

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**

№ 1'2020

No 1'2020

Збірник наукових праць

Collection of Scientific papers

Видання засноване у 1961 р.

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2020

Kharkiv
NTU «KhPI», 2020

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання 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», 2020. – № 1. – 60 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 удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого рішенням Атестаційної колегії МОН України. Наказ № 886 (додаток 4) від 02.07.2020 р.

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

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

Засновник
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
Редакційна колегія
Головний редактор:
Байда Є. І., д-р техн. наук, доц., НТУ «ХПІ», Харків,
Україна
Відповідальний секретар:
Варшамова І. С., ст. викладач, НТУ «ХПІ», Україна
Члени редколегії:
Баранов М. І., д-р техн. наук, с.н.с., НДПКИ "Молнія" НТУ
"ХПІ", Харків, Україна;
Кропачек О. Ю., д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПІ", Харків,
Україна;
Плюгін В. Є., д-р техн. наук, проф., ХНУМГ, Харків,
Україна;
Середь О. Г., канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПІ", Харків,
Україна;
Шевченко С. Ю., д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПІ", Харків,
Україна;
Clemens Markus, Prof. Dr., Bergische Universität Wuppertal,
Wuppertal, Germany;
Dolezel Ivo, Prof., University of West Bohemia. Plzen, Czech
Republic;
Gurevich Vladimir, Honorary Prof., Senior specialist of Central
Electric Lab., Israel Electric Corporation, Haifa, Israel;
Kasolis Fotios, Dr., Bergische Universität Wuppertal,
Wuppertal, Germany.
Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».
Протокол № 5 від 13.10.2020 р.

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

*Є.І. БАЙДА***ВПЛИВ ГЕОМЕТРІЇ МАТЕРІАЛУ КОТУШКИ НА ПАРАМЕТРИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СИЛИ ІНДУКЦІЙНО-ДИНАМІЧНОГО МЕХАНІЗМУ**

У статті досліджено математичну модель швидкодіючого індукційно-динамічного механізму в циліндричній системі координат, котушка якого у вигляді ряду концентричних кілець математично представлена як спіраль Архімеда. Метою статті є перевірка математичної моделі і дослідження роботи індукційно-динамічного механізму в залежності від геометричних розмірів мідної стрічки, якою намотана котушка та числа витків. Проведені розрахунки показують, що одним з основних чинників, що впливає на роботу індукційно-динамічного механізму є перетин стрічки, який має бути не менше певного значення. Причому, висота стрічки, в певних межах, мало впливає на швидкодію індукційно-динамічного механізму. В процесі моделювання було встановлено, що для кожного певного перетину мідної шини існує оптимальна кількість рядів намотування, при якому значення імпульсу сили максимально.

Ключові слова: індукційно-динамічний механізм.

*Е.И. БАЙДА***ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ МАТЕРИАЛА КАТУШКИ НА ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИЛЫ ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА**

В статье исследована математическая модель быстродействующего индукционно-динамического механизма в цилиндрической системе координат, катушка которого в виде ряд концентрических колец математически представлена спиралью Архимеда. Целью статьи является проверка математической модели и исследование работы индукционно-динамического механизма в зависимости от геометрических размеров медной ленты, которой намотана катушка и числа витков. Проведенные расчеты показывают, что одним из основных факторов, влияющих на работу индукционно-динамического механизма, является сечение ленты, которое не должно быть меньше определенного значения. Причем, высота ленты, в определенных пределах, слабо влияет на быстродействие индукционно-динамического механизма. В процессе моделирования было установлено, что для каждого определенного сечения медной шины существует оптимальное количество рядов намотки, при котором значение импульса силы максимально.

Ключевые слова: индукционно-динамический механизм.

*E.I. BAIDA***INFLUENCE OF COIL MATERIAL GEOMETRY ON THE PARAMETERS OF THE ELECTROMAGNETIC FORCE OF THE INDUCTION-DYNAMIC MECHANISM**

The article investigates the mathematical model of a high-speed induction-dynamic mechanism in a cylindrical coordinate system, the coil of which in the form of a series of concentric rings is mathematically represented as an Archimedes spiral. The purpose of the article is to verify the mathematical model and study the operation of the induction-dynamic mechanism depending on the geometric dimensions of the copper tape that wraps the coil and the number of turns. The calculations show that one of the main factors affecting the operation of the induction-dynamic mechanism is the section of the tape, which should not be less than a certain value. Moreover, the height of the tape, within certain limits, weakly affects the speed of the induction-dynamic mechanism. During the simulation, it was found that for each specific section of the copper bus bar there is an optimal number of winding rows at which the value of the force impulse is maximum.

Keywords: induction-dynamic mechanism.

Введение. Известно, что индукционно-динамические механизмы (ИДМ) широко используются в различных электротехнических устройствах [1-5]. Они простоты по конструкции, надежны и обладают высоким быстродействием.

