувальний перетворювач для кожної сонячної панелі (рис. 1в) та, бажано, з МРРТ (Maximum power point tracker) [5] а також з мікроінверторами для кожної сонячної батареї.

Нижче наведено вибір варіанту перетворювача постійної напруги сонячної станції в змінну та його схематехніка.

Обґрунтування перетворювальної частини.

Перетворення постійної напруги від сонячних панелей у змінну промислової частоти можливо як за допомогою інвертора напруги, так і за допомогою інвертора струму. Схематехнічно інвертори можуть бути виконані як за мостовою, так і за напівмостовою схемами. Безсумнівно, виникає питання про фазність інвертора - однофазний або трифазний? Для невеликих потужностей вибір зроблений на користь однофазного [7]. Якщо розглядати варіант мостового або напівмостового перетворювача - то вибір схиляється на користь напівмостового, виконаного за нульовою схемою [8], що має переваги як по простоті керування ключами (обидва емітери інвертора підключені до загального проводу), так і за кількістю компонентів (напівмостовий простіший та дешевший) [9]. Крім цього, нульова схема має вищий ККД, що важливо при невеликих напругах джерела живлення. Однак нульова схема вимагає спеціальний трансформатор, який також необхідний для перетворення напруги джерела живлення до рівня промислової мережі і забезпечує гальванічну розв'язку.

Перетворювальна частина сонячної станції складається з двох блоків:

- блок перетворювачів сполучення з сонячними панелями;
- інверторний блок.

Загальним для них є фільтровий накопичувальний конденсатор (НК) показаний на рис. 2.

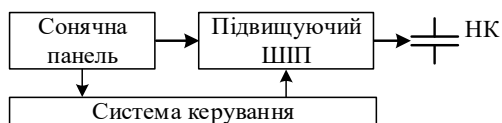


Рис. 2 Структура перетворювача сполучення з сонячними панелями

Перетворювачі сполучення з сонячними панелями містять підвищуючий ШП (широтно-імпульсний перетворювач) на кожну сонячну панель, який забезпечує стеження за точкою максимальної потужності сонячної панелі, передаючи енергію в загальний для всієї системи накопичувальний конденсатор.

Інверторна частина перетворює енергію накопичувального конденсатора (НК) в енергію змінного струму і передає її в промислову мережу. Інвертор виконується на базі інвертора струму, а роль регульованого джерела струму виконує понижуючий ШП, функціональна схема якого зображена на рис. 3 [6].



Рис. 3 Функціональна схема інверторної частини перетворювача

Система керування. Мікроконтролерна система керування виконує основний алгоритм роботи станції - формує керуючі сигнали для всіх ШП та інвертора: вимірює струм і напругу для системи МРРТ, контролює працездатність блоків і вузлів.

Алгоритм роботи системи керування понижуючим ШП побудовано таким чином, щоб напругу на конденсаторі НК підтримувати незмінною (рис. 4). Якщо напруга на конденсаторі підвищується, то це означає що струм станції i_z більший відбираемого розряджаючого струму i_p і система керування збільшує струм i_p до тих пір, поки напруга на конденсаторі не змінюватиметься. Зі зменшенням напруги на накопичувальному конденсаторі система керування зменшує відбираемий струм i_p доки напруга на конденсаторі не змінюватиметься. Таким чином, система керування понижуючим ШП контролює тільки напругу на конденсаторі, регулюючи відбираемий струм, при цьому величина цього струму буде пропорційна потужності, яка генерується сонячними панелями.

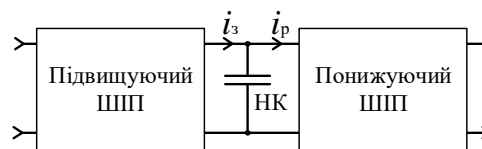


Рис. 4. Структура, яка підтримує рівність струмів

Понижуючий ШП формує струм пропорційно потужності, яку генерують сонячні панелі, а інвертор струму перетворює його в змінний і передає в промислову мережу. Необхідно відзначити, що

система керування, для різних завдань, вимірює напругу на накопичувальному конденсаторі.

Аварійні ситуації. До ситуацій близьких до аварійних належать: раптове зникнення мережі, вихід з ладу напівпровідникового приладу, коротке замикання і т.п.

Аварійним станом для перетворювачів, що працюють в режимі джерела струму, підвищуючих ШПП та інверторів струму, є підвищення рівня вихідної напруги вище допустимого (заданого). Простим рішенням цієї проблеми є вимкнення ШПП.

Таку проблему як вихід з ладу одного з підвищуючих ШПП в результаті, наприклад, пробою транзистора або відсутності енергії від однієї з сонячних панелей, система керування визначить, відключивши по черзі ШПП і за напругою на конденсаторі НК легко вирахе аварійний ШПП.

А ось на зникнення мережі в системі керування повинен бути передбачений алгоритм безаварійного виходу. Сигналом служить відсутність синхронізації з мережею. Для цього система керування повинна контролювати тривалість імпульсів синхронізації і при невідповідності заданій - миттєво відключити інвертор і ШПП, а при появі імпульсів синхронізації - відновлювати роботу. Інвертор повинен мати захист від перевищення напруги в мережі як апаратний, так і програмний. Транзистори інвертора захищаються стабілітронами - супресорами (апаратно), розрахованими на прийом енергії перенапруги на час спрацювання програмного захисту. Транзистори ШПП повинні бути вибрані на допустимо задану напругу, а транзистори інвертора - на подвійну допустимо задану напругу.

Коротке замикання і вихід з ладу напівпровідникового приладу неможливо ліквідувати програмно, тому врятувати становище може тільки запобіжник в ланцюзі мережі, а далі - згідно алгоритму раптового зникнення мережі. Вибір цього запобіжника здійснюється за типовими методиками [10].

Фізичний експеримент. Структура фізичної моделі перетворювальної частини сонячної станції зображена на рис. 5 і виконана у відповідності зі структурами, наведеними на рис. 2 та рис. 3.

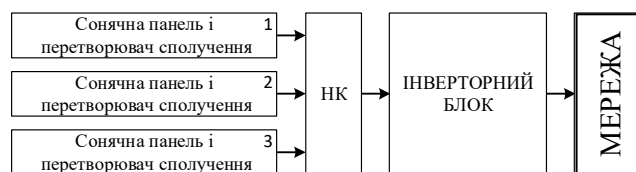


Рис. 5 Структурна схема перетворювальної частини

У фізичному експерименті використовувалися три сонячні панелі АКМ-30 [11], основні електричні характеристики яких наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Основні електричні характеристики сонячної панелі АКМ-30

Максимальна напруга (xx), В	Струм короткого замикання (кз), А	Напруга в точці максимальної потужності, В	Струм в точці максимальної потужності, А
22,3	1,73	18,6	1,62

Напруга на виході підвищуючого ШПП, а це напруга на накопичувальному конденсаторі (НК), повинна бути на ~10% більша за вхідну, яка є напругою в точці максимальної потужності сонячних панелей:

$$U_{НК} = 1,1 * U_{MP}, \\ U_{НК} = 1,1 * 18,6 = 20,3 \text{ В.}$$

Але напруга на накопичувальному конденсаторі (НК) не може бути нижчою максимальної напруги холостого ходу сонячної панелі рівної 22,3 В, тому що при відключеному ШПП напруга на НК все одно буде рівна максимальній напрузі холостого ходу панелі. Тому допустимо задану напругу прийнято 22,3 В.

Вибір основних активних компонентів перетворювальної частини сонячної станції спрямовано на бюджетні прилади.

Польові транзистори обрані з низьким опором каналу:

- для ШПП сонячних панелей обраний IRFR4105PBF з опором каналу $R_{DS(on)}=45$ мОм на напругу 55 В;

- для понижуючого ШПП та інвертора - IRF2807PBF з опором каналу $R_{DS(on)}=13$ мОм на напругу 75 В.

Оціночні статичні втрати на основних елементах перетворювальної частини сонячної станції склали 9 Вт. При цьому втрати у діоді понижуючого ШПП дорівнюють 1,9 Вт, а втрати у діодах інвертора дорівнюють 3,8 Вт (на фізичному макеті найбільш нагріті саме діоди інвертора (~50°C)(всі діоди Шоттки)). При цьому ККД перетворювальної частини сонячної станції склав ~90 %.

Для фізичного моделювання використовувався серійний трансформатор ТС-100, втрати якого близько 10%, що істотно знижує загальний ККД системи.

Структурну схему станції можливо спростити. Для цього можна виключити узгоджуючі перетворювачі між сонячною панеллю та накопичувальним конденсатором (використовувати метод - Percentage of open circuit voltage [12]). Однак це дещо знизить відбір сонячної енергії, що підтверджено на фізичній моделі. Ще більше знизити собівартість станції можливо, якщо використовувати шість сонячних панелей, з'єднавши їх попарно-паралельно-последовно. При цьому напруга в ланці постійного струму збільшиться в два рази, що дозволить в інверторі струму, що працює на низькій частоті, використовувати більш дешеві в порівнянні з польовими транзисторами, біполярні транзистори Дарлінгтона (також виключити драйвер керування польовими транзисторами, а керувати безпосередньо від мікроконтролера), і внаслідок цього дещо підвищити ККД (приблизно на 3 %).

Висновки.

1. На основі розглянутих сучасних концепцій побудови сонячної електростанції запропоновано варіант перетворювача постійної напруги від сонячних панелей у змінну напругу промислової частоти.

2. Виконана фізична модель перетворювальної частини сонячної станції, яка підтвердила ефективність запропонованих у роботі технічних рішень.

3. Основні втрати перетворювальної частини сонячної станції виділяються у діодах (~ 5 Вт), що цілком пояснюється низькою напругою живлення (12В). Це підтверджується і фізичним експериментом.

4. Запропоновано варіант зниження собівартості сонячної станції, якщо виключити погоджуючі перетворювачі, а функцію "стеження за точкою максимальної потужності" покласти на ШПП інвертора.

Список літератури

1. <https://www.nrel.gov/docs/fy08osti/42672.pdf>
2. <https://220volt.com.ua/avtonomnaya-solnechnaya-stantsiya-na-1kvt>
3. <https://www.olx.ua/obyavlenie/solnechnoe-derevo-solnechnye-batarei-paneli-inventory-elektrostantsii-IDCd1M6.html>
4. <http://sunalt.ru/stati/poleznoe-kak-ten-vliyaet-na-rabotu-solnechnoj-paneli.html>
5. <https://www.solar-battery.com.ua/kak-vyibrat-kontroller-zaryada/>
6. <http://solarsoul.net/vliyanie-teni-na-rabotu-solnechnyx-batarej>
7. <https://axiomplus.com.ua/solnechnye-elektrostantsii/product-74695/>
8. Автономные инверторы. Ю. П. Гончаров, В. В. Ермуратский, Э. И. Заика, А. Ю. Штейнберг Кишинев: Штиинца, 1974. - 336 с.
9. http://masters.donntu.org/2007/fema/rudenko_y/library/art7/

- invert.htm
10. http://www.eti.su/articles/nizkovoltnaya-tehnika/nizkovoltnaya-tehnika_1443.html
 11. https://avante.com.ua/catalog/batareja_solnechnaja_akm_30_m_30_vt_12v_mono-06958/
 12. Desing and Analysis of Open Circuit Voltage Based Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic System International of Advances in Science and Technology, Vol. 2, No. 2, 2011.

References (transliterated)

1. <https://www.nrel.gov/docs/fy08osti/42672.pdf>
2. <https://220volt.com.ua/avtonomnaya-solnechnaya-stantsiya-na-1kvt>
3. <https://www.olx.ua/obyavlenie/solnechnoe-derevo-solnechnye-batarei-paneli-inventory-elektrostantsii-IDCd1M6.html>
4. <http://sunalt.ru/stati/poleznoe-kak-ten-vliyaet-na-rabotu-solnechnoj-paneli.html>
5. <https://www.solar-battery.com.ua/kak-vyibrat-kontroller-zaryada/>
6. <http://solarsoul.net/vliyanie-teni-na-rabotu-solnechnyx-batarej>
7. <https://axiomplus.com.ua/solnechnye-elektrostantsii/product-74695/>
8. Avtonomni inventory. YU. P. Honcharov, V. V. Ermurat-skiy, E. I. Zayika, A. YU. Shteynberh Kyshyniv: Shtyynsa, 1974. - 336 s.
9. http://masters.donntu.org/2007/fema/rudenko_y/library/art7/invert.htm
10. http://www.eti.su/articles/nizkovoltnaya-tehnika/nizkovoltnaya-tehnika_1443.html
11. https://avante.com.ua/catalog/batareja_solnechnaja_akm_30_m_30_vt_12v_mono-06958/
12. Desing and Analysis of Open Circuit Voltage Based Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic System International of Advances in Science and Technology, Vol. 2, No. 2, 2011 roku.

Надійшла (received) 15.02.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кривошеєв Сергій Юрійович (Кривошеев Сергей Юрьевич, Kryvosheiev Serhii Yuryevich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри промислової і біомедичної електроніки; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7393-6198>; e-mail: s.k.kryvosheev@gmail.com

Варв'янська Вікторія Віталіївна (Варвянская Виктория Витальевна, Varvianska Viktoriia Vitaliivna), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри промислової і біомедичної електроніки; м. Харків, Україна; e-mail: tvita62@gmail.com

Ересько Олександр Вячеславович (Ересько Александр Вячеславович, Eresko Oleksandr Viacheslavovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри промислової і біомедичної електроніки; м. Харків, Україна; e-mail: aerkoff@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; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4522-9821>; e-mail: chep1@i.ua

Давиденко Олександр Олександрович (Давиденко Александр Александрович, Davydenko Oleksandr Oleksandrovych) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри промислової і біомедичної електроніки; м. Харків, Україна; e-mail: alexdavidenko02@gmail.com

О. М. ГРЕЧКО**СУЧАСНІ АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА 3D-ДРУК.
ОГЛЯД ОСТАННІХ ДОСЯГНЕНЬ В РІЗНИХ СФЕРАХ ЛЮДСЬКОГО ЖИТТЯ**

Вступ. Актуальним завданням сьогодення є застосування нових технологій і розробок в повсякденному житті з метою покращення як умов існування людства, так і задля зменшення затрат енергоресурсів, матеріалів, часу та інше при виготовленні різноманітних виробів. Одним з перспективних напрямків рішення такого нагального завдання є впровадження останніх досягнень в галузі адитивних технологій в різні сфери людського життя. **Методи.** На основі опублікованого у відкритих інформаційних джерелах численного матеріалу наведено короткий науково-технічний огляд останніх досягнень в області сучасних адитивних технологій як в різних галузях промисловості так і в сферах людського життя. Представлені найвагоміші розробки дослідників з усього світу в галузях медицини та протезування, архітектури та будівництва, проаналізовано технології створення металевих деталей з використанням адитивних технологій. **Результати.** Проведений аналіз прикладів впровадження адитивних технологій в світі показав важливу необхідність недопущення відставання вітчизняної промисловості, а також науки і освіти від актуальних тенденцій застосування 3D-принтерів. Показано переваги і недоліки адитивних технологій у порівнянні з традиційними способами виробництва. **Обговорення.** Робота направлена на ознайомлення вітчизняних фахівців та науковців з можливостями застосування сучасних адитивних технологій в різних секторах промисловості і сферах людського життя. Матеріали статті можуть бути спрямовані для залучення молодих вчених, аспірантів, студентів щодо пошуку нових шляхів використання адитивних технологій та втілення найсміливіших їх ідей і проєктів в реальне життя.

Ключові слова: адитивні технології, 3D-принтер, 3D-друк.

А. М. ГРЕЧКО**СОВРЕМЕННЫЕ АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И 3D-ПЕЧАТЬ.
ОБЗОР ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ В РАЗЛИЧНЫХ СФЕРАХ ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ ЖИЗНИ**

Введение. Актуальной задачей сегодняшнего времени является применение новых технологий и разработок в повседневной жизни с целью улучшения как условий существования человечества, так и для уменьшения затрат энергоресурсов, материалов, времени и прочее при изготовлении различных изделий. Одним из перспективных направлений решения такой первоочередной задачи является внедрение последних достижений в области аддитивных технологий в различные сферы человеческой жизни. **Методы.** На основе опубликованного в открытых информационных источниках многочисленного материала приведен краткий научно-технический обзор последних достижений в области современных аддитивных технологий как в различных отраслях промышленности так и в сферах человеческой жизни. Приведены значимые разработки исследователей со всего мира в области медицины и протезирования, архитектуры и строительства, проанализированы технологии создания металлических деталей с использованием аддитивных технологий. **Результаты.** Проведенный анализ примеров внедрения аддитивных технологий в мире показал важную необходимость недопущения отставания отечественной промышленности, а также науки и образования от актуальных тенденций применения 3D-принтеров. Показаны преимущества и недостатки аддитивных технологий по сравнению с традиционными способами производства. **Обсуждение.** Работа направлена на ознакомление отечественных специалистов и исследователей с возможностями применения современных аддитивных технологий в различных секторах промышленности и сферах человеческой жизни. Материалы статьи могут быть направлены для привлечения молодых ученых, аспирантов, студентов к поиску новых путей использования аддитивных технологий и воплощения самых смелых их идей и проєктов в реальную жизнь.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-принтер, 3D-печать.

О. М. GRECHKO**MODERN ADDITIVE TECHNOLOGIES AND 3D PRINTING.
OVERVIEW OF RECENT ADVANCES IN VARIOUS SPHERES OF HUMAN LIFE**

Introduction. The current task of today is to apply new technologies and developments in everyday life in order to improve both the living conditions of mankind and to reduce the cost of energy, materials, time, etc. in the manufacture of various products. One of the promising areas for solving such an urgent task is to introduce the latest advances in additive technologies in various spheres of human life. **Methods.** On the basis of numerous materials published in open information sources, a brief scientific and technical review of recent advances in the field of modern additive technologies is given in various industries and in human life. The significant developments of researchers from around the world in the field of medicine and prosthetics, architecture and construction are presented, the technology of creating metal parts using additive technologies is analyzed. **Results.** The analysis of examples of the introduction of additive technologies in the world showed an important need to avoid the lag of domestic industry, as well as science and education from the current trends in the use of 3D printers. The advantages and disadvantages of additive technologies compared to traditional production methods are shown. **Discussion.** The work is aimed at familiarizing domestic specialists and researchers with the possibilities of applying modern additive technologies in various industrial sectors and spheres of human life. The article materials can be sent to attract young scientists, graduate students, students to search for new ways to use additive technologies and translate their wildest ideas and projects into real life.

Key words: additive technologies, 3D printer, 3D printing.

Вступ. Нам пощастило жити в такий час, коли майже не щодня ми стаємо свідками неймовірних подій, захмарних досягнень, нових відкриттів. І це стосується ледве не всіх галузей та сфер людського життя – наука, техніка, медицина, спорт, культура тощо. Вже нікого не здивуєш ані телевизорами з гнучким екраном, що згортаються в рулон, ані хатніми роботами-помічниками, що виконують за Вас буденну роботу, ані вирощуванням людських «органів-запчастин» для

хворих. І якщо у нашому дитинстві ми запускали у повітря літаки з паперу, то зараз вже частіше можна побачити над головами безпілотні літальні апарати – дрони. А в Японії дронів у повітрі з'явилось так багато, що місцева поліція була вимушена запускати вже свої дрони зі спеціальною сіткою для відловлювання потенційно небезпечних екземплярів! І ці приклади досягнень можна продовжувати нескінченно довго. Чого лише варті фантастичні проєкти відомого Ілона

© О.М. Гречко, 2019

Маска з запуском надважкої ракети-носія Falcon Heavy, вакуумним потягом та тунелем Hyperloop та автомобільним тунелем Boring! Все це ще декілька років тому можна було прийняти лише за сюжет фантастичного голлівудського фільму, а зараз це наша з Вами реальність! Так само в наше життя входить і нова (як для України, хоча їй вже понад 30 років [1-6]) технологія зі створення тривимірних об'єктів – 3D-друк. І входить не поступово, а, можна сказати, вривається з небувалою швидкістю.

Взагалі, технології створення тривимірних об'єктів можна поділити на субтрактивні (від англ. *to subtract* – віднімати) та адитивні (від англ. *to add* – додавати) технології. Прикладами субтрактивних технологій є усі різновиди механічної обробки заготовок з металу, деревини, пластмаси, глини, каменю тощо – токарна обробка, фрезерування, шліфування, полірування та інші, у яких з попередньо відібраної заготовки шляхом віднімання усього зайвого створюється готова деталь. Протилежністю субтрактивним технологіям є адитивні технології, при яких майбутні деталі створюються на вільній області простору (платформі, яка спочатку є порожньою) шляхом пошарового нарощування і додавання певного матеріалу у потрібні місця. Саме до адитивних технологій і відносяться технології, що застосовуються при 3D-друку на 3D-принтерах – пристроях, що є різновидами промислових роботів, які здатні створювати об'ємні об'єкти шляхом пошарового нанесення матеріалу на певні місця за заданою керуючою програмою.

Метою роботи є складання на основі опублікованого у відкритих інформаційних джерелах матеріалу короткого науково-технічного огляду останніх досягнень у сфері сучасних адитивних технологій та 3D-друку в різних сферах людського життя.

У роботі [6] було детально розглянуто найбільш розповсюджені адитивні технології 3D-друку з розширеним описом принципу створення деталей і аналізом різних моделей 3D-принтерів, розглянуто різновиди матеріалів для 3D-друку і особливості протікання самого процесу друку, проаналізовано основні переваги та недоліки технологій 3D-друку. З того моменту і по теперішній час в світі ледве не кожен день з'являються нові цікаві розробки у сфері 3D-друку, з деякими з яких варто познайомитись більш детально.

Огляд досягнень у сфері 3D-друку за останні роки.

Медицина. Організація Médecins Sans Frontières (MSF) («Лікарі без кордонів») кілька років тому в столиці Йорданії м. Амман надала 3D-друковані протези (рис. 1) жертвам війни з ампутованими кінцівками [7].

На сьогоднішній день створено 16 друкованих протезів для пацієнтів з Ємену, Сирії, Іраку, Газі та з інших місць – зон військових конфліктів, де практично недоступне лікування на стаціонарі. Зі слів пацієнтів протези, що виготовлені традиційним способом, є надто важкими і неефективними для виконання повсякденних завдань. Крім того, виробництво протеза руки обійдеться приблизно в 2000 доларів. А завдяки технології 3D-друку, такий же протез можна створити з пластику (термопластичного поліуретану) всього за 50 доларів. В майбутньому планується виробляти такі

протези за допомогою 3D-друку та 3D-сканеру в важкодоступних місцях, де немає надійної системи охорони здоров'я, наприклад, в зонах військових конфліктів. Це, на жаль, є актуальним питанням і для нашої країни.



Рис. 1. Протез руки, виготовлений за допомогою 3D-друку

Британська компанія Open Bionics, що з 2014 р. займається розробкою і виробництвом біонічних протезів з використанням технологій 3D-друку, у 2018 р. почала випускати кастомні протези для дорослих і дітей у віці від 9 років з ампутацією нижче ліктьового суглоба [8] (рис. 2). Компанія отримала ліцензії світових компаній (Disney, Marvel і Pixar) на використання творчості цих брендів в оформленні штучних рук серії Hero Arm, так що пацієнти зможуть замовити протези в стилі улюблених героїв зі світу кінематографу.



Рис. 2. Біонічні протези рук компанії Open Bionics

Ці протези керуються за допомогою міоелектричних датчиків і здатні виконувати доволі широкий набір рухів і хватів. Точність рухів регулюється за рахунок зміни швидкості приводів, що дозволяє, наприклад, навіть оперувати деталями з конструктору LEGO. Вантажопідйомність дорослої версії протезу досягає 8 кг при масі самого протеза не більше 1 кг. Штучні руки розробляються під кожного пацієнта індивідуально за рахунок 3D-сканування кукси і 3D-

друку окремих елементів. Заряду акумуляторів вистачає на повний день експлуатації. Вартість біонічного протезу складає приблизно 7000 доларів.

Ще одним прикладом успішного застосування адитивних технологій у медицині є унікальний випадок, що стався у Болгарії у 2018 р. – тамтешні хірурги у софійській міській лікарні «Tokuda Hospital» імплантували 3D-друковане ребро з поліаміду 35-річному хворому Івайлу Іосифову (рис. 3,а), який став першим болгарським пацієнтом, який отримав надруковане на 3D-принтері ребро [9] (рис. 3,в).

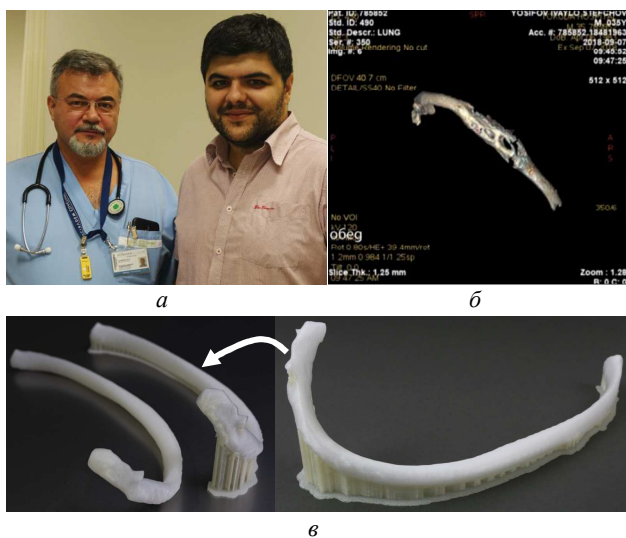


Рис. 3. а – на фото праворуч – пацієнт І. Іосифов, ліворуч – кардіохірург; б – хворе ребро; в – 3D-друковане ребро з підтримуючими структурами та без них

Заміна кістки 3D-імплантатом знадобилася з огляду появи пухлини (рис. 3,б), що була викликана вродженою хворобою і яка була здатна привести до суттєвих проблем з диханням. Штучне полімерне ребро було виконано з одного з різновидів поліаміду, що отримав сертифікат безпеки у США. Точна цифрова модель була отримана за допомогою 3D-сканування хворого ребра, яке було успішно видалено. У якості 3D-принтера використовувався 3D-принтер польської компанії 3DGence [10]. По завершенні 3D-друку і безпосередньо перед встановленням імплантат ребра ретельно стерилізували окисом етилену, гамма радіацією і нагріванням до 140 °С. Зі слів менеджера компанії 3DGence Філіпа Турчінські «...3D-принтери їх виробництва забезпечують високу об'ємну точність, що стало вирішальним фактором у проведенні операції, а індивідуальне моделювання ребра дозволило дуже точно встановити імплантат на місце видаленої кістки з повною відповідністю за формою, кривизною, шириною і товщиною» [10]. В свою чергу, проф. Мінчев, завідувач відділенням кардіохірургії лікарні «Tokuda Hospital» зазначив: «Це нова ера в реконструкції грудних стінок для пацієнтів з пухлинами, які вимагають видалення кістково-хрящових структур. Матеріал, що використовувався, довів свою біосумісність, а неймовірна точність відтворення дозволяє проводити резекції грудних клітин і заміну кісткових

тканин імплантатами індивідуального дизайну» [10].

Біль у колінах...Що може бути гірше! Але і тут на допомогу прийшли адитивні технології – новий матеріал дозволяє друкувати навіть колінні хрящі-імплантати на 3D-принтері [11]!

Вчені американського університету Duke University [12] створили новий матеріал, який імітує хрящ людини і може бути використаний хірургами для 3D-друку імплантатів індивідуальної форми згідно анатомії кожного пацієнта задля заміни пошкоджених частин колінного суглоба. Відомо, що коліна людей мають пару менісків – хрящів у формі місячного серпа, які слугують у якості амортизаторів. Але за роки навантажень ці важливі частини суглоба можуть або зноситись або ж бути серйозно пошкоджені в результаті навіть одного невірної руху під час гри, наприклад, у футбол або теніс. Результатом стають неймовірні больові відчуття і збільшений ризик розвитку артриту.

Розробники стверджують, що їх матеріал на основі гідрогелю (рис. 4,а) є першим у світі, який за міцністю і еластичністю повністю відповідає хрящу людини, при цьому залишаючись стабільним усередині тіла і який дозволяє використовувати його в процесі 3D-друку. Для підтвердження на практиці своєї розробки дослідники використовували 3D-принтер за 300 доларів для друку індивідуальних менісків для пластикової моделі коліна (рис. 4,б).

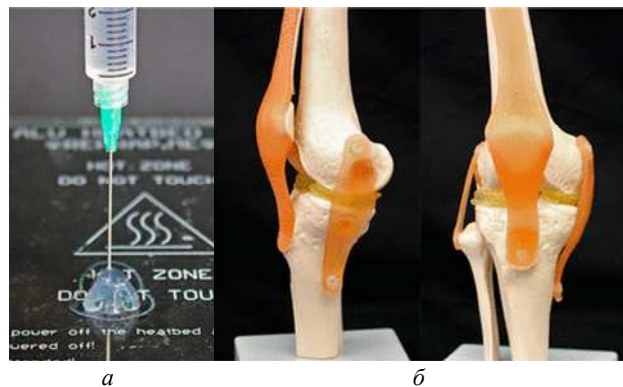


Рис. 4. 3D-друк розробленим гідрогелем (а) моделі меніску колінного суглоба (б)

Один з авторів роботи [12] професор В. Wiley зазначив, що: «...ми розробили тепер можливим для всіх досить простий і відносно недорогий процес друку імплантатів, дуже близьких за своїми медичними властивостями до хряща людини». Варто відзначити, що це дійсно революційне досягнення – розірвання або пошкоджені меніски дуже примхливі до процесу самозагоювання. Хірургам часто доводиться їх або частково або повністю видалити, а існуючі до цього імплантати або не відповідали за міцністю і еластичністю людському «оригіналу», або відрізнялись поганою біологічною сумісністю і перешкоджали загоєнню пошкодженого суглоба.

Гідрогелі останнім часом все частіше застосовуються в якості матеріалів для заміни хрящів, оскільки є дуже схожими за молекулярною структурою на хрящ людини і є біологічно сумісними. Однак вченим до сих пір не вдалось створити саме такий гідро-

гель, який би відповідав характеристикам хряща людини і при цьому відрізнявся можливістю ефективного застосування в технології 3D-друку. Остання умова є дуже важливою, оскільки людські меніски мають доволі складну форму і у різних людей сильно відрізняються. І саме 3D-друк дозволив створювати індивідуальні імпланти, які будуть краще приживатися.

Значним досягненням у медицині є розробка вчених з Toronto University, що створили портативний 3D-принтер для друку шкірного покриву [13]. Він насамперед призначений для швидкого відновлення пошкоджених ділянок шкіри шляхом нанесення на уражені зони штучного покриву (рис. 5). Пристрій дозволить самостійно обробити рани у вигляді порізів або опіків з пошкодженням до підшкірної основи (гіподермісу), не вдаючись при цьому до послуг кваліфікованого медичного персоналу. Цей портативний 3D-принтер важить менше 1 кг, а зовні і за принципом функціонування нагадує відомий маркувальний етикет-пістолет. Цікаво, що даний 3D-принтер не вимагає зразка епідермісу хворого, так як для формування шарів тканини вченими були використані так звані «біочорнила» [14]. Даний матеріал потрапляє на шкіру у вигляді смужок, схожих на лейкопластир, але відрізняються від нього в'язкістю через присутність у складі біочорнил альгінової кислоти (альгінат – природний біополімер з бурих водоростей). В основі ж штучної шкіри лежать живі клітини в сукупності з колагеном (структурний білок, що є найбільш поширеним білком ссавців і основним компонентом сполучної тканини) і фібрином (нерозчинний білок, що утворюється у печінці при згортанні крові) [15]. На попередньому етапі 3D-принтер був успішно протестований на тваринах: в ролі піддослідних виступили спочатку щури, а потім свині. Наступним етапом плануються клінічні випробування вже за участю людини.

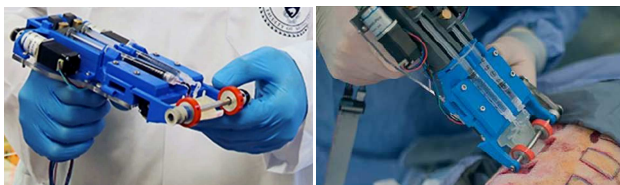


Рис. 5. 3D-принтер для друку пошкодженого шкіряного покриву

Не залишилась без уваги дослідників ще одна частина людського тіла – око. Так, вченими англійського університету Newcastle University [16] у травні 2018 р. вперше вдалось створити рогівку людського ока за допомогою біочорнил та 3D-принтера [17]. Вчені Abigail Isaacson, Stephen Swioklo, Che J. Connon (рис. 6) розробили експериментальну методику, що у недалекому майбутньому дозволить допомогти мільйонам людей, які по декілька років чекають на проведення операції по трансплантації рогівки ока.

Основою нової методики є розробка вченими унікального матеріалу – біогелю – комбінації здорових стовбурових клітин рогівки донора з колагеном і альгінатом [17], який дозволяє зберігати стовбурові клітини живими. При цьому сам матеріал виявляється досить жорстким, щоб зберігати форму, але, при цьому, до-

сить м'яким, щоб його можна було при 3D-друці видавити через сопло 3D-принтера. Тривалість самого процесу друку рогівки ока людини складає всього 6 хвилин, але попередньо проводиться сканування очей пацієнтів задля уточнення необхідних розмірів.

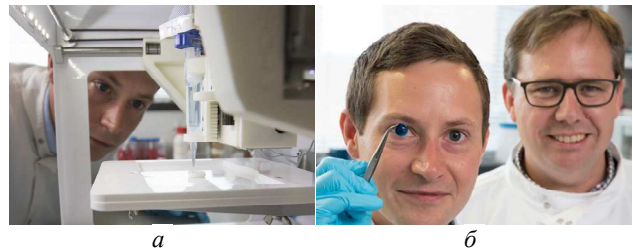


Рис. 6. 3D-друк рогівки ока (а) та двоє з авторів розробленої методики (б) – S. Swioklo (ліворуч) та С. J. Connon (праворуч)

Наступним етапом досліджень є проведення додаткових тестувань, проходження необхідних етапів медичних сертифікацій тощо. Тому поки що пацієнтам доведеться чекати ще кілька років, перш ніж виготовлені на 3D-принтері рогівки будуть офіційно доступні. Але вже сам факт їх створення дає неймовірну надію знову побачити світло хворим з серйозними порушеннями зору.

Як бачимо, медицина – це одна зі сфер людського життя, у якій адитивні технології та 3D-друк знайшли чи не найбільше застосування. І, як свідчать численні публікації, що з'являються у відкритому інформаційному просторі ледве не щодня, темпи наукового та технічного розвитку та втілення нових ідей 3D-друку у медицині будуть тільки зростати.

Ще однією областю людського життя просто таки з шаленим темпом розвитку адитивних технологій є архітектура та будівництво.

Архітектура. У Китаї у січні 2019 р. завершилися роботи над найдовшим і найважчим пластиковим мостом в світі (рис. 7). Проект здійснено будівельною компанією Shanghai Construction Group за підтримки розробника промислових адитивних систем Coin Robotics Technology і виробника витратних матеріалів для 3D-друку Polymaker.

Надрукована на 3D-принтері конструкція довжиною 15.25 м, шириною 3.8 м, висотою 1.2 м та масою 5.8 т встановлена в технопарку Таору Smart City шанхайського району Путо [18]. Міст надрукований відразу одним цілим, без необхідності в подальшому складанні на місці встановлення, на великоформатному FDM 3D-принтері з робочою областю друку розміром 24×4×1.5 м. Вартість оцінюється в 2.8 мільйона доларів. Роботи над мостом почалися в листопаді 2018 р. Безпосередньо на 3D-друк мосту, не рахуючи фінішну постобробку, було витрачено 35 днів. Розрахунковий термін експлуатації мосту – 30 років. Замість бетону в конструкції мосту був використаний інженерний пластик з додаванням скловолокна для посилення конструкції (так званий ASA-пластик – гранулят акрилонітрил-стирол-акрилату з 12.5 % вмістом армуючого скловолокна). Цей пластик близький за характеристиками до відомого ABS пластику, але відрізняється від нього підвищеною стійкістю до ульт-

трафіолетового випромінювання, а тому є більш прийнятним для експлуатації на відкритому повітрі. Конструкція мосту витримує навантаження в 250 кг (тобто еквівалент 3-4 дорослих людей) на 1 м². Застосована технологія дозволяє скоротити терміни будівництва і зменшити до мінімуму відходи матеріалів.