Катушка ИДМ выполняется цилиндрической, а в качестве намоточного материала чаще всего применяется либо провод, либо медная лента, высота которой на порядок больше её толщины. Причем геометрия намоточного материала имеет большое значение для работы ИДМ. Катушка намотанная круглым проводом с поперечным сечением 1 мм² будет создавать значения электромагнитной силы отличающиеся от значений получаемых при намотке катушки лентой такого же сечения, с тем же количеством витков.

Необходимо отметить, что несмотря на значительное количество статей по расчету ИДМ, (или как его ещё называют линейный импульсно-индукционный электро-механический преобразователь) вопрос влияния геометрии намоточного материала на силы и токи в устройстве отражен недостаточно.

Новизна. К научной новизне данной статьи можно отнести исследование влияния высоты и количества витков медной ленты на параметры ИДМ рассчитанные в цилиндрической системе координат. При этом витки ленты, изображаемые на расчетной модели в виде отдельных концентрических колец, математически представлены спиралью Архимеда.

Целью статьи является проверка математической модели и определение основных расчетных параметров

© Е.И. Байда, 2020

ИДМ (силы, токов, импульса силы) в функции высоты намоточной ленты и количества витков.

Обоснование принятой модели, основные допущения, схема подключения катушки и задача расчета. На рис. 1 приведена упрощенная расчетная схема в цилиндрической системе координат, в которой катушка представлена в виде отдельных несвязанных между собой проводящих концентрических колец.

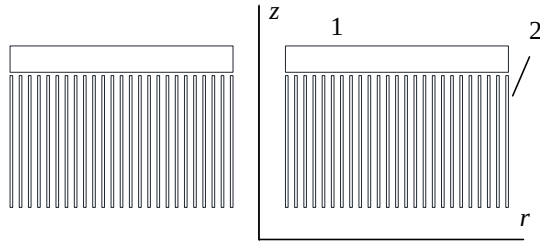


Рис. 1. Расчетная схема индукционно-динамического механизма: 1 – якорь (подвижный диск); 2 – катушка, представленная в цилиндрической системе координат в виде проводящих концентрических колец

Более корректной (но не более точной) была бы трехмерная модель ИДМ. Но расчёт эффектов взаимного влияния токов в витках катушки в 3Д постановке приводит к необходимости «сгущения» расчетной сетки в области каждого витка и на его границах. А с учетом необходимости расчета поля в окружающем пространстве, количество расчетных под областей может достигать нескольких сот тысяч, что в свою очередь, требует значительных объемов оперативной памяти и быстродействия ЭВМ. Аппроксимация переменных в под областях функциями более высокого порядка, чем первый, не спасает положения, так как основная масса расчетных под областей сосредоточена в сечении витков катушки и на их границах и не уменьшает число под областей.

В этой связи и была выбрана расчетная модель, показанная на рис. 1, позволяющая свести объемную задачу к плоской задаче с осевой симметрией (токи катушки и диска не зависят от угловой координаты). Геометрия модели (рис. 1) выбрана с учетом возможностей ЭВМ и временных затрат на решение задачи.

Однако такая модель имеет существенный недостаток. Проблема заключается в том, что витки катушки на рис. 1 представляют собой концентрические кольца, ток в которых зависит от радиуса кольца и его геометрии. Дело в том, что напряженность электрического поля (а, следовательно, и ток витка) определяется как сторонней напряженностью поля, так и наведенной напряженностью электрического поля в витке [6]:

$$\vec{E}_k = -\frac{\partial \vec{A}_k}{\partial t} + \vec{E}_{stk}, \quad (1)$$

где $\vec{E}_k$ – напряженность электрического поля в витке; $-\frac{\partial \vec{A}_k}{\partial t}$ – наведенная напряженность электрического поля; $\vec{E}_{stk}$ – сторонняя напряженность электрического поля.

Очевидно, что с учетом поверхностного эффекта и

за счет взаимного влияния магнитных полей, наведенная напряженность электрического поля будет существенно отличаться от витка к витку. Неодинаковой будет и сторонняя напряженность электрического поля, зависящая от радиуса витка. Поэтому, если не принять специальные меры, то токи в каждом из витков катушек будут существенно различаться.

Схема подключения ИДМ к источнику энергии показана на рис. 2.

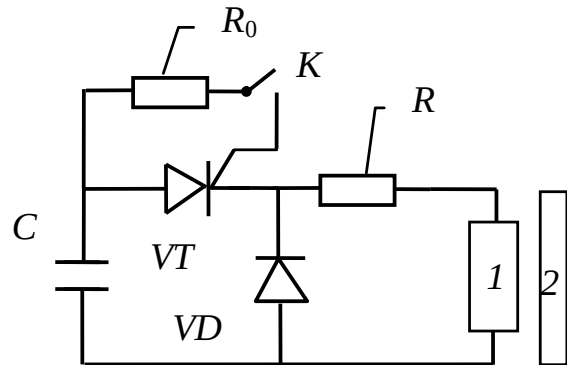


Рис. 2. Электрическая схема подключения ИДМ: где C – накопительный конденсатор; R – сопротивление проводов; 1 – катушка; 2 – диск

При замыкании ключа K конденсатор разряжается на катушку. При нулевом напряжении на конденсаторе диод открывается, обеспечивая рассеяние энергии, накопленной в катушке и не давая конденсатору перезарядиться. Такая схема обеспечивает наиболее полное использование энергии электролитического конденсатора, не допуская его перезаряда. Так как катушка состоит из относительно небольшого числа витков и намотана лентой достаточно большого сечения, то расчетная модель (рис. 2) должна учитывать сопротивление проводов, которое в расчетах было неизменным и равным 10 мОм.

Кроме того, так как максимальное значение электромагнитной силы, действующей на диск, соответствует незначительным (менее 1 мм) перемещениям диска, то в процессе исследования движением диска можно пренебречь.

Следовательно, задача расчета может быть сформулирована следующим образом. Определить значение электромагнитной силы, действующей на неподвижный диск в зависимости от геометрии материала, которой намотана катушка ИДМ при апериодической форме разряда конденсатора и с учётом последовательного подключения проводников в катушке.

Расчетные соотношения. Основным расчетным соотношением является система уравнений нестационарного электромагнитного поля (вид которой зависит от параметров расчетной области), определенных через векторный магнитный потенциал при условии отсутствия поля на внешней границе расчетной области и симметрии поля по оси z

$$\sigma_{jk} \cdot \frac{\partial \vec{A}_j}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \times (\nabla \times \vec{A}_{jk}) = \vec{\delta}_{stjk}, \quad (2)$$

где σ_{jk} – удельная электропроводность материала; $\vec{A}_{jk}$ – векторный магнитный потенциал; μ_0 – абсолютная

магнитная проницаемость; $\bar{\delta}_{stjk} = (i/S_k)$ – сторонняя плотность тока в витке катушки; i – ток в катушке; $k=1..N$ – число витков ленты; S_k – площадь поперечного сечения витка ленты; j – номер расчетной области.

Система уравнений (2) будет различаться для каждой из расчетных областей (воздух, витки катушки, диск).

Для определенности, система уравнений (2) должна быть дополнена уравнением электрической цепи

$$R \cdot \frac{di}{dt} + U = \left(U_{c0} - \frac{q}{C} \right) \cdot \text{delta};$$

$$\frac{dq}{dt} = i,$$
(3)

где R – активное сопротивление проводов; i – ток катушки; U_{c0} – начальное напряжение на конденсаторе; U – напряжение на катушке; q – электрический заряд; delta – ступенчатая функция, моделирующая аperiodический разряд конденсатора

$$\text{delta} = \begin{cases} 1, & U_c > 0 \\ 0, & U_c \leq 0 \end{cases}.$$
(5)

Напряжение на катушке

$$U = \sum_{k=1}^N \frac{1}{S_k \cdot \sigma_k} \cdot \int_{V_k} \delta_k \cdot dV_k,$$
(4)

где V_k – объём витка ленты, которой намотана катушка; N – число витков ленты; σ – проводимость.

Для моделирования последовательного подключения concentрических витков (имитация катушки в цилиндрической системе координат) необходимо выполнение условий

$$\int_{S_k} \bar{\delta}_k \cdot d\bar{S}_k = i, \quad k = 1..N,$$

$$\left(U_{c0} - \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i \cdot dt \right) \cdot \text{delta} - R \cdot i = \sum_{k=1}^N U_k,$$
(6)

где $\sum_{k=1}^N U_k$ – сумма падений напряжения на всех витках катушки.

Начальные условия. Геометрические размеры модели: – толщина ленты – 0,2 мм; высота ленты изменялась от 10 мм до 0,25 мм; расстояние между витками – от 0,5 мм до 0,05 мм в зависимости от числа витков; число витков – 25, 38, 49, 68; толщина диска – 2 мм; радиус диска – 19 мм. Начальное количество витков равнялось 25.

Электрические параметры модели: R – сопротивление проводов 10 мОм; U_{c0} – начальное напряжение заряда конденсатора 400 В; C – ёмкость конденсатора 400 мкФ.

При изменении высоты ленты и числа витков неизменными оставался воздушный зазор между диском и катушкой, радиус катушки был примерно равен радиусу диска.