Рис. 7. Найдовший і найважчий надрукований на 3D-принтері пластиковий міст (м. Шанхай, Китай)

Будівництво. Окремим напрямком адитивних технологій є застосування їх у будівництві приватних будинків, або навіть цілих кварталів. Вже існує багато прикладів як start-up проектів так і професійних компаній, що пропонують свої послуги у будівництві власного житла за допомогою 3D-принтеру. Наведемо декілька цікавих прикладів.

І знову дивують представники Піднебесної! Слідом за найдовшим і найважчим пластиковим мостом, про який мова йшла вище, у тому ж м. Шанхай нещодавно «надрукували» і рекордний за довжиною залізобетонний варіант – 26.3 м! Зовнішній вигляд нового мосту, за задумом архітекторів, повинен в загальних рисах повторювати одну з візитівок Китаю – відомий міст Аньци – найстаріший міст довжиною 50.8 м, що був зведений приблизно у 605 році та який зберігся практично у первісному вигляді і по цей день (рис. 8).

Якщо на будівництво стародавнього кам'яного моста пішло одинадцять років, то залізобетонний аналог народився на світ за допомогою 10 робочих за 450 годин. 68 бокових та 64 нижніх окремих блока друкувалися двома 3D-принтерами та були зібрані і встановлені на підготовлену задалегідь сталеву арку. Також в конструкцію моста вбудовані електронні датчики, які слідкують за станом мосту та відстежують навантаження і можливий зсув. Отримані дані будуть використовуватися в наступних проектах, серед яких плануються не тільки мости, а й житлові будинки.

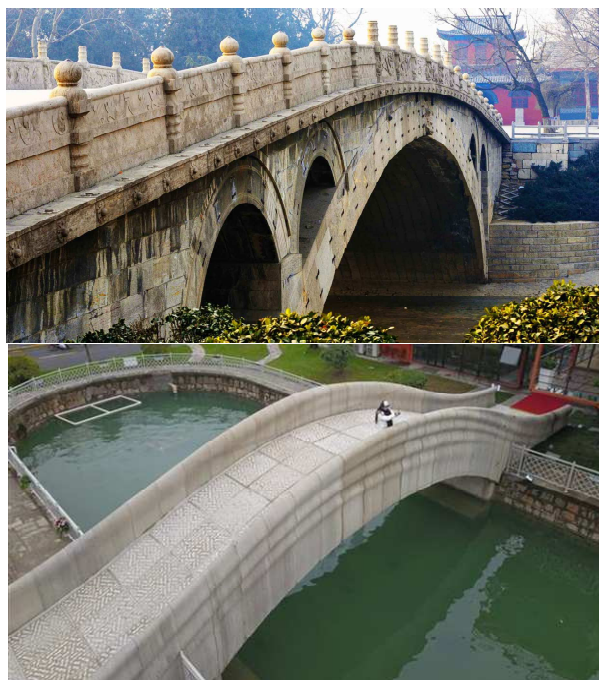


Рис. 8. Найстаріший міст Аньци (зверху) та найдовший бетонний міст, надрукований на 3D-принтері (знизу)

Нідерландська будівельна компанія CyBe Construction [19], що спеціалізується на виробництві та використанні 3D-принтерів, що «друкують» бетоном, на виготовленні для них матеріалів та розробці програмного забезпечення для проектування 3D-бетонних будівель, спільно з найбільшою будівельною компанією на Близькому сході Consolidated Contractors Company (штат співробітників налічує понад 180 тисяч співробітників!) на замовлення Міністерства з питань житлового будівництва (Ministry of Housing) Саудівської Аравії побудувала прототип однокімнатного будинку загальною площею приблизно 80 м² (рис. 9).



Рис. 9. 3D-друкований будинок у Саудівській Аравії

Будинок складається з 48 елементів – 27 стін і 21 парапету, що були надруковані безпосередньо на місці будівництва у м. Ер-Ріяд протягом лише одного тижня. Будинок оснащений усіма необхідними комунікаціями і готовий до заселення, хоча цей конкретний будинок вводиться в експлуатацію не планують – він послужить дослідним зразком для відпрацювання технологій і сертифікації на майбутнє. А плани у місцевої влади грандіозні. Згідно стратегії національного розвитку країни Saudi Vision 2030 та беручи до уваги ріст урбанізації і неодмінний дефіцит доступного житла планується до 2030 року побудувати аж 1.5 мільйона (!!!) недорогих приватних будинків за інноваційними технологіями, такими як 3D-друк з бетону. Вже до 2020 р. планується розселити в індивідуальні житла 60 % населення, а до 2030 р. – 70 %. Будувати

необхідно швидко і дешево, а тому розрахунок робиться як раз на автоматизацію і нові технології, включаючи адитивні.

У якості будівельного 3D-принтеру (3D Concrete printers [19]) використовувався мобільний принтер марки The CyBe RC 3Dr власного виробництва CyBe Construction (рис. 10), а у якості матеріалу – спеціально розроблений цією ж компанією різновид бетону (CyBe Mortar), що адаптований саме до друку на 3D-принтері. Робочий радіус робота-маніпулятора 3D-принтеру, у якості якого використовується маніпулятор виробництва ABB, досягає 2.75 м, при цьому вбудовані домкрати допомагають як стабілізувати платформу під час друку, так і піднімають 3D-принтер для друку конструкцій заввишки до 4.5 м. Мобільність 3D-принтеру полягає у тому, що поки надрукований бетон твердіє, апарат можна швидко пересунути на нове місце і продовжити роботу завдяки гусеничному шасі, хоча прямо на ходу пристрій не друкує, принаймні поки що. Швидкість друку бетонних шарів завтовшки 30 мм складає до 200 мм/с, при цьому для обслуговування апарату досить усього двох операторів.

from 180 000 Euro

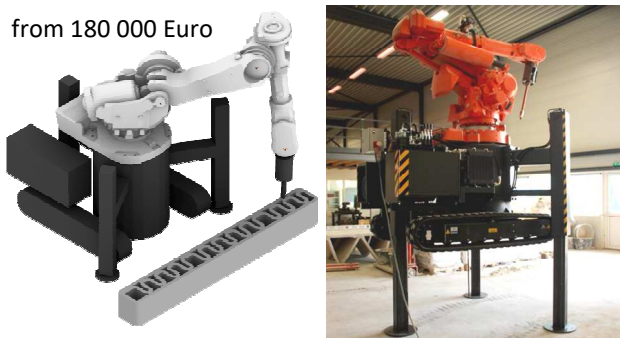


Рис. 10. Бетонний 3D-принтер The CyBe RC 3Dr виробництва CyBe Construction

Деякі слова варто сказати про бетон для 3D-друку марки CyBe Mortar, а точніше – спеціально розроблену швидко висихаючу суміш. Оскільки це не просто бетон в класичному розумінні цього терміну. Як заявляють самі виробники цього диво-матеріалу [20], на відміну від інших марок бетону (наприклад, від відомого Portland Cement), їх матеріал розроблений, як було зазначено раніше, саме до друку на 3D-принтері. З офіційних джерел [21] та проведених компанією ретельних досліджень, результати яких опубліковано у вельми солідних виданнях [22, 23], відомо, що бетон марки CyBe Mortar схоплюється вже за 5 хвилин і досягає своєї структурної міцності за 1 годину. Звичайний бетон, що заливається в опалубку, зазвичай може твердіти протягом декількох днів. Але як бути у випадку застосування бетону для 3D-друку? Адже при цьому опалубка не застосовується! При відсутності «опори» надрукований шар бетону майже відразу повинен приймати на себе вагу наступних шарів бетону, що друкуються поверх нього. Цією проблемою занепокоївся проф. Akke Suiker з Eindhoven University of Technology, який після тривалих досліджень розробив на основі методу скінченних елементів математичну модель [22] для визначення розмірів і швидкості друку, при яких не відбувається зсув та руйнування конструк-

цій друкованих бетонних стінок. Модель враховує швидкість нанесення друкованих шарів, характеристики твердіння матеріалу, розміри стінок, дає можливість розрахувати структуру з якомога меншим об'ємом матеріалу. Розроблена математична модель успішно пройшла експериментальну перевірку [23] на бетонному 3D-принтері рідної Альма-матер.

Саме на основі цих досліджень був розроблений бетон CyBe Mortar, час дегідратації якого становить лише 24 години порівняно з 28 днями для «традиційного» бетону [20]. Тому подальше оздоблення стін будинку може бути розпочато вже через 24 години після друку, що неможливо з іншими типами бетону – штукатурка просто буде відпадати від стін, фарба також не буде триматись, що суттєво обмежує остаточну фазу завершення проекту. 24 години і 28 днів – різниця відчутна, годі й казати! Зовнішній вигляд бетонних стін після 3D-друку наведено на рис. 11, з якого можна добре побачити пошарову структуру. Видимість шарів кимось може бути віднесена до недоліків, але, по-перше, за допомогою додаткової обробки стіну завжди можна зробити гладкою, а, по-друге, у деяких непоодиноких випадках замовники навпаки бажають залишити стіни у первинному так би мовити вигляді і саме показати структуру шарів, як це було, наприклад, у випадках будівель The R&Drone Laboratory в Дубаї та The 3DHousing05 у Мілані.

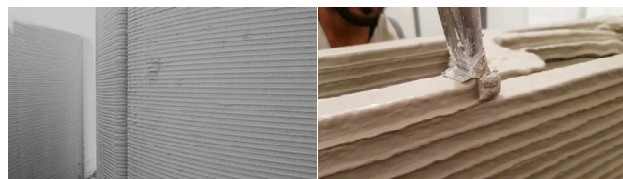


Рис. 11. Пошарова структура бетонних стін, надрукованих на 3D-принтері

WinSun – це назва ще однієї компанії з Китаю (м. Шанхай), що спеціалізується на виготовленні 3D-друкованих житлових будинків. Прискіпливу увагу слід звернути саме на неї, оскільки вони є одними зі світових лідерів у цій будівельній галузі. У квітні 2014 р. представники компанії WinSun зробили заяву, яка багатьма була сприйнята за жарт – було оголошено про успішний 3D-друк 10 будинків протягом 24 годин з повністю утилізованих матеріалів! Але, коли представники компанії виклали фотографії готових об'єктів з коментарями, усім стало не до сміху. Кожен будинок (рис. 12) площею в 200 м² коштував всього 4800 доларів (авт. – для порівняння наприкінці 2010 р. за одну лавку для станції метро «Олексіївська» влада Харкова заплатила 3600 доларів [24]. No comments, як кажуть).

Такі складові будинку як каркас і стіни були надруковані окремо одна від одної на величезному 3D-принтері довжиною 32 м (за іншою інформацією – цілих 150 м!), шириною 10 м і висотою 6.6 м. Фотографувати чудо-принтер суворо заборонено – доступ до нього мають лише близько сотні спеціально навчених співробітників, які пройшли ретельну перевірку на ідейну свідомість.



Рис. 12. Пошарова структура бетонних стін, надрукованих на 3D-принтері

Після того як деталі повністю висохли, вони були транспортовані на місце встановлення в один з районів Шанхаю, де з них зібрали повноцінний будинок. У якості матеріалу були використані спеціально розроблені компанією «чорнила» – утилізований та перероблений будівельний і промисловий бруд, фрагменти знесених будівель, з додаванням піску, цементу, затверджувача та додатково посилені склопластиком. Цей матеріал вийшов доволі міцним, навіть здатен витримувати землетрус (авт. – у скільки балів не коментується) та вітрові навантаження. Надруковані з такого матеріалу будинки є безпечними для навколишнього середовища і дуже економічні з точки зору витрат. На зведення будинків потребувалось набагато менше робочої сили, що і позначилось на невисокій вартості житла.

На початку 2015 р. компанія WinSun пішла ще далі – були надруковані маєток площею 1100 м² та п'ятиповерховий будинок (рис. 13).



Рис. 13. Маєток (зверху) та п'ятиповерховий будинок (знизу), що надруковані на 3D-принтері компанії WinSun

Зрозуміло, що споруди були надруковані з окремих блоків з подальшим збиранням у цільну конструкцію з встановленням металевої арматури, термоізоляції, труб, віконних та дверних рам. Економія будівельних матеріалів склала 60 %, а часу – 70 % у порівнянні з виготовленням подібного будинку традиційними методами. Кількість робітників у будівельній бригаді була зменшена у 5 разів, що також призвело до зменшення як матеріальних витрат так і ризиків отримання виробничих травм.

Компанія WinSun сподівається, що ця технологія дозволить забезпечити недорогим житлом малозабезпечені верстви населення. З метою уявлення масштабів і темпів розвитку, а також актуальності та затребуваності цієї технології на ринку наведемо плани компанії (а вони просто такі фантастичні!):

- у рамках замовлення від уряду Єгипту спорудження 12 міні-фабрик прямо в пустелі для використання місцевого піску для виробництва будівельних матеріалів для зведення відразу 20000 модульних однопверхових будинків;
- співпраця з урядом Іраку задля відновлення зруйнованих в ході бойових дій будівель та будівництва приблизно 10000 будинків на 3D-принтері, а також колодязів і септиків;
- у Саудівській Аравії місцевим будівельним компаніям планується надати в оренду 100 будівельних 3D-принтерів WinSun для будівництва 3D-друкованих будівель загальною площею 30 млн. квадратних метрів для друку доступного житла для відносно бідних верств населення. Вартість контракту оцінюється в 1.5 млрд. доларів. Саме технологія 3D-друку цементними сумішами відмінно поєднується з жарким і сухим кліматом Саудівської Аравії;
- будівництво по всьому Китаю приблизно 100 фабрик, на яких будівельне сміття буде перероблятися в бетонні «чорнила» для 3D-принтерів;
- замовлення на 17 нових будівель від китайських компаній. Також будівництво автобусних зупинок, публічних туалетів, лавок для парків, меблів, різних елементів інтер'єру (стілці, світильники тощо).

Як бачимо, застосування 3D-друку при будівництві житла – це чи не наймасовіша галузь застосування адитивних технологій. Мета проведення такого детального огляду саме будівельного напрямку застосування 3D-друку полягає у перспективності її застосування на теренах України, на відміну, наприклад, від медичного напрямку, який потребує значних фінансових вливань, пов'язаних з необхідністю проведення цілої низки ретельних досліджень, експериментів, тестувань, ліцензувань, сертифікацій тощо. А це порівняно довгий процес, матеріальна вигода від втілення якого у життя може з'явитись у не найближчому майбутньому. Це йде у протиріч з вітчизняним менталітетом – отримання вигоди якнайшвидше. А 3D-друк бетоном, на думку автора статті, має величезні перспективи у нашій країні, оскільки не потребує відносно великих фінансових затрат, а ось час окупності буде недовгим, оскільки попит на нерухомість та індивідуальне недороге житло зростає з кожним днем. Як держава так і усі небайдужі благодійні організації

також не мають стояти осторонь, а повинні зацікавитись сучасними будівельними адитивними технологіями у зв'язку з ситуацією в країні та наявністю великої кількості вимушених переселенців з тимчасово окупованих територій, для яких конче необхідно створення гідних умов проживання.

Ось Вам реальний приклад з життя. Американська некомерційна благодійна організація з Кремнієвої долини New Story протягом 2018 р. інвестувала 9 млн. доларів спочатку в start-up проект, а згодом – у повноцінну будівельну компанію ICON (м. Остін, штат Техас), з метою 3D-друку доступних житлових будинків площею близько 60 м² для малозабезпечених верств населення (або постраждалих від природних катаклізмів) спочатку Латинської Америки (серед першочергових країн значаться Гаїті, Сальвадор, Болівія, Мексика), а згодом – всього світу із залученням інших некомерційних організацій та урядів країн [25]. Вартість одного будинку (рис. 14, зверху), що оснащений усіма мінімальними для життя зручностями (вікна, двері, водопровід, каналізація, сантехніка, електрика) і складається з вітальні, однієї спальної кімнати, невеличкого робочого простору (кабінету), ванної кімнати, оцінюється всього в 4000 доларів (авт. – трохи більше за горезвісну лавку для харківської «підземки»).

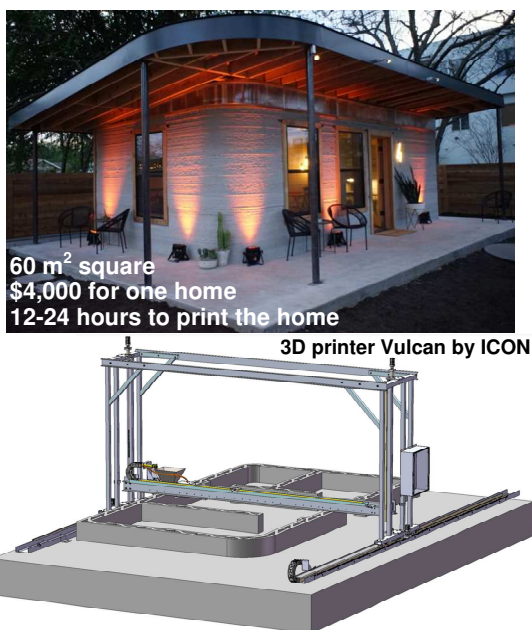


Рис. 14. Прототип 3D-друкованого будинку (зверху) та зовнішній вигляд 3D-принтеру Vulcan (знизу)

Будівництво відбувається за допомоги 3D-принтеру Vulcan розробки компанії ICON (рис. 14, знизу), що представляє собою стаціонарну модульну платформу (на відміну від розглянутого раніше самохідного 3D-принтера The CyBe RC 3Dp), розміщену на рейках. 3D-принтер Vulcan «друкує» будівельною сумішшю, що розроблена саме для нього, об'єкти розміром 6.1 м завширшки, 3.35 м заввишки та необмеженої довжини, оскільки переміщується по рейках та може бути переставлений на нове місце. Вага такого 3D-принтера складає приблизно 900 кг, його можна завантажити в автомобіль та легко перевезти та вста-

новити на будівельному майданчику.