Результаты расчетов при изменении высоты намоточной ленты. Первыми были проведены расчеты по определению тока, который должен быть оди-

наковым во всех витках катушки. На рис. 3 показан результат такого расчета, где на одном рисунке приведены четыре графика: тока, рассчитанного по уравнениям (3) и токов, как результат интегрирования плотности тока в первом, среднем и последнем витках катушки. Как видно из рис. 3, все токи совпадают, что подтверждает правильность предположений и расчетов по замене concentрических колец на последовательно подключённые витки.

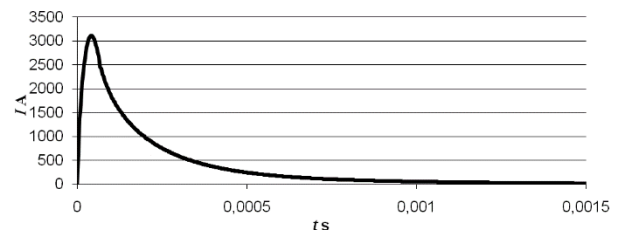


Рис. 3. Токи в первом, среднем и последнем витках катушки

Далее расчеты проводились для следующих значений высоты намоточной ленты: 10; 5; 2,5; 0,25 мм при неизменных остальных параметрах катушки. На рис. 4 показан результат расчета электромагнитной силы, действующей на неподвижный диск.

Сравнительный анализ показывает, что токи катушки при изменении высоты ленты от 10 мм до 2,5 мм определяются реактивным сопротивлением катушки (активное сопротивление увеличилось в четыре раза, а ток уменьшился на 30%). При высоте ленты 0,25 мм характер тока имеет вид разряда конденсатора на активное сопротивление.

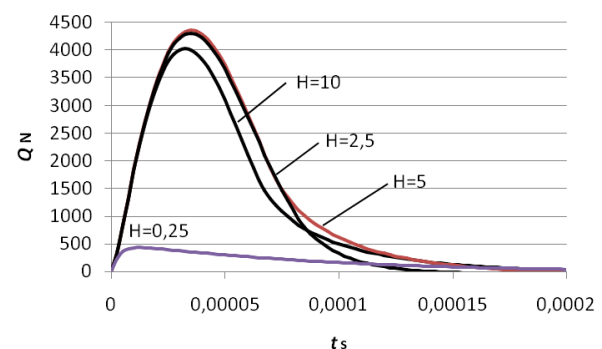


Рис. 4. Значение электромагнитной силы в зависимости от высоты намоточной ленты от 0,25 до 10 мм

Как видно из рис. 4 разница между значениями сил не существенна при изменении высоты ленты от 10 до 2,5 мм. Оптимальная высота ленты 2,5 – 5 мм. Уменьшение в 40 раз высоты намоточной ленты приводит к уменьшению электромагнитной силы примерно в 9 раз, что можно объяснить значительным увеличением активного сопротивления катушки. На рис. 5 показаны графики тока в катушке.

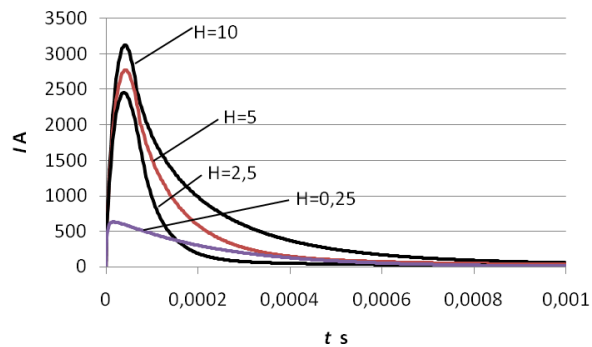


Рис. 5. Токи в катушке в зависимости от высоты ленты от 0,25 до 10 мм

На рис. 6 показаны токи, наводимые в неподвижном (по условиям задачи) диске которые мало зависят от высоты ленты в диапазоне 2,5...10 мм.

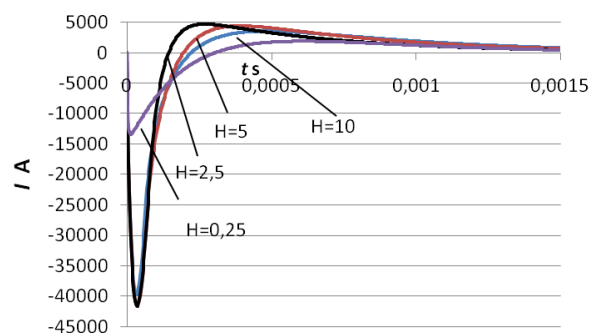


Рис. 6. Значения токов в неподвижном диске

На рис. 7 показано распределение плотности тока по сечению ленты в момент времени достижения силой своего максимума