На сайті організації New Story можна ознайомитись з історіями родин, що потребують покращення житлових умов, та залишити добровільний внесок у цю шляхетну справу, при цьому 100 % пожертв буде спрямовано на будівництво, закупівлю матеріалів і найм місцевих працівників для оздоблення будинку.

Ареною для масштабних випробувань 3D-друкованих будинків стане Сальвадор – одна з найбільш густонаселених країн Центральної Америки. В спільні плани New Story і ICON входить будівництво у 2019-2020 рр. цілого поселення для малозабезпечених.

Окрім бетону, у якості будівельного матеріалу для зведення соціальних будинків може використовуватись і більш дешевий продукт. Так, італійська компанія WASP (World's Advanced Saving Project) у жовтні 2018 р. продемонструвала цікаве рішення для будівництва доступного житла з ... землі [26]. Собівартість такого екологічного будинку з доволі симпатичним дизайном площею 30 м² склала всього 900 Євро (рис. 15).



Рис. 15. 3D-друкований екологічно чистий будинок

Інструментом для створення екологічно чистих будинків, що друкуються прямо на місці, став модульний 3D-принтер Crane WASP (рис. 16), а основою будівельного матеріалу – звичайна глина. У відсотковому відношенні екологічні «чорнила» складаються з таких компонентів:

- 25% – ґрунт, взятий прямо на місці будівництва (приблизно 30 % глини, 40 % мулу і 30 % піску);
- 40% – подрібнена рисова солома;
- 25% – рисове лушпиння;
- 10% – гідравлічне вапно.

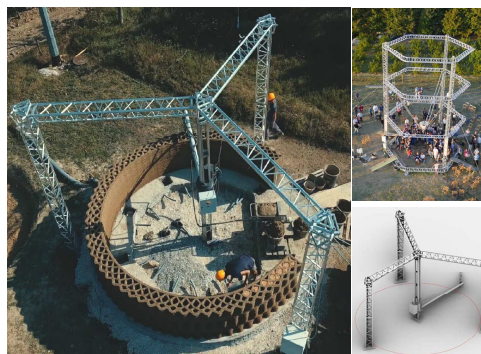
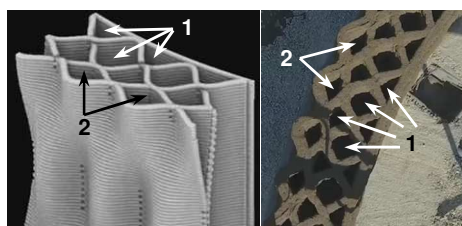


Рис. 16. Модульний 3D-принтер Crane WASP

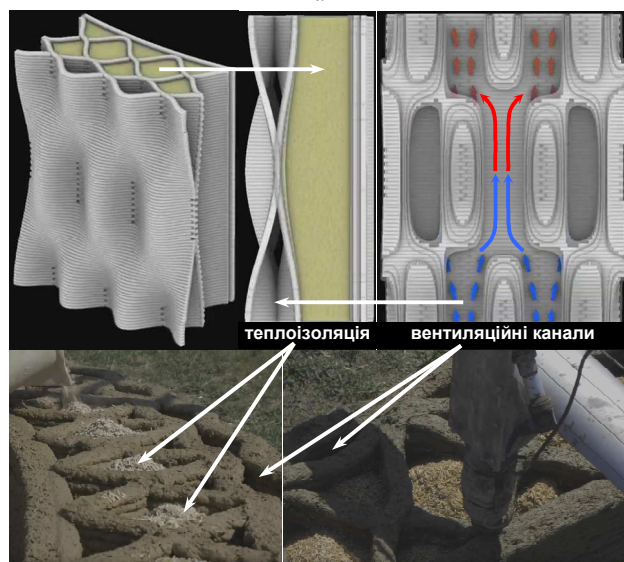
Всі компоненти подрібнюються у однорідну масу і «заправляються» у 3D-принтер.

Розміри друку для одного модуля 3D-принтеру Crane WASP складають 6.6 м у діаметрі і 3 м у висоту та можуть збільшуватись за рахунок добудови нових модулів. Так, наприклад, на зведення стін завтовшки 40 см вказаного будинку площею 30 м² пішло 10 днів.

Доволі оригінальними є форма і конструкція стін екобудинку (рис. 17,а), відтворення яких традиційним будівельним способом є вкрай складним. Поступово, по мірі друку стін, об'єм пор 1 зі сторони внутрішніх стін заповнюється теплоізоляційним шаром – рисовим лушпинням, а пори 2 із зовнішньої сторони будинку залишаються порожніми, створюючи тим самим вентиляційні канали (рис. 17,б), – отже будинок залишається цілковито «дихаючим».



а



б

Рис. 17. Хвилюва пориста структура стін екобудинку

Використання ґрунту, соломи і рисового лушпиння для будівництва будинку обмежує його річну експлуатацію у суворих кліматичних умовах, але в країнах із помірним кліматом, який є характерним для багатьох країн, населення котрих саме і потребує дешевого житла, ця технологія може бути одним з варіантів вирішення проблеми відсутності доступних житлових будинків. Описана технологія 3D-друку і компактний модульний дизайн 3D-принтеру дозволяють перетворити, як заявляють виробники, один 1 га культивованого рисового поля в 100 м² житлової забудови. При цьому, практично всі необхідні для будівництва матеріали вже є безпосередньо під ногами.

На думку автора, описана технологія будівництва може бути застосована навіть і в Україні, не дивля-

чись на її холодні зими. Так, наприклад, її можна використати при зведенні невеличких будиночків відпочинку на узбережжі Чорного та Азовського морів для здачі в оренду відпочивальникам у теплий період року з травня по вересень. Беручи до уваги шалений попит в останні роки на більш-менш комфортне житло для проведення відпустки та зростаючі з кожним роком ціни на оренду житла строк окупності будівництва таких екобудинків не повинен бути дуже довгим.

Приклади з застосування 3D-друку саме у будівництві можна продовжувати доволі довго – не вистачить об'єму журналу! Тому на цьому напрямку зупинимось та далі наведемо ще декілька інших цікавих прикладів застосування адитивних технологій.

3D-друк металевих деталей. Лесть не з самого моменту виникнення адитивних технологій багатьох цікавило перш за все питання можливості друку деталей відразу з металу. Так, на сьогоднішній день, згідно даних міжнародного комітету F42 з адитивних технологій, що базується у ASTM International (American Society for Testing and Materials – американська міжнародна організація, що розробляє і видає стандарти для матеріалів, продуктів, систем та послуг – заснована у 1898 р.), існує 4 адитивні технології з 7-ма різновидами виготовлення металевих деталей на 3D-принтерах [27] (табл. 1). Наведемо короткий опис кожної з технологій.

Технологія **Powder Bed Fusion** передбачає наявність в робочій зоні 3D-принтеру певної поверхні («bed»), на якій спочатку формують шар з металевого порошку (завичай застосовується порошок із розміром часток від 5 мкм і більше) і розрівнюють його за допомогою спеціального ролика та леза, формуючи рівний шар матеріалу певної товщини (від 20 мкм і більше). Далі порошок в сформованому тонкому шарі в необхідних місцях обробляють відповідно до підготовленої вихідної CAD-моделі або лазером великої потужності 400-1000 Вт (у випадку **DMLS** або **SLM** технологій) або електронним променем (у випадку **EBM** технології), скріплюючи частинки порошку або шляхом повної плавки металу (**SLM** і **EBM** технології) або частково спікаючи його (**DMLS** технологія) з остаточною термообробкою у печі. Після завершення побудови поточного шару платформа опускається униз на певну задану величину кроку побудови, і на ній формують новий шар – таким чином процес повторюється до повної побудови моделі.

У технології **Directed Energy Deposition**, на відміну від описаної вище, метал у вигляді або стрижня або того ж металевого порошку подається в конкретне місце, куди одночасно підводиться і енергія від або потужного лазера (у випадку **LENS** технології) або електронного променя (у випадку **EBAM** технології) для повної плавки металу і формування деталі шар за шаром. Процес можна дещо порівняти з роботою зварювальника, що підводить електрод до необхідного місця, в якому за рахунок енергії електричної дуги формується зона розплаву.

Технології PBF і DED є двома найбільш розповсюдженими технологіями, за якими світові виробники виготовляють 3D-принтери для друку металом.

Таблиця 1 – Основні адитивні технології виготовлення металевих деталей

№	Назва технології (англ.)	Назва технології (укр. переклад автора)	№	Різновид технології (англ.)	Назва способу (укр. переклад автора)	Компанії, що випускають 3D-принтери за даною технологією	Вартість 3D-принтерів, тис. дол. [28]
1	Powder Bed Fusion (PBF)	Розплавлення порошкового шару	1	Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	Пряме лазерне спікання металів	EOS (Німеччина) 3D Systems (США)	100-250
			2	Selective Laser Melting (SLM)	Вибіркова лазерна плавка	SLM Solutions (Німеччина) Concept Laser (Німеччина)	
			3	Electron Beam Melting (EBM)	Електронно-променева плавка	Arcam EBM (Швеція)	
2	Directed Energy Deposition (DED)	Осадження спрямованою енергією	4	Laser Engineered Net Shaping (LENS)	Лазерне чисте формування	Optomec (США)	90-250
			5	Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM)	Адитивне виробництво електронним променем	Sciaky (США)	
3	Binder Jetting (BJ)	Нанесення струменем сполучної речовини	6	Binder Jetting (BJ)	Нанесення струменем сполучної речовини	ExOne (США)	250-1000
4	Material Jetting (MJ)	Нанесення струменем матеріалу	7	NanoParticle Jetting (NPJ)	Нанесення струменем наночасток	XJet (Ізраїль)	дані відсутні

Так, за результатами аналізу ринку у 2018 р. можна зазначити, що сумарно на дві описані вище технології прийшлося 70 % (54 % – на PBF і 16 % – на DED) від загальної кількості усіх виготовлених 3D-принтерів для друку металом [28].

Загалом на дві наступні технології **Binder Jetting** та **Material Jetting** припадає 16 % ринку. Їх спільною рисою є відсутність застосування потужних джерел тепла та використання струменевого принципу розбрикування або сполучної речовини – так званого байндера (у випадку **BJ** технології) або ж відразу матеріалу деталі (у випадку **MJ** технології, а саме **NanoParticle Jetting (NPJ)** технології).

У технології **Binder Jetting** на першому етапі на шар порошкового металу в необхідні місця відповідно до CAD-моделі струменем наноситься рідкий байндер (у якості якого може виступати, наприклад, фотополімер), що скріплює частинки металу і формує воксели (тривимірні пікселі) – найменші елементи у тривимірній графіці. Після нанесення байндера платформа опускається на задану величину, і джерело УФ-випромінювання засвічує і затверджує рідкий фотополімер. Далі формується новий тонкий шар металу і на нього знову селективно розбрикується байндер – процес повторюється до повної побудови моделі, що являє собою листову металеву текстуру, скріплену байндером. На другому етапі робочу камеру з побудованою моделлю всередині невикористаного металевого порошку знімають з 3D-принтеру і поміщають в піч для попереднього розігріву і затвердіння. Процес протікає при температурі 200-260 °C протягом 6-10 годин в залежності від розмірів моделі. На третьому етапі вручну за допомогою невеликого пиლოსоса, набору щіток і стисненого повітря збирається невикористаний металевий порошок з робочої камери. Цей порошок повністю придатний для повторного використання. Вільна від порошку модель розміщується для спікання в спеціальній високотемпературній печі при температурі близько 900-1400 °C в залежності від матеріалу, а інколи, для певних матеріалів, застосову-

ється гаряче ізостатичне пресування. Після спікання деталі готові до використання.

Замість порошкового металу у технології **Binder Jetting** може застосовуватись плакований металевий порошок, який попередньо змішується в спеціальному міксері зі сполучною речовиною, яка вкриває тонким шаром частинки порошку – отримуємо металеву частину, вкриту легкоплавким матеріалом. Далі з цих часток у 3D-принтері формується шар, лазер невеликої потужності розплавляє сполучну речовину і «склеює» частинки порошку між собою. Отримана модель має загально прийняту назву – «грін-модель». Потім цю модель очищають від часток порошку, і поміщають в піч із захисним середовищем (зазвичай азотом), де при температурі близько 1000-1100 °C випаровують сполучну речовину і проводять процес інфільтрації – просочення моделі розплавленою бронзою. У печі бронза розплавляється і за рахунок капілярного ефекту проникає в структуру грін-моделі. Таким чином, на виході отримуємо деталь з матеріалу, що представляє собою конгломерат, що складається на 60 % зі сталі і на 40 % – з бронзи. Завдяки використанню бронзи, температура плавлення якої нижче за температуру плавлення металевого порошку, у грін-моделі заповнюються невеликі простори, що збільшує щільність кінцевої деталі.

Остання на сьогоднішній день технологія друку металом – це технологія **Material Jetting**, що у 2016 р. була запатентована ізраїльською компанією XJet під власною назвою **NanoParticle Jetting (NPJ)** [29]. Детальна інформація щодо процесу створення металевих деталей за даною технологією відсутня (як і вартість 3D-принтерів) – є загальний опис у вигляді прес-релізу з невеликими відеоредами. Тому коротко суть технології полягає у наступному. Як зрозуміло з самої назви технології, друк відбувається наночастинками, а, точніше, колоїдним розчином – твердим нанопорошком у рідкій суспензії, що завантажується у спеціальні герметичні картриджі. В окремому картриджі знаходиться легкоплавкий матеріал для друку підтри-

муючих структур, який легко можна видалити при незначній температурі. А далі процес дещо нагадує струменево-крапельний друк на звичайному паперовому принтері. Колоїдний розчин і окремо легкоплавкий матеріал для підтримок подаються у систему, що складається з 24 головок з 512 соплами в кожній, і розбризкуються зі швидкістю 221 крапля в секунду на підготовлену поверхню, утворюючи тонкий шар майбутньої деталі. Після нанесення кожного шару проводиться термічна обробка тепловими лампами з метою видалення рідини з колоїдного розчину і попереднього спікання металевих частинок. Процес повторюється шар за шаром (товщина шару варіюється в межах 10-15 мкм), а по завершенні друку модель промивається і спікається в готовий виріб, при якому підтримуючі структури випаровуються. Технологія NanoParticle Jetting дозволяє друкувати як металеві так і керамічні вироби з високою щільністю і роздільною здатністю та мінімальною остаточною обробкою. Так, щільність металевих виробів після спікання складає 99.9 %, а за своєю структурою деталі практично ідентичні литим.

Описана технологія реалізована компанією XJet у двох 3D-принтерах: Carmel 700 – для друку металевих деталей (рис. 18) з розмірами 500×140×200 мм, та Carmel 1400 – 500×280×200 мм.



Рис. 18. Приклади деталей, що виготовлені за технологією NanoParticle Jetting

Аддитивні технології створення деталей з металів реалізуються як через доволі коштовне (табл. 1) промислове устаткування для застосування в галузях важкого машинобудування, транспорту, медицини, ювелірної промисловості тощо, так і через невеликі настільні моделі 3D-принтерів, але які, на превеликий жаль, на сьогоднішній день також є дуже дорогими. Так, американська компанія Additec презентувала настільний 3D-принтер μ Printer, що має можливість друкувати як металевими порошками, так і звичайним зварювальним дротом (рис. 19,а) [30].

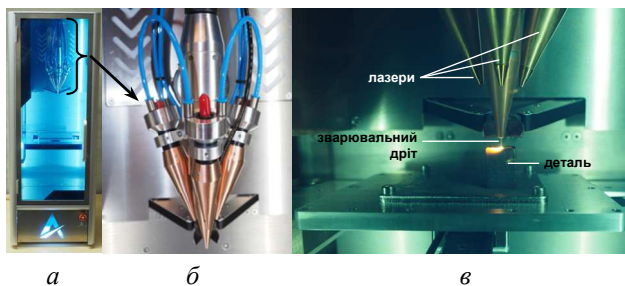


Рис. 19. Настільний 3D-принтер Additec μ Printer

Технологія передбачає одночасне застосування трьох лазерів (рис. 19,б) сумарною потужністю 600 Вт (є можливість додатково встановити ще два лазери і довести сумарну потужність до 1 кВт), що фокусується та розплавляють стандартний зварювальний дріт діаметром 0.6-1 мм (рис. 19,в). Процес відбувається в захисному середовищі інертного газу, у якості якого застосовується аргон, тому процес дещо нагадує зварювання за технологією MIG (Metal Inert Gas Welding). Розмір області побудови металевих моделей є не досить великим – 160×120×450 мм (габаритні розміри 3D-принтеру 390×390×1100 мм, вага в залежності від комплектації складає 75-100 кг), на відміну від загальної вартості – 90000 доларів.

Є надія, що подальший розвиток цього напрямку адитивних технологій спонукатиме к виникненню конкуренції на ринку, що сприятиме зниженню вартості і збільшенню доступності 3D-принтерів для створення металевих деталей.

Наприкінці статті хотілося б навести дані щодо прогнозу розвитку адитивних технологій у світі. Так, згідно даних дослідницької та консалтингової компанії International Data Corporation (IDC) обсяг загальносвітових витрат на адитивні технології (виробництво апаратного забезпечення, витратних матеріалів, програмного забезпечення, профільні послуги тощо) в 2019 р. складе 13.8 млрд. доларів, а середньорічні темпи приросту складатимуть близько 20 % [31]. За оцінкою аналітиків IDC до 2022 р. обсяг ринку оцінюється вже в 22.7 млрд. доларів при середньому річному прирості протягом п'ятирічного періоду на рівні 19.1 %. Біля 67 % від загальних витрат припадатиме на обладнання та витратні матеріали – 5.3 і 4.2 млрд. доларів відповідно, а ринок послуг посяде третє місце – 3.8 млрд. Найбільшим попитом будуть користуватися послуги з 3D-друку деталей на замовлення і системної інтеграції.