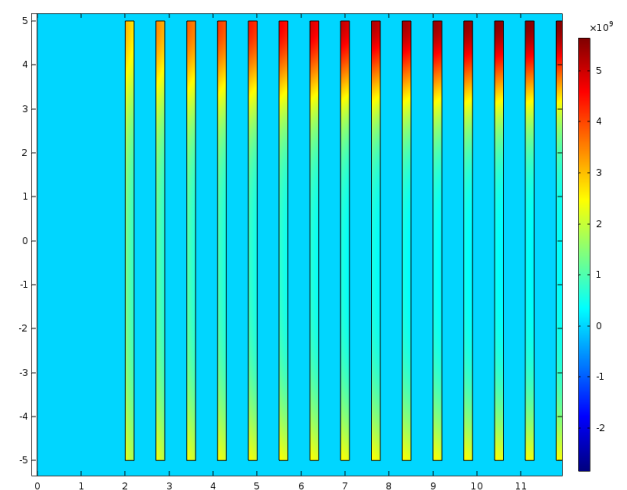


Рис. 7. Распределение плотности тока в момент времени максимума электромагнитной силы

Как следует из рис. 7, неравномерность распределения плотности тока по высоте ленты и радиусу катушки существенна, часть общего тока ленты находится на значительном расстоянии от диска.

Для того чтобы оценить «отталкивающее» действие катушки, одного расчета электромагнитной силы недостаточно. Очевидно, что изменение геометрии ленты, числа витков изменяет активное и реактивное

сопротивление катушки, что в свою очередь, приводит к изменению токов системы и, следовательно, к изменению значения электромагнитной силы. Но изменение параметров катушки приводят и к изменению длительности воздействия силы на диск. Поэтому, для оценки влияния параметров катушки на диск использовалась величина импульса силы, которая определяет динамические характеристики системы, так как квадрат импульса силы пропорционален кинетической энергии диска

$$S = \int_t Q \cdot dt. \quad (7)$$

График импульса силы в функции высоты ленты показан на рис. 8.

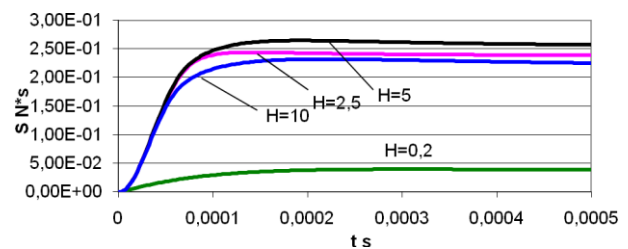


Рис. 8. Импульс силы в функции высоты ленты

Как следует из рис. 8, при принятом количестве витков (25) наиболее оптимальной будет высота ленты равная 5 мм.

Результаты расчетов при изменении числа витков катушки. Одним из параметров, влияющих на значение электромагнитной силы в ИДМ, является число витков, которым намотана катушка.

В качестве базовой была принята следующая конструкция: толщина ленты – 0,2 мм, высота ленты – 10 мм. Количество витков подбиралось из условия примерного равенства радиусов катушки и диска при неизменной толщине намоточной ленты 0,2 мм и расстоянии между витками от 0,5 мм до 0,05 мм.

На рис. 8 показаны значения электромагнитной силы в функции числа витков.

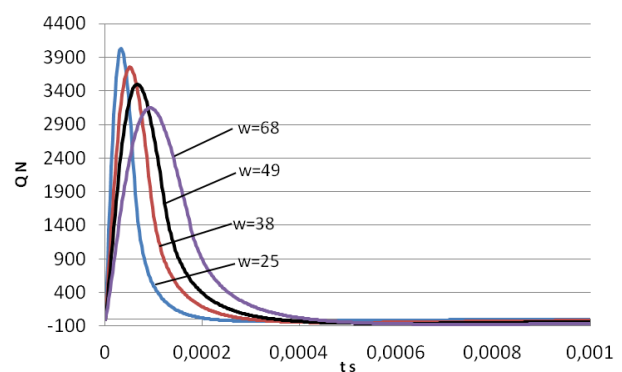


Рис. 8. Зависимость электромагнитной силы в функции числа витков

На рис. 9 Показы значения импульса силы в функции числа витков.

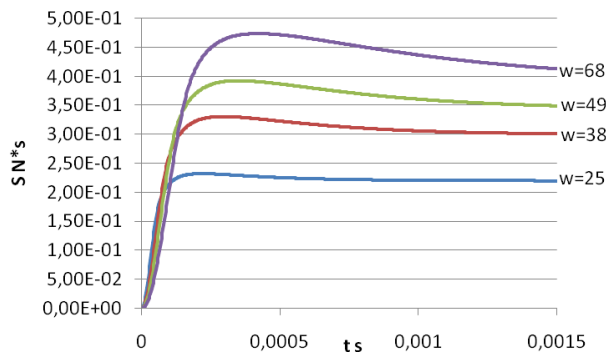


Рис. 9. Значение импульса силы в функции числа витков

Из рис. 9 следует, что увеличение числа витков 2,7 раза увеличивает значение импульса в 2,0 раза при уменьшении электромагнитной силы в 1,28 раза.

Влияние толщины медной ленты на параметры ИДМ. Как правило, толщина ленты, которой намотана катушка, равна 0...0,2 мм. Расчеты катушки при толщине ленты 0,2 мм были проделаны ранее. Поэтому, было рассмотрено два варианта намоточных параметров катушки: высота – 10 мм; толщина ленты – 0,1 мм; толщина межвитковой изоляции изменялась от 0,05 мм до 0,1 мм, что при неизменном радиусе катушки приводит к изменению числа витков катушки от 113 до 85. Результаты расчета показаны на рис. 10-13.

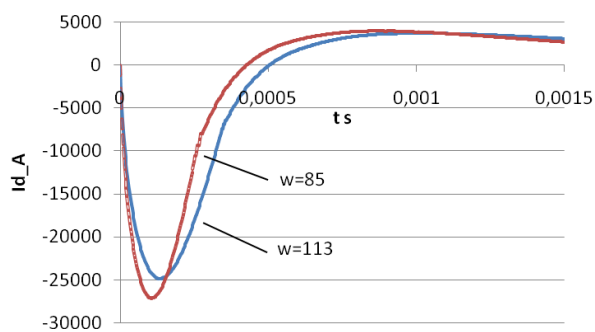


Рис. 10. Токи диска в функции числа витков при толщине ленты 0,1 мм

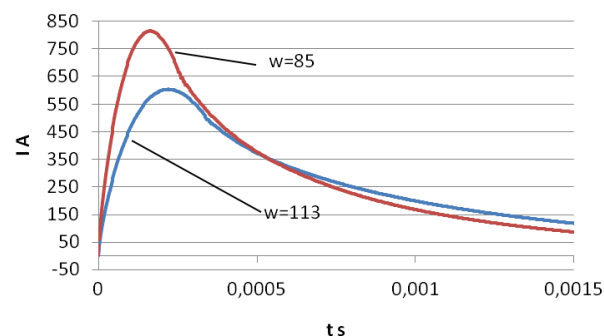


Рис. 11. Ток катушки в функции числа витков при толщине ленты 0,1 мм

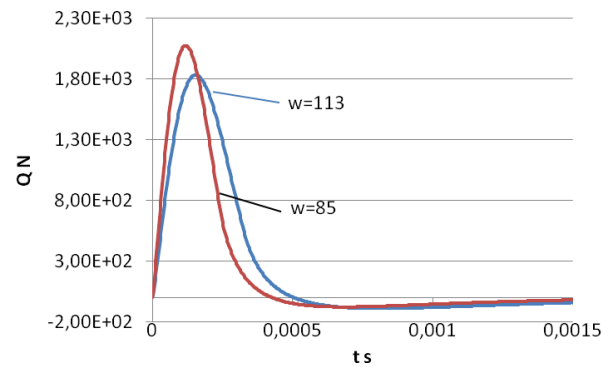


Рис. 12. Электромагнитная сила в функции числа витков при толщине ленты 0,1 мм

Сравнительный анализ рис. 9-13 показывает, что катушки с параметрами намотки, указанными в табл.1, имеют примерно одинаковое значение импульса силы.

Таблица 1. – Параметры намотки

$\Delta_{\text{ленты}}$ мм	$\Delta_{\text{изоляции}}$ мм	w	S H*м
0,2	0,05	68	0,47
0,1	0,05	113	0,44

Причем, в тепловом отношении оба варианта практически равнозначны, так как плотности тока в проводниках практически равны, а сама температура нагрева не превышает полутора градусов за время 0,015 с.

Можно заметить, что равенство импульса силы обеспечивается примерным равенством магнитодвижущей силы катушки, которая равна $6,81 \cdot 10^4$ А и $6,92 \cdot 10^4$ А соответственно.

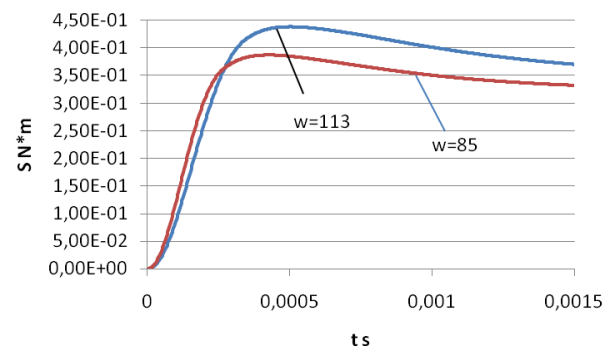


Рис. 13. Импульс в функции числа витков при толщине ленты 0,1 мм

Распределение температуры в катушке. Несмотря на то, что предварительные расчеты свидетельствуют о незначительном нагреве катушки, интерес представляет распределение температуры по высоте ленты и по радиусу катушки.