Провідною галуззю в плані застосування адитивних технологій буде виробництво, чия частка буде становити більше половини від загальних витрат. Друге місце займатимуть медицина та охорона здоров'я з прогнозованим обсягом замовлень на рівні 1.8 млрд. доларів, третє – освіта (1.2 млрд.), четверте – ринок професійних послуг (898 млн.). Найбільш швидке зростання попиту покажуть медицина та охорона здоров'я (29.8 %) і транспортна галузь (28.3 %).

Найбільш затребуваними будуть прототипи, запасні частини і компоненти нових товарів. У виробництві на ці 3 категорії доведеться близько 43 % від загального обсягу замовлень. Четверте і п'яте місця займуть товари для медичного сектора – стоматологічні вироби та медичні засоби. Найвище зростання попиту буде спостерігатися в секторі біодруківаних матеріалів (тканини, кістки, органи) і стоматології – 42.9 % і 33.1 % відповідно.

Провідним регіоном в плані попиту залишатиметься США, де на адитивні технології буде витрачено майже 5 млрд. доларів. Друге місце займають Західна Європа (3.6 млрд.), третє – Китай (майже 2 млрд.). З іншого боку, найкращі темпи зростання протягом п'ятирічного періоду покажуть Латинська Америка (25.3 % в рік) і знову Китай (21.6 % в рік).

Висновки. За останні роки в світі спостерігається надзвичайно широке впровадження адитивних технологій у численні сфери людського життя. Технології 3D-друку вже перейшли етап зародження і знаходять застосування не тільки у промисловому секторі, але і в інших галузях. Багатьма спеціалістами 3D-друк вважається простим і ефективним рішенням для спрощення технологічних процесів при виготовленні комплектуючих деталей, що використовуються в самих різних сферах діяльності. Універсальність сучасних 3D-принтерів дозволяє за їх допомогою зводити будинки, створювати компоненти для машин і механізмів, що за своїми характеристиками переважають деталі, що вироблені традиційними методами машинобудування. Не менш затребуваними адитивні технології є і в медицині – пройде ще небагато часу і все частіше з'являтимуться люди з «надрукованими» органами. Тому дуже важливим завданням для вітчизняної промисловості, а також для науки і освіти є недопущення відставання від надзвичайно швидкого розвитку адитивних технологій у світі. Саме тому було вирішено ввести в навчальний процес кафедри «Електричні апарати» НТУ «ХПІ» дисципліну «Модельовання та друк тривимірних об'єктів на 3D-принтері» з метою як теоретичної підготовки і ознайомлення студентів з основними засадами технології 3D-друку, так і отримання ними практичних навичок з роботи і обслуговування 3D-принтерів. Але, звичайно, неможливо навчитись чому-небудь лише за лекціями, за слайдами, за плакатами – потрібна матеріальна база для проведення практичних занять. Тому перед кафедрою гостро постало питання придбання хоча б одного, на перший час, 3D-принтеру для початку процесу підготовки студентів. Але вартість 3D-принтерів з більш-менш непоганими технічними характеристиками, навіть у середньому бюджетному класі, залишається доволі високою, як для ВНЗ, не кажучи вже про можливості однієї кафедри.

Але завдячуючи отриманню кафедрою гранту німецького фонду Олександра фон Гумбольдта на придбання обладнання для наукових досліджень у розмірі 20 тис. євро [32] з'явилась можливість придбання сучасного 3D-принтеру Flashforge Creator Pro, завдяки чому студенти мають можливість бути в тренді сучасних затребуваних технологій та отримувати якісну підготовку, що, безперечно, сприятиме їх подальшому успішному працевлаштуванню.

Список літератури

1. Kielan Kielan P. System of 3D printers cooperating via the Internet – studying the impact of network delays on the operation of the system // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2018. – vol.1. – no.12. – pp. 196-199. doi: **10.15199/48.2018.12.43**.
2. Cichoń K. Zastosowanie drukarek 3D w przemyśle // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2017. – vol.1. – no.3. – pp. 158-160. doi: **10.15199/48.2017.03.36**.
3. Zhang F., Tuck C., Hague R., He Y., Saleh E., Li Y., Sturgess C., Wildman R. Inkjet printing of polyimide insulators for the 3D printing of dielectric materials for microelectronic applications // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2016. – vol.133. – no.18. – p. 43361. doi: **10.1002/app.43361**.
4. Zenou M., Kotler Z. Printing of metallic 3D micro-objects by laser induced forward transfer // *Optics Express*. – 2016. – vol.24. – no.2. – p. 1431-1446. doi: **10.1364/oe.24.001431**.

5. Dudek P. FDM 3D Printing Technology in Manufacturing Composite Elements // *Archives of Metallurgy and Materials*. – 2013. – vol.58. – no.4. – pp. 1415-1418. doi: **10.2478/amm-2013-0186**.
6. Гречко А.М. Технологии быстрого прототипирования – от детской игрушки до мирового господства // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2013. – №65(1038). – С. 14-36.
7. Електронний ресурс: <https://3dua.com.ua/page/3d-pechat-protezo-v-dlya-zhertv-voyny>.
8. Електронний ресурс: <https://openbionics.com/bionic-heroes>.
9. Електронний ресурс: <http://3dprintingindustry.com/news/3d-printed-rib-implant-saves-a-life-at-tokuda-hospital-bulgaria-146000>.
10. Електронний ресурс: <https://3dgence.com/en/3d-printed-rib-implanted-in-the-human-body>.
11. Yang F., Tadepalli V., Wiley B.J. 3D Printing of a Double Network Hydrogel with a Compression Strength and Elastic Modulus Greater than those of Cartilage // *ACS Biomaterials Science & Engineering*. – 2017. – vol.3. – no.5. – pp. 863-869. doi: **10.1021/acsbomaterials.7b00094**.
12. Електронний ресурс: <https://today.duke.edu/2017/04/3-d-printable-implants-may-ease-damaged-knees>.
13. Електронний ресурс: <https://www.utoronto.ca/news/u-t-researchers-develop-portable-3d-skin-printer-repair-deep-wounds>.
14. Gungor-Ozkerim P.S., Inci I., Zhang Y.S., Khademhosseini A., Dokmeci M.R. Bioinks for 3D bioprinting: an overview // *Biomaterials Science*. – 2018. – vol.6. – no.5. – pp. 915-946. doi: **10.1039/c7bm00765e**.
15. Електронний ресурс: <https://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/materials-science/3d-bioprinting-bioinks.html>.
16. Електронний ресурс: <https://www.ncl.ac.uk/press/articles/latest/2018/05/first3dprintingofcorneas>.
17. Isaacson A., Swioklo S., Connon C.J. 3D bioprinting of a corneal stroma equivalent // *Experimental Eye Research*. – 2018. – vol.173. – pp. 188-193. doi: **10.1016/j.exer.2018.05.010**.
18. Електронний ресурс: <https://www.3dprintingmedia.network/3d-printed-footbridge-shanghai>.
19. Електронний ресурс: <https://cybe.eu/3d-concrete-printers>.
20. Електронний ресурс: <https://cybe.eu/cybemortar>.
21. Електронний ресурс: <https://www.tue.nl/en/news/news-overview/14-02-2018-suikers-equations-prevent-3d-printed-walls-from-collapsing-or-falling-over>.
22. Suiker A.S.J. Mechanical performance of wall structures in 3D printing processes: Theory, design tools and experiments // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2018. – vol.137. – pp. 145-170. doi: **10.1016/j.ijmecsci.2018.01.010**.
23. Wolfs R.J.M., Bos F.P., Salet T.A.M. Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing // *Cement and Concrete Research*. – 2018. – vol.106. – pp. 103-116. doi: **10.1016/j.cemconres.2018.02.001**.
24. Електронний ресурс: <https://www.pravda.com.ua/rus/news/2010/12/27/5720185>.
25. Електронний ресурс: <https://www.iconbuild.com/new-story>.
26. Електронний ресурс: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printer-house-crane-wasp>.
27. Електронний ресурс: <https://www.astm.org/COMMITTEE/F42.htm>.
28. Електронний ресурс: <https://www.aniwaa.com/best-of/3d-printers/best-metal-3d-printer>.
29. Електронний ресурс: <https://xjet3d.com/technology>.
30. Електронний ресурс: <https://www.additec.net/%CE%BCprinter>.
31. Електронний ресурс: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/the-prognosis-of-3d-the-global-spending-on-additive-technology-in-the>.
32. Електронний ресурс: <http://www.kpi.kharkov.ua/ukt/2016/10/24/vcheni-hpi-vigranal-grant-nimetskogo-fondu>.

References (transliterated)

1. Kielan Kielan P. System of 3D printers cooperating via the Internet – studying the impact of network delays on the operation of the system. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2018, vol.1, no.12, pp. 196-199. doi: **10.15199/48.2018.12.43**.
2. Cichoń K. Zastosowanie drukarek 3D w przemyśle. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2017, vol.1, no.3, pp. 158-160. doi: **10.15199/48.2017.03.36**.

3. Zhang F., Tuck C., Hague R., He Y., Saleh E., Li Y., Sturgess C., Wildman R. Inkjet printing of polyimide insulators for the 3D printing of dielectric materials for microelectronic applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 2016, vol.133, no.18, p. 43361. doi: **10.1002/app.43361**.
4. Zenou M., Kotler Z. Printing of metallic 3D micro-objects by laser induced forward transfer. *Optics Express*, 2016, vol.24, no.2, p. 1431-1446. doi: **10.1364/oe.24.001431**.
5. Dudek P. FDM 3D Printing Technology in Manufacturing Composite Elements. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2013, vol.58, no.4, pp. 1415-1418. doi: **10.2478/amm-2013-0186**.
6. Grechko A.M. Rapid prototyping technologies – from children's toy to world domination. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*, 2013, iss.65, pp.14-36.
7. <https://3dua.com.ua/page/3d-pechat-protezo-v-dlya-zhertv-vojnny>.
8. <https://openbionics.com/bionic-heroes>.
9. <http://3dprintingindustry.com/news/3d-printed-rib-implant-saves-a-life-at-tokuda-hospital-bulgaria-146000>.
10. <https://3dgence.com/en/3d-printed-rib-implanted-in-the-human-body>.
11. Yang F., Tadepalli V., Wiley B.J. 3D Printing of a Double Network Hydrogel with a Compression Strength and Elastic Modulus Greater than those of Cartilage. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 2017, vol.3, no.5, pp. 863-869. doi: **10.1021/acsbomaterials.7b00094**.
12. <https://today.duke.edu/2017/04/3-d-printable-implants-may-ease-damaged-knees>.
13. <https://www.utoronto.ca/news/u-t-researchers-develop-portable-3d-skin-printer-repair-deep-wounds>.
14. Gungor-Ozkerim P.S., Inci I., Zhang Y.S., Khademhosseini A., Dokmeci M.R. Bioinks for 3D bioprinting: an overview. *Biomaterials Science*, 2018, vol.6, no.5, pp. 915-946. doi: **10.1039/c7bm00765e**.
15. [https://www.sigmaldrich.com/technical-](https://www.sigmaldrich.com/technical-documents/articles/materials-science/3d-bioprinting-bioinks.html)
16. <https://www.ncl.ac.uk/press/articles/latest/2018/05/first3dprintingofcorneas>.
17. Isaacson A., Swioklo S., Connon C.J. 3D bioprinting of a corneal stroma equivalent. *Experimental Eye Research*, 2018, vol.173, pp. 188-193. doi: **10.1016/j.exer.2018.05.010**.
18. <https://www.3dprintingmedia.network/3d-printed-footbridge-shanghai>.
19. <https://cybe.eu/3d-concrete-printers>.
20. <https://cybe.eu/cybemortar>.
21. <https://www.tue.nl/en/news/news-overview/14-02-2018-suikers-equations-prevent-3d-printed-walls-from-collapsing-or-falling-over>.
22. Suiker A.S.J. Mechanical performance of wall structures in 3D printing processes: Theory, design tools and experiments. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, vol.137, pp. 145-170. doi: **10.1016/j.ijmecs.2018.01.010**.
23. Wolfs R.J.M., Bos F.P., Salet T.A.M. Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing. *Cement and Concrete Research*, 2018, vol.106, pp. 103-116. doi: **10.1016/j.cemconres.2018.02.001**.
24. <https://www.pravda.com.ua/rus/news/2010/12/27/5720185>.
25. <https://www.iconbuild.com/new-story>.
26. <https://www.3dwaspp.com/en/3d-printer-house-crane-wasp>.
27. <https://www.astm.org/COMMITTEE/F42.htm>.
28. <https://www.aniwaa.com/best-of-3d-printers/best-metal-3d-printer>.
29. <https://xjet3d.com/technology>.
30. <https://www.additec.net/%CE%BCprinter>.
31. <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/the-prognosis-of-idc-the-global-spending-on-additive-technology-in-the>.
32. <http://www.kpi.kharkov.ua/ukr/2016/10/24/vcheni-hpi-vigrali-grant-nimetskogo-fondu>.

Надійшла (received) 20.01.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the authors

Гречко Олександр Михайлович (Гречко Александр Михайлович, Grechko Aleksandr Muhaylovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7872-8585>; e-mail: a.m.grechko@gmail.com.

Б.В. КЛИМЕНКО, О.О. ЧЕПЕЛЮК, М.Г. ПАНТЕЛЯТ

СУЧАСНА ЛАБОРАТОРІЯ – СУЧАСНА ОСВІТА: ДОКОРИННЕ ПЕРЕОБЛАДНАННЯ НАВЧАЛЬНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ КАФЕДРИ «ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ» НТУ «ХПІ»

Відзначена нагальна необхідність докорінної модернізації навчальних лабораторій електротехнічних кафедр вищих навчальних закладів України з метою підвищення якості навчального процесу до рівня, що відповідає сучасним світовим вимогам. Окреслено основні шляхи розв'язання вказаного завдання – це залучення грантів від європейських фондів, які сприяють розвитку освіти та досліджень, а також спонсорська допомога виробничих і комерційних підприємств України. На досвіді кафедри «Електричні апарати» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» проілюстровано можливості та шляхи отримання підтримки за вказаними напрямками. Детально описано умови, процедура та етапи отримання у 2016 р. гранту Фонду Александра фон Гумбольдта (Німеччина) на суму 20 тисяч Євро для придбання обладнання для кафедри. Наведено частковий перелік основного обладнання, придбаного за рахунок коштів гранту (сучасні електричні апарати виробництва провідних європейських компаній, сучасна вимірвальна техніка, один з перших в НТУ «ХПІ» 3D принтер, а також сучасна комп'ютерна, мікропроцесорна та мультимедійна техніка). наведено також частковий перелік обладнання та апаратури отриманих у вигляді інформація супроводжується відповідним ілюстративним матеріалом. Більш детальний опис деяких розроблених і впроваджених у навчальний процес лабораторних робіт наведено у наступних статтях цього збірника наукових праць. З метою подальшого підвищення якості навчального процесу до світового рівня, колективом кафедри готуються заявки на фінансову підтримку за іншими програмами міжнародного співробітництва, а також продовжується плідна співпраця з низкою українських електротехнічних компаній.

Ключові слова: ВНЗ України, навчальний процес, навчальна лабораторія, докорінне переобладнання, грант, спонсорська допомога, лабораторна робота, мобільний стенд.

Б.В. КЛИМЕНКО, А.А. ЧЕПЕЛЮК, М.Г. ПАНТЕЛЯТ

СОВРЕМЕННАЯ ЛАБОРАТОРИЯ – СОВРЕМЕННОЕ ОБРАЗОВАНИЕ: КОРЕННОЕ ПЕРЕОБОРУДОВАНИЕ УЧЕБНОЙ ЛАБОРАТОРИИ КАФЕДРЫ «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ» НТУ «ХПИ»

Отмечена настоятельная необходимость коренной модернизации учебных лабораторий электротехнических кафедр высших учебных заведений Украины с целью повышения качества учебного процесса до уровня, отвечающего современным мировым требованиям. Определены основные пути решения указанной задачи – это привлечение грантов от европейских фондов, которые способствуют развитию образования и исследований, а также спонсорская помощь производственных и коммерческих предприятий Украины. На опыте кафедры «Электрические аппараты» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» проиллюстрированы возможности и пути получения поддержки по указанным направлениям. Подробно описаны условия, процедура и этапы получения в 2016 г. гранта Фонда Александра фон Гумбольдта (Германия) на сумму 20 000 Евро для приобретения оборудования для кафедры. Приведен частичный перечень основного оборудования, приобретенного за счет средств гранта (современные электрические аппараты производства ведущих европейских компаний, современная измерительная техника, один из первых в НТУ «ХПИ» 3D принтер, а также современная компьютерная, микропроцессорная и мультимедийная техника). Описано сотрудничество с рядом электротехнических компаний Украины, которые оказали спонсорскую помощь кафедре, приведен также перечень полученного оборудования и аппаратуры. Подробно представлена предложенная и уже в значительной мере реализованная концепция переоборудования учебной лаборатории кафедры с применением мобильных лабораторных стендов, в процесс разработки и изготовления которых непосредственно привлекались студенты во время выполнения ими дипломных работ бакалавра и магистра. В настоящее время разработано около 15 новых лабораторных работ, этот процесс продолжается дальше. Вся приведенная в статье информация сопровождается соответствующим иллюстративным материалом. Более детальное описание некоторых разработанных и внедренных в учебный процесс лабораторных работ приведены в следующих статьях этого сборника научных трудов. С целью дальнейшего повышения качества учебного процесса до мирового уровня, коллективом кафедры готовятся заявки на финансовую поддержку по другим программам международного сотрудничества, а также продолжается плодотворное сотрудничество с рядом украинских электротехнических компаний.

Ключевые слова: ВУЗы Украины, учебный процесс, учебная лаборатория, коренное переоборудование, грант, спонсорская помощь, лабораторная работа, мобильный стенд.