Расчетные уравнения в пределах каждого из витков представляют собой уравнения нестационарного нагрева твердого тела с внутренними источниками тепла в адиабатическом режиме.

Распределение температуры показано на рис. 14.

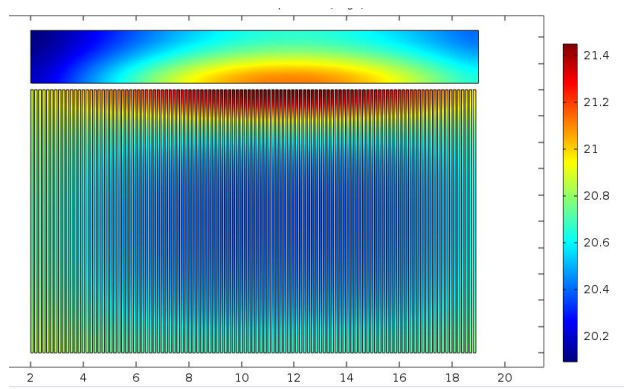


Рис. 14. Распределение температуры по виткам ленты

Из рис. 14 видно, что распределение температуры похоже на распределение плотности тока в витках ленты и неравномерно как по высоте, так и по радиусу катушки.

Расчеты ИДМ в случае намотки катушки круглым проводом. В том случае, когда катушка ИДМ намотана круглым проводом, равномерно распределенным по ее сечению, ее можно представить как однородное тело с малой проводимостью и суммарным током равным произведению тока катушки на число витков. Модель подробно описана в [2]. Расчеты проводились по следующей методике: при постоянной ширине катушки выбирался диаметр провода и число рядов намотки. Рассчитывались значения электромагнитной силы и импульса силы. Частично результаты приведено на рис. 15, а исходные данные показаны в табл. 2.

Таблица 2 – Исходные данные

Диаметр мм	Число рядов/витки			
	1/31	3/92	5/153	7/214
0,5				
1,0	1/15	3/46	5/77	7/107

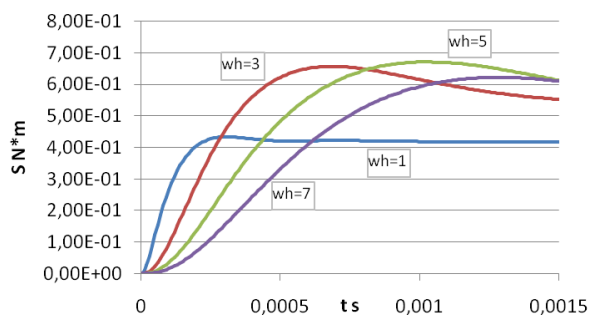


Рис. 15. Зависимость импульса силы при разном количестве рядов намотки и диаметре провода 0,5 мм

На рис. 15 прослеживается явный экстремум значения импульса, который обеспечивает наибольшую кинетическую энергию движения диска

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

где W – кинетическая энергия; S – импульс; m – масса.

На рис. 16 показана зависимость импульса от числа рядов намотки и диаметра провода.

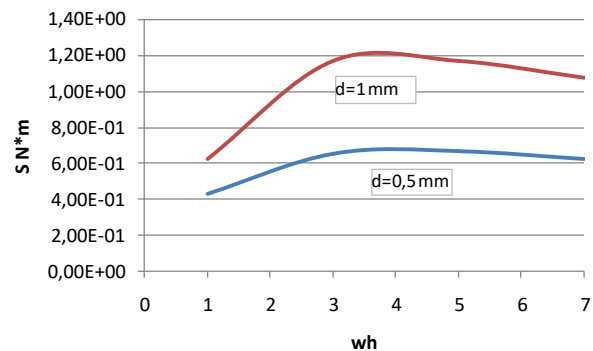


Рис. 15. Зависимость импульса от числа рядов при диаметре провода 0,5 мм и 1 мм

Необходимо отметить, что оптимальное число рядов слабо зависит от диаметра провода (при условии, что сечение провода не менее 0,5 мм²). Увеличение диаметра провода увеличивает значение импульса, но смещает его максимум в сторону меньших времен (при $wh=5$ максимум приходится на время 0,001 с при диаметре провода 0,5 мм и на время 0,00055 с при диаметре провода 1 мм).

Выводы.

1. Проверена модель, позволяющая математически представить ряд концентрических проводящих колец спиралью Архимеда, что даёт возможность проводить расчеты катушек, намотанных медными шинами и лентой в цилиндрической системе координат.

2. Высота ленты в диапазоне от 2,5 мм до 10 мм слабо влияет на параметры ИДМ.

3. Увеличение поперечного сечения проводника и уменьшение числа витков увеличивает значение импульса, но при этом его максимальное значение смещается в сторону меньших времен (ударная нагрузка). Что при достаточно большой инерционности диска отрицательно сказывается на динамических характеристиках системы.