B.V. KLYMENKO, O.O. CHEPELIUK, M.G. PANTELIIAT

MODERN LABORATORY – MODERN EDUCATION: RADICAL RE-EQUIPMENT OF THE EDUCATIONAL LABORATORY OF THE "ELECTRICAL APPARATUS" DEPARTMENT OF THE NTU "KhPI"

The urgent need for radical modernization of the educational laboratories of the electrical engineering Departments of higher educational institutions of Ukraine is noted with the purpose of improving the quality of the educational process to a level that meets the modern world requirements. The main ways of solving this task are outlined: to obtain grants from European funds that promote the development of education and research, as well as sponsorship of production and commercial enterprises of Ukraine. The experience of the Department of Electrical Apparatus of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" illustrates the opportunities and ways of receiving support in the specified directions. Details of the conditions, procedure and phases of obtaining in 2016 the grant of the Alexander von Humboldt Foundation (Germany) for the amount of 20,000 Euro for the purchase of equipment for the Department are described. A partial list of the main equipment purchased at the expense of the grant (modern electrical apparatus produced by the leading European companies, modern measuring equipment, one of the first 3D printer at the NTU "KhPI", as well as modern computer, microprocessor and multimedia equipment) is provided. Also a partial list of equipment and apparatus received in the form of sponsorship aids from a number of electrical engineering companies of Ukraine, with which the Department cooperates is presented. The proposed and already largely implemented concept of re-equipment of the educational laboratory of the Department with the use of mobile laboratory stands, in the process of development and production of which students were directly involved in the execution of their

© Б.В. Клименко, О.О. Чепелюк, М.Г. Пантелят, 2019

Bachelor and Master Diploma Theses is presented in detail. Over 15 new laboratory works have been developed, and this process will continue in the future. All the information in the paper is accompanied by the relevant illustrative material. A more detailed description of some of the developed and implemented in the educational process laboratory work is presented in the following papers of this collection of scientific works. In order to further improve the quality of the educational process to the world level, the staff of the Department is preparing applications for financial support for other international cooperation programs, as well as fruitful cooperation with a number of Ukrainian electrical engineering companies continues.

Key words: Higher education institutions of Ukraine, educational process, educational laboratory, radical re-equipment, grant, sponsorship, laboratory work, mobile stand.

Вступ. Моральна та фізична застарілість основного обладнання та вимірювальної техніки, непривабливий інтер'єр й потенційні порушення вимог електробезпеки – це загальна біда навчальних лабораторій переважної більшості електротехнічних кафедр вищих навчальних закладів (ВНЗ) України. Відсутність навчальних лабораторій, що відповідають сучасним світовим вимогам, робить проблематичним забезпечення високої якості вищої освіти. Подолати такий стан речей, навіть за умови повного усвідомлення цього факту керівництвом кафедр, факультетів, інститутів та університетів заважає потужне гальмо – катастрофічний брак коштів. Наша кафедра не була винятком і, хоча окремі роботи оновлювалися, застаріла апаратура ще панувала у лабораторії (рис. 1).



Рис. 1. Лабораторний стіл з двома стаціонарними стендами, розробленими у 70-і роки минулого століття (вгорі) та на початку 2000-х років (унизу) із застарілими й ненадійними комутаційними, захисними та сигнальними апаратами

Як і багато інших споріднених кафедр, наша кафедра шукала вихід із ситуації, що склалася, у співпраці, а, краще кажучи, у пошуку можливостей спонсорської допомоги від електротехнічних компаній, що діють в Україні. Але фінансові можливості окремих компаній не дозволяли розв'язати усі проблеми, що накопичувалися впродовж багатьох років занепаду. Значно більший ефект можна отримати за рахунок залучення грантів від європейських фондів, які сприяють розвитку освіти та досліджень. Така можливість стала цілком реальною з квітня 2014 р. після підписання політичної частини Угоди про асоціацію між Україною та Європейським Союзом, завдяки чому Україна отримала доступ до європейських фондів. Наша кафедра спромоглася [1] отримати грант одного з таких фондів, що у сукупності зі співпрацею з низкою виробничих та комерційних підприємств України дозволило нам розпочати

роботу з докорінного переобладнання навчальної лабораторії та отримати певні позитивні результати.

Метою даної роботи є: 1) ознайомлення читачів з набутим досвідом боротьби за отримання гранту, а також, що є найголовнішим, з досвідом реалізації коштів гранту при переобладнанні навчальної лабораторії, 2) інформування про досвід плідної співпраці з низкою електротехнічних компаній України, які люб'язно надали спонсорську допомогу кафедрі; 3) ознайомлення з запропованою та вже значною мірою реалізованою концепцією докорінної модернізації навчальної лабораторії та створення нових лабораторних робіт.

Етапи "боротьби" за грант. У травні 2014 р. ми отримали інформацію про відкриття програми надання грантів від німецького фонду імені Александра фон Гумбольдта (Alexander von Humboldt Stiftung, AvH [2]) для придбання обладнання на суму 20,000 €. Цей грант міг бути наданий лише установам або їхнім підрозділам, де працюють колишні стипендіати AvH. Один з авторів цієї статті (М.Г. Пантелят) був у минулому стипендіатом цього фонду, тому ми відповідали цій необхідній умові. Слід зазначити, що необхідність умови не дорівнює її достатності, особливо у тих випадках, коли мова йде про фінансову допомогу. Фонд AvH для надання гранту вимагає докладного обґрунтування необхідності отримання допомоги для проведення досліджень та для використання у навчальному процесі. Тому для підготовки заявки ми створили робочу групу (рис. 2) з авторів цієї статті, до якої згодом залучилися доценти Є.І. Байда та О.М. Гречко, й розпочали листування з Фондом щодо обґрунтування необхідності отримання нами цього гранту.

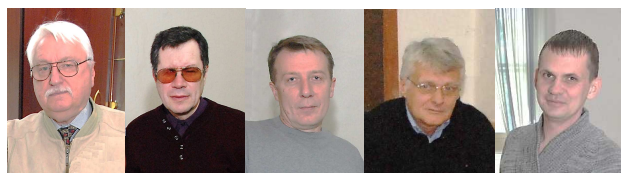


Рис. 2. Члени робочої групи з підготовки заявки на грант, яка згодом перетворилася у робочу групу з реалізації гранту, зліва направо: Б.В. Клименко, М.Г. Пантелят, О.О. Чепелюк, Є.І. Байда, О.М. Гречко

Робоча група підготувала попередній перелік обладнання, яке ми хотіли придбати. Фонд підтвердив готовність розглянути нашу заявку, але тільки після стабілізації ситуації в Україні, яка у той час була вкрай напруженою. І лише у грудні 2014 р. з Фонду надійшло повідомлення про те, що він готовий прийняти заявку до розгляду, після чого було розпочато підготовку заявки та її обґрунтування.

Програма надання гранту від фонду AvH на придбання обладнання передбачає офіційну підтримку від декількох німецьких професорів (чим більше кількість листів підтримки, тим вище шанси на отримання позитивного рішення фонду). Тому, паралельно з підготовкою заявки та її обґрунтування, ми розпочали інтенсив-

не листування з провідними німецькими професорами у галузі електротехніки і вже у березні 2015 р. отримали підтримку нашої заявки від чотирьох відомих у Німеччині професорів: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Kay Hameyer (Institut für Elektrische Maschinen Lehrstuhl für Elektromagnetische Energiewandlung, RWTH Aachen Universität); Prof. Dr. rer. nat. Markus Clemens (Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik Bergische Universität Wuppertal); Prof. Dr.-Ing. Bernard Nacke (Institut für Elektroprozess-technik Leibniz Universität Hannover); Prof. Dr. techn. Wolfgang M. Rucker (Institut für Theorie der Elektrotechnik Universität Stuttgart).

У вересні 2015 р. було підписано лист щойно обраного ректора НТУ «ХП» Є.І. Сокола до Фонду, а 13 жовтня 2015 р. на розгляд Фонду була подана онлайн заявка разом із обґрунтуванням, які ретельно вивчалися рецензентами Фонду. Рецензенти висловили думку, що обґрунтування та план досліджень недостатньо докладні, й 14 січня 2016 р. Фонд надіслав нам вимогу представити більш докладне обґрунтування та більш докладний план досліджень. Нарешті, 27 лютого 2016 р. докладні, на наш погляд, обґрунтування і план досліджень (разом 23 стор. формату А4) були відправлені до Фонду електронною поштою. Ці документи знов ретельно вивчалися рецензентами Фонду, які ніяк не наважувалися дати остаточне рішення щодо нашої заявки. Натомість 25 квітня 2016 року ми отримали виклик нашого представника М.Г. Пантелія до рецензента Фонду у Німеччину на 5 та 6 травня 2016 р. Ми підготували декілька презентацій стосовно виконаних нами досліджень, а також щодо того, що маємо намір досліджувати у майбутньому, й відрядили Михайла Гаррійовича до Німеччини. А далі події розвивалися з блискавичною швидкістю: два дні впродовж 5 - 6 годин відбувалися детальні співбесіди з рецензентом, результати яких його повністю задовольнили. Він повідомив, що виставляє нам найвищі оцінки наданого нами Обґрунтування та плану досліджень і наприкінці зустрічі, приблизно о 17 годині 6 травня відправив онлайн рецензію до Фонду. Вже наступного дня, 7 травня 2016 р. ми отримали остаточне позитивне рішення від Фонду AvH та Міністерства закордонних справ ФРН, яке фінансує Фонд (от так темпи!). Згодом ми отримали у звичайному конверті й трохи прим'ятий Сертифікат «з мокрою печаткою» (рис. 3).

Придбання обладнання розпочалося 3 червня 2016 р., коли ми відправили електронною поштою до Фонду копію першого інвойсу, а останню оплату від Фонду отримали наприкінці грудня 2016 р. Складність закупівель на цьому етапі полягала в тому, що у відповідь на кожний інвойс Фонд перераховує лише половину суми, а іншу половину – після отримання Фондом товарної накладної. Тому треба було налагоджувати контакти з постачальниками й умовляти їх ризикувати й поставити товар повністю після оплати першої половини вартості товару, й чекати два-три тижні аж поки ми не отримаємо кошти від Фонду й перерахуємо їх постачальнику. Існував також інший варіант – ризикувати самим й підписувати товарну накладну, сплативши половину суми й не отримавши товару. Слід сказати, що при закупівлях обладнання ми застосовували обидва варіанти, але жодного разу між нами як покупцями та постачальниками не виникало жодних непорозумінь.

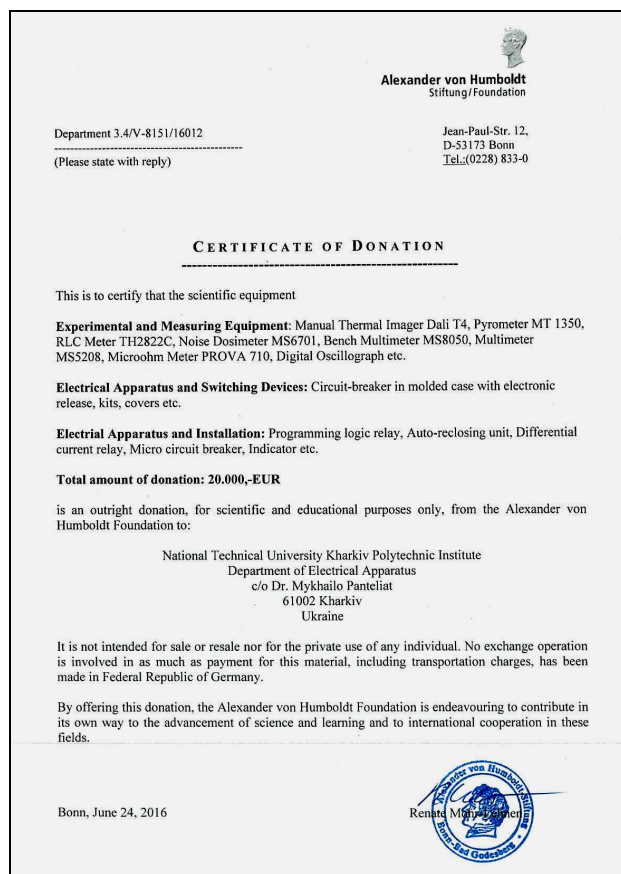


Рис. 3. Сертифікат гранту AvH, отриманий нами

На отримані кошти було придбано (рис. 4):

1. Численні зразки сучасних електричних апаратів (електромеханічних та напівпровідникових апаратів комутації, керування й захисту виробництва провідних європейських компаній, таких як ABB, Legrand тощо)
 2. Зразки сучасної виміральної техніки (дво- та чотирипроменеві цифрові осцилографи, тепловізор, пірометр, шумометр, флюксометр, цифрові термометри, численні мультиметри тощо)
 3. Зразки інноваційного технологічного обладнання та побутової техніки (один із перших в НТУ «ХП» 3D принтер, індукційна кухонна плита тощо).
 4. Сучасна комп'ютерна, мікропроцесорна та мультимедійна техніка – мультимедійний проектор, ноутбук, керований екран, що дозволило створити в аудиторії, яка розташована в одному приміщенні з навчальною лабораторією, робоче місце викладача (рис. 5), придатне для проведення лекційних презентацій, тестування тощо.
- Для зберігання та обліку наявності придбаного обладнання власними силами й за рахунок власних коштів, а також залучених коштів спонсорів було відремонтовано та обладнано сучасними меблями окреме приміщення (рис. 6).



Рис. 4. Частина обладнання, придбаного за кошти гранту AvH



Рис. 5. Застосування високоякісної стаціонарної мультимедійної техніки, придбаного за кошти гранту AvH, у навчальній аудиторії кафедри «Електричні апарати»



Рис. 6. Інтер'єр приміщення для зберігання обладнання, придбаного за кошти гранту AvH

Придбане обладнання ефективно використовується, у першу чергу, для докорінної модернізації наукових і навчальних лабораторій кафедри «Електричні апарати» з метою проведення на сучасному рівні навчального процесу за спеціалізаціями «Електричні апарати» та «Електропобутова техніка», а також експериментальних досліджень.

Модернізація навчальної лабораторії передбачає проведення заходів у таких напрямках:

1. Підвищення рівня безпеки та створення комфортних умов роботи студентів у лабораторії.
2. Запровадження концепції мобільних лабораторних робіт.
3. Розробка та виготовлення нових мобільних лабораторних стендів із застосуванням сучасної електричної апаратури та цифрових вимірювальних приладів з широким залученням студентів у процес розробки та виготовлення мобільних лабораторних стендів, у першу чергу, під час виконання ними дипломних бакалаврських та магістерських робіт.

Підвищення рівня безпеки та створення комфортних умов роботи студентів у лабораторії. З початку заснування кафедри у навчальній лабораторії застосовувалися громіздкі й незручні дерев'яні лабораторні столи, які до того ж були пожежонебезпечними. У 70-х роках минулого століття дерев'яні столи були замінені на набагато зручніші сталеві зварні конструкції з пластиковими стільницями та пластиковими фасадами. На кожному столі була передбачена можливість монтування двох стаціонарних лабораторних стендів – один над одним (рис. 1). На столі був змонтований комутаційний апарат, запобіжник та сигнальна лампа, а також лабораторний автотрансформатор, який обслуговував по черзі обидва стенди. Конструкція сигнальної лампи була такою, що світлофільтр до неї пригвинчувався і, за бажанням, згвинчувався з боку фронтальної поверхні, відтак практично на усіх столах світлофільтри були згвинчені, що створювало можливість дотику до небезпечної струмопровідної частини. Для запобігання цьому сигнальні лампи ми відключили, що створювало іншу небезпеку – відсутність сигналізації про підключення стенду до живлення. Розетки на столах не були передбачені.

Комутаційні апарати, що були змонтовані на лабораторних столах у 70-і роки, представляли собою однополюсні автоматичні вимикачі АЗ161, випущені у 1966 році за спеціальними ТУ й оснащені тільки біметалевими розчеплювачами, отже вони забезпечували захист лише від перевантажень, а захист від коротких замикань здійснювали мініатюрні запобіжники, у яких здатність до переривання коротких замикань (short circuit breaking capacity) є вкрай низькою – не перевищує 500 А, що створює умови до виникнення займань в електропроводці.

Вимоги електробезпеки передбачають уземлення усіх доступних до дотику струмопровідних частин електроустановок. Ця фундаментальна вимога не виконувалася у нашій лабораторії, у якій не було власного контуру уземлення. Після багаторічного листування з керівництвом університету нарешті, у 2016 році шина уземлення була заведена до лабораторії, а опір уземлення перевірено представниками служби головного енергетика. Усі доступні струмопровідні частини ми власноруч приєднали до шини уземлення, яку пофарбували, відповідно до вимог міжнародних стандартів щодо електробезпеки та Правил улаштування електроустановок, у жовтий та зелений кольори.

При переобладнанні лабораторних столів з однофазним живленням, у якості комутаційних апаратів ми використали однополюсні брейкери (circuit breakers) з номінальним струмом (rated current) 16 А та захисною характеристикою «С» (уставка спрацьовування електромагнітного розчеплювача у 5 ... 10 разів перевищує номінальний струм, тобто розчеплювач спрацює без витримки часу при струмі, який лежить в інтервалі від 80 А до 160 А). Для живлення допоміжних пристроїв та приладів на лабораторних столах ми встановили подвійні розетки ЩУКО із захисними контактами, що забезпечує при підключенні до них приладів з металевими корпусами автоматичне уземлення таких корпусів за умови, що прилад оснащений вилкою ЩУКО, яка також має захисний контакт, а захисний провідник приєднаний до корпусу.

Окремі лабораторні роботи, розроблені нами вимагають живлення від двох незалежних джерел, тому на деяких лабораторних столах ми встановили розділювальні трансформатори 220 / 220, первинні обмотки яких приєднали до джерела живлення, а вторинні обмотки вивели на спеціальні розетки, які зазвичай застосовується у стаціонарних комп'ютерах для приєднання об'єднувальних кабелів. Зовнішній вигляд переобладнаної частини лабораторного столу та відповідна електрична схема показані на рис. 7.

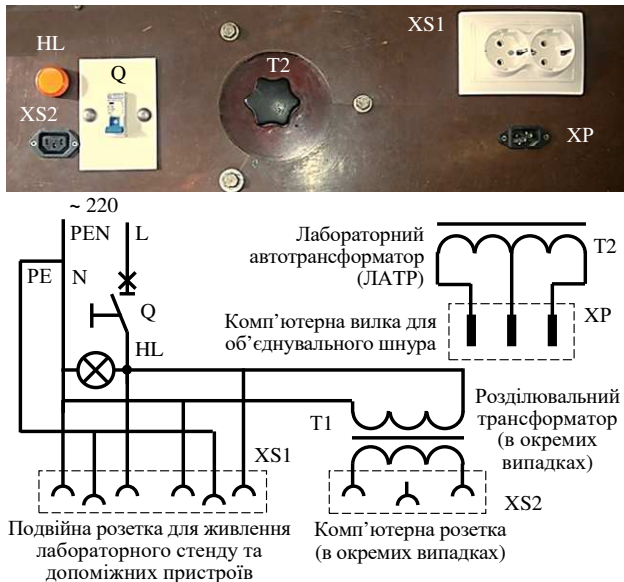


Рис. 7. Розташування апаратури на переобладнаному лабораторному столі з однофазним живленням та відповідна електрична схема

Для виконання лабораторних робіт, що потребують трифазного живлення були відповідно переобладнані деякі лабораторні столи (рис. 8).

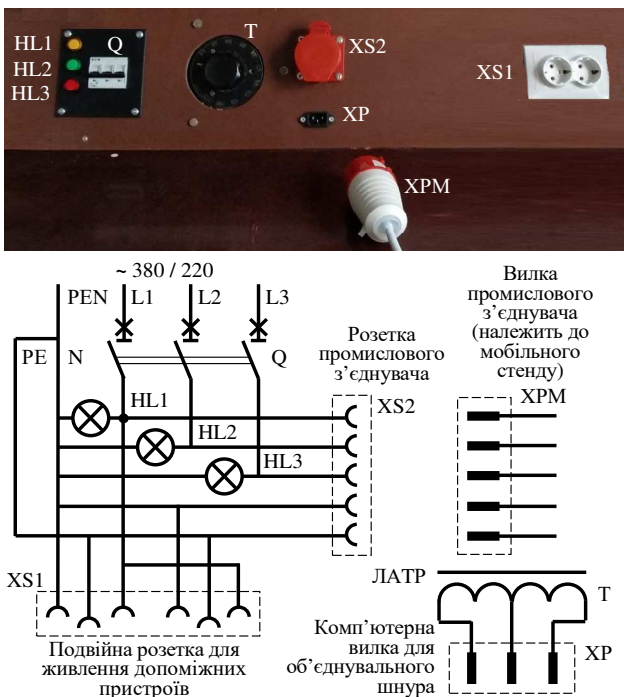


Рис. 8. Розташування апаратури на переобладнаному лабораторному столі з трифазним живленням та відповідна електрична схема

Створення комфортних умов роботи студентів ми розглядаємо як один з важливих чинників забезпечення якості вищої освіти й приділяємо цьому належну увагу. Зокрема, влітку та восени 2018 р. ми провели значні ремонтні роботи в лабораторії – встановили металопластикові вікна, що суттєво покращило звукоізоляцію та теплоізоляцію, замінили старі люмінесцентні світильники на значно економне та більш яскраве світлодіодне освітлення, оновили підлогу – вирівняли нерівності та поклали новий лінолеум в лабораторії, а також керамогранітну плитку в холі та перед входом на кафедру, встановили стінові МДФ панелі на значній частині площі стін лабораторії та пластикові панелі в холі, замінили старі дерев'яні плінтуси на сучасні пластикові. До цього слід додати закуплені раніше стільці ISO з м'якими сидіннями (на кафедрі їх понад 80 штук, 21 з яких – у лабораторії) та зроблені власними силами та за рахунок власних коштів табурети також з м'якими сидіннями й зручні аудиторні столи з полками для сумок та рюкзаків. Аудиторна частина лабораторії оснащена зручною дошкою та сучасними мультимедійними засобами (стаціонарний проектор високої яскравості та високої роздільної здатності з інтерфейс ними кабелями RGB та HDMI, а також великий екран з дистанційним керуванням).

Як було зазначено вище, значну частину цих робіт було виконано власними силами при активній участі студентів, які, спостерігаючи за тим, як змінюється кафедра, добровільно пропонували свої послуги. Деякі ілюстрації участі студентів у ремонті приведені нижче (рис. 9).

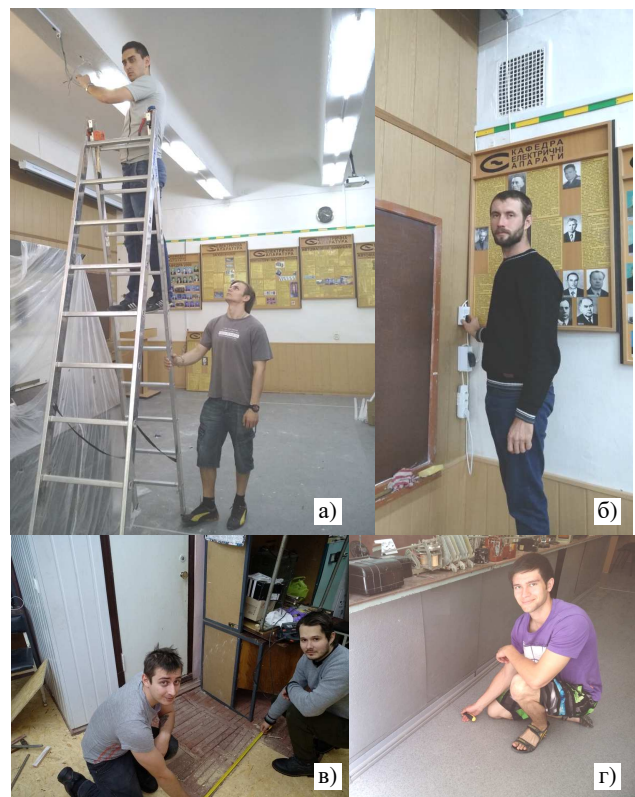


Рис. 9. Приклади участі студентів у ремонтних роботах: а – встановлення LED світильників замість старих люмінесцентних (студенти Богдан Базаров та Дмитро Биков); б – встановлення стінових МДФ панелей (ст. Микола Вязментинів); в – ремонт підлоги (студенти Олександр Юр'єв та Антон Попов); г – встановлення плінтусів (ст. Єгор Осадчий)

Після проведеного ремонту інтер'єр основних приміщень кафедри виглядає набагато привабливіше (рис. 10).



Рис. 10. Деякі приміщення кафедри після ремонту:
а – вхід до кафедри; б – хол; в – навчальна лабораторія;
г – лабораторія-майстерня

Допомога спонсорів. Потреба у великій кількості допоміжної комутаційної, захисної та сигнальної апаратури була задовільнена за рахунок вагомої спонсорської допомоги від українських виробничих та комерційних підприємств. Апаратура, отримана як спонсорська допомога від компаній АСКО-УКРЕМ, E.NEXT, Legrand, дозволила за короткий термін створити понад 15 нових лабораторних робіт та оновити комутаційну та сигнальну апаратуру на переобладнаних лабораторних столах.

Спонсорська допомога корпорації АСКО-УКРЕМ [3]. Ця компанія подарувала кафедрі значну кількість комутаційної та сигнальної апаратури (рис. 11), яку ми застосовуємо при переобладнанні лабораторних столів з однофазним живленням та при створенні нових мобільних лабораторних стендів.



Рис. 11. Комутаційна, захисна та сигнальна апаратура – спонсорська допомога корпорації АСКО-УКРЕМ

Спонсорська допомога від компанії E.NEXT [4]. Ця компанія подарувала кафедрі велику кількість комутаційної, захисної та світлосигнальної апаратури, яку ми застосовуємо при переобладнанні лабораторних столів з однофазним та трифазним живленням, а також при створенні нових мобільних лабораторних стендів (рис. 12, 13). Серед переданої апаратури слід відзначити п'ятипівні промислові з'єднувачі, стаціонарні розетки яких ми розмістили на лабораторних столах, а ви́лки з приєднаними до них гучкими п'ятипровідними кабелями – на мобільних лабораторних стендах, які вимагають трифазного живлення.



Рис. 12. Представник компанії E.NEXT Ігор Прокопенко привіз нову апаратуру у подарунок кафедрі (червень 2018 р.)



Рис. 13. Ряд лабораторних столів, обладнаних модульною комутаційною апаратурою компанії E.NEXT (ліворуч) та демонстраційні стенди цієї компанії (праворуч)

Спонсорська допомога від компанії EATON Україна [5]. Ця компанія подарувала кафедрі декілька мікропроцесорних реле EASY, а також кабелі для їх програмування. Цю апаратуру застосовуємо при створенні нових мобільних лабораторних стендів (рис. 14).



Рис. 14. Бакалаврський дипломний проект Олексія Лугового, виконаний під керівництвом ст. викладача С.В. Вировця, був присвячений створенню мобільного лабораторного стенда з дослідження програмованих мікропроцесорних реле

Спонсорська допомога від компанії АББ Лтд [6]. Ця компанія подарувала кафедрі значну кількість коштовних апаратів (контактори, модульні комутаційні та захисні апарати, програмовані мікропроцесорні реле, кабелі для їх програмування, унікальний розподільний пристрій Kabeldon, апарат плавного пуску асинхронних двигунів тощо, які ми застосовуємо при створенні нових лабораторних робіт (рис. 15, 16).



Рис. 15. Бакалаврський дипломний проект Володимира Пожидасва, виконаний під керівництвом доц. О.О. Чепелюка, був присвячений створенню мобільного лабораторного стенду з дослідження частотного регулятора швидкості обертання асинхронних двигунів, придбаного за кошти гранту.



Рис. 16. Артем Устименко під керівництвом доц. О.Г. Середи виконав дипломний проект з дослідження характеристик захищених пускачів асинхронних двигунів, подарованих компанією АББ Лтд. Дослідна установка була перетворена на мобільний лабораторний стенд

Компанія АББ Лтд подарувала нашій кафедрі розподільний пристрій системи Kabeldon, який є унікальним з точки зору побудови та експлуатаційних характеристик: ізольовані шини зі ступенем захисту IP20, відсутність головного комутаційного апарата, можливість безпечної заміни пошкоджених апаратів та приєднання нових споживачів під напругою тощо.

Розподільні пристрої системи Kabeldon випускаються як у закритому виконанні для зовнішнього встановлення (outdoor), як у нашому випадку, так і для внутрішнього встановлення (indoor). У цьому випадку вони можуть монтуватися на внутрішніх стінах підстанцій, не потребуючи захисних металевих шаф.

Наскільки нам відомо, в інших ВНЗ України подібні розподільні пристрої не представлені. Зараз ми працюємо над створенням лабораторної роботи з дослідження розподільного пристрою Kabeldon (рис. 17).

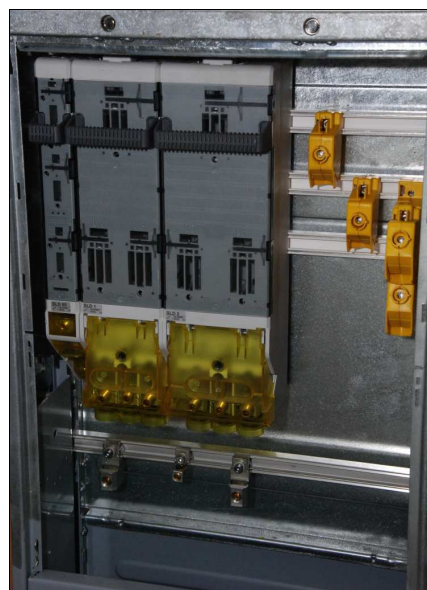


Рис. 17. Розподільний пристрій Kabeldon готується до застосування у новій лабораторній роботі

Компанія АББ Лтд подарувала нашій кафедрі також пристрій плавного пуску асинхронних двигунів – сучасний апарат з мікропроцесорним керуванням та напівпровідниковою комутацією кіл обмоток. Подарований нам пристрій плавного пуску (рис. 18) є останнім досягненням в області обладнання для управління і захисту асинхронних електродвигунів. Такі пристрої широко застосовуються для запуску й захисту трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором відцентрових насосів, компресорів, стрічок конвеєрів, елеваторів, ескалаторів, пресів, дробарок, змішувальних машин, мішалок тощо. Зараз ми працюємо над створенням лабораторної роботи з дослідження характеристик цього пристрою.



Рис. 18. Пристрій плавного пуску двигунів, подарований нашій кафедрі компанією АББ Лтд.

Спонсорська допомога від компанії Flexel Україна [7]. Ця компанія подарувала кафедрі фрагмент конструкції сучасної системи прокладання кабелів (cable management system) з використанням кабельних лотків різних конструкцій, у тому числі гнучкої системи д्रो-тяних кабельних лотків, які добре вписуються у конфігурацію нерівних стін та стель.

Після завершення процедури узгодження конфігурації системи прокладання кабелів, яку ми планували розташувати безпосередньо у приміщенні навчальної лабораторії, ми отримали поштою усі елементи, необхідні для монтування системи, а згодом директор цієї компанії Дмитро Писаренко особисто приїхав до нашої кафедри, ми зібрали зацікавлених студентів і за чотири години під керівництвом Дмитра Писаренка вони змонтували систему, фото якої наведено нижче (рис. 19). Згодом ті ж студенти у змонтовані лотки проклали кабелі для забезпечення трифазного живлення нових лабораторних робіт, зокрема роботи з дослідження системи Kabeldon.



Рис. 19. Система прокладання кабелів, подарована компанією Flexel Україна (а), директор компанії Flexel Україна Дмитро Писаренко (б) та студенти Діланге Антоніо (Ангола), Денис Василенко та Артем Коломієць (в), які прийняли активну участь у монтуванні системи

Згодом ми отримали ще один подарунок від компанії Flexel Україна – фрагменти систем зовнішнього блискавкозахисту для дахів з металочерепиці, а також для плоских дахів, вкритих руберойдом. Ці фрагменти змонтували у приміщенні навчальної лабораторії студенти Євген Моргунов та Дмитро Позняк під керівництвом доцента О.О. Чепелюка (рис. 20).

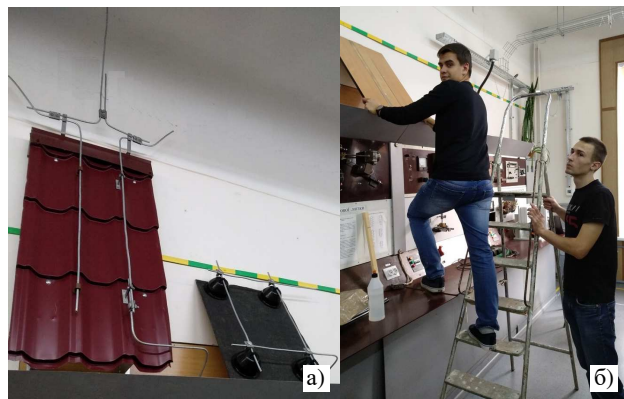


Рис. 20. Фрагменти систем зовнішнього блискавкозахисту, подаровані компанією Flexel Україна (а), та студенти Євген Моргунов і Дмитро Позняк (б) під час монтування фрагментів.

Співпраця з компанією АВМ АМПЕР [8]. Наша кафедра активно співпрацює з цією компанією вже понад 15 років (рис. 21) у напрямку розробки вакуумних комутаційних апаратів середньої напруги. Результатами цієї співпраці є нові технічні рішення для вакуумних контакторів та брейкерів, втілених не тільки у дослідних зразках, а й у серійній продукції цього підприємства. Зокрема, з 2005 року серійно випускається вакуумний брейкер ВБ-4Е, в якому застосовується актуатор, запатентований завідувачем кафедри «Електричні апарати» Б.В. Клименком та керівником АВМ «АМПЕР» В.М. Бугайчуком. Компанія АВМ «АМПЕР» впродовж багатьох років надає спонсорську підтримку Симпозіуму SIEMA [9], організатором якого є кафедра «Електричні апарати». Крім науково-технічної співпраці, компанія АВМ «Ампер» на протязі багатьох років підтримує освітній процес на нашій кафедрі – спонсорує видання підручників та посібників, організує відвідування міжнародної електротехнічної виставки ELCOM в Києві для кращих студентів кафедри, організувала студентську практику на підприємстві-партнері KPB INTRA в Чехії тощо.



Рис. 21. Ілюстрації співпраці з компанією АВМ «АМПЕР»: а – вакуумний брейкер ВБ-4Е; б – демонстрація спільних розробок на міжнародній виставці ELCOM; в – керівник компанії В.М. Бугайчук організував відвідування виставки ELCOM; г – студенти нашої кафедри в м. Брно (Чехія) під час практики, організованою компанією АВМ «АМПЕР».

Запровадження концепції мобільних лабораторних робіт. Ця концепція передбачає проведення будь-якої лабораторної роботи на будь-якому лабораторному столі. Схемотехнічні та конструктивні рішення, застосовані при реалізації цієї концепції дозволяють безпечно приєднувати лабораторні автотрансформатори (ЛАТР) та роздільні трансформатори 220/220, стаціонарно розташовані на лабораторних столах, до будь-якого мобільного лабораторного стенду. Нижче приведені деякі приклади реалізації цієї концепції у нових лабораторних роботах (рис. 22 – 30), де застосовані сучасні досліджувані апарати та комутаційні апарати, що здійснюють керування процесом дослідження. Подібні приклади були наведені також раніше (рис. 14 – 16). Усі нові лабораторні стенди були розроблені та виготовлені за участі студентів при виконанні ними дипломних бакалаврських або магістерських робіт.



Рис. 22. Дипломник-магістрант Влад Кулик та його керівник проф. Б.В. Клименко обговорюють результати дослідів на лабораторному стенді з дослідження MV брейкера

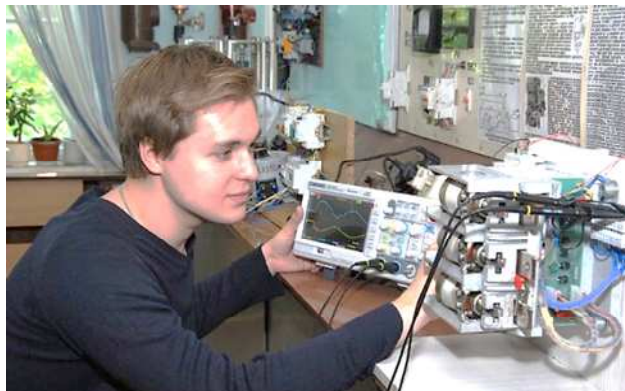


Рис. 23. Дипломник-магістрант Роман Норцов під керівництвом проф. Б.В. Клименка розробив та виготовив лабораторний стенд з дослідження вакуумного LV контактора

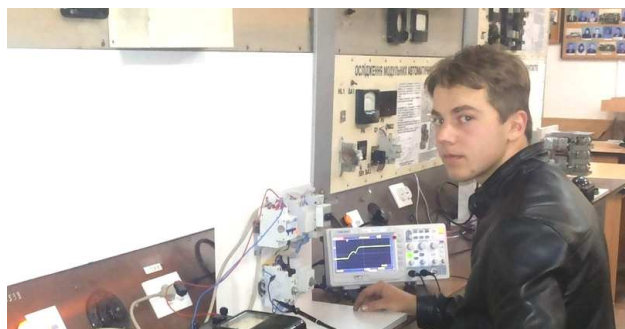


Рис. 24. Дипломник-бакалаврант Ілля Захаров розробив та виготовив лабораторний стенд з дослідження інтерфейсних реле (керівник – проф. Б.В. Клименко)



Рис. 25. Дипломник-бакалаврант Микола Вязментин розробив та виготовив лабораторний стенд з дослідження апаратів різницевих струмів (керівник - проф. Б.В. Клименко)



Рис. 26. Лабораторний стенд з дослідження LV брейкера побутового призначення розробив та виготовив дипломник-бакалаврант Денис Василенко (керівник - проф. Б.В. Клименко)



Рис. 27. Лабораторний стенд з дослідження можливостей двопроменевого цифрового осцилографа розробив та виготовив Максим Самокіш (керівник – ст. викл. С.В. Вировець)

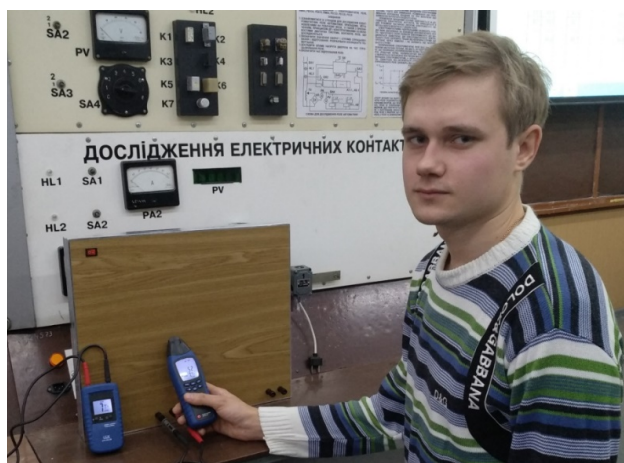


Рис. 28. Лабораторний стенд з дослідження можливостей шукача скритої проводки розробив Влад Овчаренко (керівник – ст. викл. С.В. Вировець)

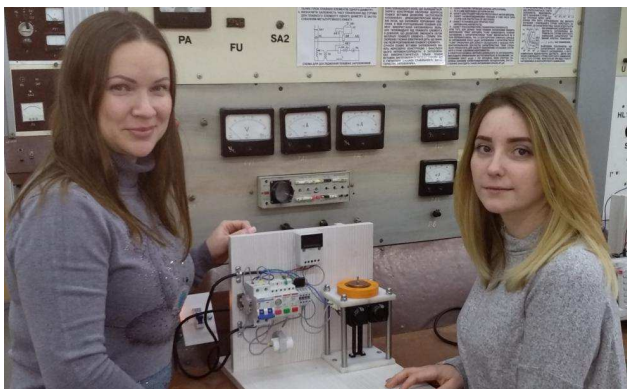


Рис. 29. Темою дипломної роботи у поточному навчальному році ст. Карини Шуби є модифікація лабораторного стенду з дослідження індукційно-динамічного приводу (керівник – ст. викл. В.В. Литвиненко)



Рис. 30. Дипломну роботу, пов'язану з модернізацією лабораторного стенда з дослідження характеристик моностабільного поляризованого електромагніта виконує в поточному навчальному році ст. Мансур Гандур під керівництвом проф. Б.В. Клименка

У цьому збірнику наукових праць ми починаємо публікувати короткі статті-дайджести з описом деяких розроблених і впроваджених у навчальний процес лабораторних робіт.

Активізація досліджень. Протягом 2015-2018 рр. (як під час «боротьби» за грант фонду Александра фон Гумбольда, так і у ході виконання описаних у статті робіт з докорінної модернізації навчальної лабораторії кафедри) за участі викладачів кафедри було зроблено близько 20 наукових доповідей на великих міжнародних наукових конференціях і симпозиумах (ISEF'2017, NUMELEC'2017, IGTE'2018 тощо) у країнах-членах ЄС (Німеччина, Франція, Австрія, Польща) та на наукових семінарах у провідних університетах Німеччини (RWTH Aachen Universität, Leibniz Universität Hannover, Technische Universität Berlin) та Франції (Université de Nantes). Близько 10 наукових статей, у тому числі у співавторстві з закордонними колегами, опубліковано в провідних закордонних виданнях, що індексуються у наукометричній базі Scopus, а також у журналі «Електротехніка і Електромеханіка» [10], що отримав міжнародне визнання – індексується у Web of Science Core Collection. І ця міжнародна активність (публікації, презентації, пошук нових партнерів) триває й зараз: на найближчий час (весна-літо 2019 р.) заплановано доповіді на семінарі ще в одному відомому німецькому університеті (Bergische Universität Wuppertal) та участь у Міжнародному симпозиумі ISEF'2019 у Франції.

Візит на кафедру генерального консула Федеративної Республіки Німеччина Вольфганга Мьоссінгера. Фонд Александра фон Гумбольдта – це державний фонд, який фінансується Міністерством закордонних справ Федеративної республіки Німеччина. Статут цього фонду передбачає візит високого представника МЗС Німеччини для урочистого вручення Сертифікату гранту після остаточного завершення процесу закупівель обладнання. Таким представником стосовно нашого гранту був Генеральний Консул ФРН Вольфганг Мьоссінгер, який відвідав нашу кафедру 24 жовтня 2018 р. (рис. 31, 32), де йому була продемонстрована робота нової техніки, показані широкі можливості її застосування в дослідженнях і навчальному процесі.



Рис. 31. Генеральний консул Федеративної республіки Німеччина Вольфганг Мьоссінгер серед викладачів і студентів нашої кафедри.

Консул відзначив високу ефективність використання виділених кафедрі коштів та обіцяв підтримку заявки кафедри електричних апаратів на новий грант, орієнтований на співпрацю в галузі досліджень і освіти з одним із університетів Німеччини.



Рис. 32. Генеральний консул ФРН Вольфганг Мьоссінгер урочисто вручає сертифікат про отримання гранту фонду Александра фон Гумбольдта колишньому стипендіату цього фонду доценту Михайлу Пантеляту і завідувачу кафедри електричних апаратів професору Борису Клименку.

Генеральний консул ФРН провів також ряд зустрічей з керівництвом Університету (рис. 33). Проректор з науково-педагогічної роботи Геннадій Хрипунов подякував консула за підтримку і наголосив на важливості цього кроку для розвитку науки і освіти в НТУ «ХП».



Рис. 33. Під час зустрічі проректора Геннадія Хрипунова з Генеральним консулом ФРН Вольфгангом Мьоссінгером

Після повернення до м. Дніпро, де розташоване Генеральне консульство, Вольфганг Мьоссінгер направив листа на адресу ректора НТУ «ХПІ» (рис. 34), у якому він висловив свою упевненість в тім, що допомога, надана фондом AvH, потрапила у надійні руки.

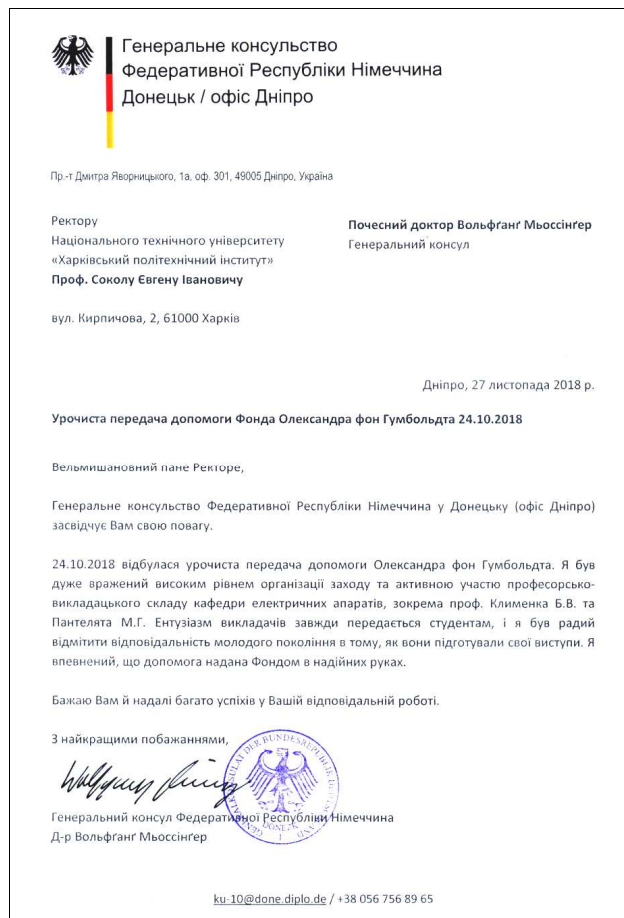


Рис. 34. Лист Генерального консула Федеративної республіки Німеччина ректору НТУ «ХПІ»

Коротко про плани на майбутнє. Багаторічний досвід роботи у сфері вищої освіти показує, що не слід очікувати бюджетного фінансування докорінного оновлення лабораторної бази кафедр технічного спрямування, без чого вони приречені на стагнацію та занепад. Фінансовий стан вітчизняних підприємств також не дозволяє їм радикально переоснащувати споріднені кафедри. І хоча ці підприємства кровно зацікавлені у високій якості вищої освіти, бо випускники кафедр – це їх майбутні працівники, допомога українських підприємств зараз може мати лише обмежений, допоміжний характер. Усвідомлюючи це, ми продовжуємо активний пошук можливостей отримання нових грантів від євро-

пейських фондів, а також підтримуємо співпрацю з існуючими зарубіжними партнерами та продовжуємо пошук нових контактів як за кордоном, так і в Україні.

Висновки.

1. Розв'язання нагальної задачі докорінного переобладнання навчальних лабораторій ВНЗ України можливо в першу чергу шляхом залучення грантів від європейських фондів, а також завдяки спонсорській допомозі виробничих і комерційних підприємств України.

2. Кафедра «Електричні апарати» НТУ «ХПІ» спромоглася у 2016 р. отримати грант Фонду Олександра фон Гумбольдта (Німеччина) на суму 20 тисяч Євро на придбання обладнання, що у сукупності з допомогою низки електротехнічних виробничих та комерційних підприємств України дозволило розпочати роботу з докорінного переобладнання навчальної лабораторії та отримати певні позитивні результати.

3. За короткий термін створено та впроваджено у навчальний процес близько 15 нових лабораторних робіт, у переважній більшості з яких застосована запропонована концепція мобільних лабораторних стендів, у процес розробки та виготовлення яких безпосередньо залучалися студенти під час виконання ними дипломних робіт бакалавра та магістра.

4. З метою подальшого підвищення якості навчального процесу до рівня, що відповідає сучасним світовим вимогам, колективом кафедри готуються заявки на фінансову підтримку за іншими програмами міжнародного співробітництва, а також продовжується плідна співпраця з низкою українських електротехнічних компаній.

Список літератури / References

1. Pantelyat M.G., Klymenko B.V. An equipment subsidy from the Alexander von Humboldt Foundation provided by the Federal Foreign Office of Germany – a great contribution to the advancement of science and learning and to international cooperation // Proceedings of the International Scientific Conference Humboldt-Kolleg “Limits of Knowledge”. – June 2017, Cracow, Poland. – P. 276-285.
2. Alexander von Humboldt-Stiftung. Available at: www.avh.de
3. <https://www.acko.ua>
4. <https://enext.ua/uk/>
5. <http://moeller.kiev.ua/>
6. <https://new.abb.ua/>
7. <https://www.flexel.com.ua/ru-ua/>
8. <http://www.abm-amper.com>
9. <http://web.kpi.kharkov.ua/siema/index/>
10. <http://eie.khpi.edu.ua/>

Надійшла (received) 18.12.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Клименко Борис Володимирович (Клименко Борис Владимирович, Klymenko Borys Volodymyrovych) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач, професор кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7860-4937>; e-mail: b.v.klymenko@gmail.com

Чепелик Олександр Олександрович (Чепелик 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

Пантеліят Михайло Гаррійович (Пантеліят Михаил Гарриевич, Panteliyat Mykhailo Garrievich) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1357-2134>; e-mail: m150462@yahoo.com

ЗМІСТ

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

<i>Байда Е. И., Клименко Б. В., Еланский Ю.А., Форкун Я.Б.</i> К расчету противодействующих сил газораспределительного клапана с каналом разгрузки	3
<i>Goncharov E.V.</i> Analysis of design features of inductive electromagnetic current limiter	7
<i>Зорин Е. Ю., Чепелюк А. А., Грищук Ю.С., Воинов В.В.</i> Анализ эффективности конструктивных решений установок компенсации емкостных токов в сетях среднего напряжения	11
<i>Король О. Г., Клименко Б. В., Ересько О. В.</i> Дослідження перехідних процесів в новому напівпровідниковому пристрої форсованого керування моностабільним електромагнітом вакуумного контактора	18
<i>Лелюк М. А., Клименко Б. В.</i> Гибридная система керування моностабільним поляризованим приводом вакуумного контактора	25

ПРИСТРОЇ ТА МЕТОДИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

<i>Горкунов Б.М., Борисенко Е.А., Львов С.Г., Шибан Тамир</i> Влияние места расположения намагничивающих обмоток преобразователя на гармонический состав поля	31
---	----

СИЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ ТА МАГНІТНІ ПОЛЯ

<i>Kostiukov I.O.</i> Deterioration of XLPE insulation in high voltage cable systems and testing of quality by applying pulses of high voltage	36
<i>Петренко Н.П.</i> О распределении импульсного тока в одновитковом массивном соленоиде сложного профиля	42

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

<i>Чунихин К.В.</i> Влияние обмотки и меридианного сечения сердечника на магнитный момент электромагнита... ..	47
--	----

ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЙ

<i>Пантелят М.Г., Грищук Ю.С., Чепелюк О.О., Єловє А.К.</i> Напрямки досліджень індукційних кухонних плит	54
---	----

<i>Кривошеев С.Ю., Варв'янська В.В., Єресько О.В., Чепелюк О.О., Давиденко О.О.</i> Фотоелектрична станція... ..	59
--	----

ІНФОРМАЦІЯ, ГІПОТЕЗИ, ДУМКИ

<i>Гречко А. М.</i> Сучасні адитивні технології та 3D-друк. Огляд останніх досягнень в різних сферах людського життя	63
<i>Клименко Б.В., Чепелюк О.О., Пантелят М.Г.</i> Сучасна лабораторія – сучасна освіта: докорінне переобладнання навчальної лабораторії кафедри «Електричні апарати» НТУ «ХПІ»	76

CONTENT

ELECTRIC APPARATUS

<i>Baida E.I., Klymenko B.V., Yelansky Yu.A., Forkun Ya.B.</i> To calculation of countering forces in gas distribution valve with a ball switching element and unloading channel	3
<i>Goncharov E.V.</i> Analysis of design features of inductive electromagnetic current limiter	7
<i>Zorin Y.Y., Chepelyuk O.O., Hryshchuk Yu.S., Voinov V.V.</i> The efficiency analysis of constructive solutions of the capacitive currents compensation plants in medium voltage power distribution grids	11
<i>Korol O.G., Klymenko B.V., Eresko O.V.</i> Investigations of transients in the novel semiconductor device of forced control of the vacuum contactor monostable electromagnet	18
<i>Leliuk M.A., Klymenko B.V.</i> Hybrid control system for monostable polarized vacuum contactor drive	25

DEVICES AND METHODS OF NON-CONDUCTIVE CONTROL

<i>Gorkunov B., Borysenko Y., Lvov S., Shaiban Tamer</i> The influence of the transducer's magnetizing windings location on the harmonic composition of the field	31
---	----

STRONG ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS

<i>Kostiukov I.O.</i> Deterioration of XLPE insulation in high voltage cable systems and testing of quality by applying pulses of high voltage	36
<i>Petrenko M.P.</i> About the pulsed current distribution in the massive single-turn solenoid	42

THEORETICAL ELECTRICAL ENGINEERING

<i>Chunikhin K.V.</i> The influence of the winding and the meridian section of the core on the magnetic moment of the electromagnet	47
---	----

USE OF ELECTRICAL ENGINEERING

<i>Panteliat M.H., Hryshchuk Yu.S., Chepeliuk O.O., Yeloiev A.K.</i> Directions of researches of induction kitchen plates	54
---	----

<i>Kryvosheiev S.Yu., Varvianska V.V., Eresko O.V., Chepelik O.O., Davydenko O.O.</i> Sun station	59
---	----

INFORMATION, HYPOTHESIS, VIEWS

<i>Grechko O.M.</i> Modern additive technologies and 3D printing. Overview of recent advances in various spheres of human life	63
<i>Klymenko B.V., Chepeliuk O.O., Panteliat M.G.</i> Modern laboratory – modern education: radical re-equipment of the educational laboratory of the "Electrical apparatus" department of the NTU "KhPI"	76