4. Наиболее оптимальным вариантом (при скоростях движения диска порядка 5...7 м/с) представляется намотка катушки проводом диаметром 0,7 мм с числом витков порядка 100...120. При этом якорь получает достаточную скорость, а ударная нагрузка уменьшается по сравнению с другими рассмотренными вариантами.

Список литературы

1. Болух В.Ф., Кашанский Ю.В., Шукун И.С. Влияние геометрических параметров индуктора и якоря на показатели линейного импульсного электрохимического преобразователя электродинамического типа. *Электротехника і електромеханіка*, –2019. – №3. – С. 11–17. doi: 10.20998/2074-272X.2019.3.02
2. Байда Е.И. Математическое моделирование индукционно-динамических систем. *Электротехніка і електромеханіка*, 2009. - №5. – С. 13–16.
3. Bissal A. Licentiate thesis on the design of ultra-fast electro-mechanical. Electromagnetic Engineering School of Electrical Engineering, KTH Stockholm, Sweden. 2013. 120 p. doi: 10.1109/INTMAG.2017.8008035.
4. Weijie Wen, Yulong Huang, Member, IEEE, Mohmmad Al-Dweikat, Zu'an Zhang, Tiehan Cheng, Shutong Gao and Weidong Liu. Research on Operating Mechanism for Ultra-

- fast 40.5kV Vacuum Switches. IEEE Power & Energy Society, 24 March 2015. P. 2553–2560. doi: 10.1109/TPWRD.2015.2409122.
5. Теория электрических аппаратов. Учебник для вузов по спец. "Электрические аппараты" / Г.Н. Александров, В.В. Борисов, В.А. Иванов и др. Под ред. проф. Г.Н. Александрова. – М.: Высшая школа, 1985. 312 с.
 6. Рамо С., Уинерри Дж. Поля и волны в современной радиотехнике. Перевод с английского. Москва, ОГИЗ, 1948. 631 с.

References (transliterated)

1. Boliukh V.F., Kashanskii Iu.V., Shchukin I.S. *Vliianie geometricheskikh parametrov induktora i iakoria na pokazateli lineinogo impul'snogo elektromekhanicheskogo preobrazovatel'ia elektrodinamicheskogo tipa*. [The influence of the geometric parameters of the inductor and the armature on the performance of a linear pulse electromechanical transducer of electrodynamic type] *Elektrotehnika i elektromekhanika*, – 2019. – №3. – P. 11–17. doi: 10.20998/2074-272X.2019.3.02
2. Baida E.I. *Matematicheskoe modelirovanie induktsionno-dinamicheskikh sistem*. [Mathematical modeling of induction-dynamic systems]. *Elektrotehnika i elektromekhanika*, 2009. №5, p.p. 13–16.
3. Bissal A. *Licentiate thesis on the design of ultra-fast electromechanical*. [Licentiate thesis on the design of ultra-fast electromechanical]. Electromagnetic Engineering School of Electrical Engineering, KTH Stockholm, Sweden. 2013. 120 p. doi: 10.1109.INTMAG.2017.8008035.
4. Weijie Wen, Yulong Huang, Member, IEEE, Mohammad Al-Dweikat, Zu'an Zhang, Tichan Cheng, Shutong Gao and Weidong Liu. *Research on Operating Mechanism for Ultra-fast 40.5kV Vacuum Switches*. [Research on Operating Mechanism for Ultra-fast 40.5kV Vacuum Switches]. IEEE Power & Energy Society, 24 March 2015, p.p. 2553–2560. doi: 10.1109/TPWRD.2015.2409122.
5. *Teoriia elektricheskikh apparatov. Uchebnik dlia vtuzov po spets. "Elektricheskie apparaty"*. [Theory of electrical apparatus. Textbook for high schools on special. "Electrical apparatus"]. G.N. Aleksandrov, V.V. Borisov, V.A. Ivanov i dr. Pod red. prof. G.N. Aleksandrova. – Moscow: Vysshiaia shkola, 1985. 312 p.
6. Ramo S., Uinerrri Dzh. *Polia i volny v sovremennoi radio-tekhnikе*. [Fields and waves in modern radio engineering]. Perevod s angliiskogo. Moskow, OGIZ, 1948. 631 p.

Поступила (received) 10.01.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Байда Євген Іванович (Байда Евгений Иванович, Baida Evgen Ivanovich) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри електричних апаратів, м. Харків, тел/phone +38 096 187 77 07, e-mail: baida.kpi@gmail.com

Л.Б. ЖОРНЯК, О.І. АФАНАСЬЄВ, В.О. ПОЛЯКОВ, Ж.О. КУЛІК, Р.В. КОТ, І.О. КРАВЕЦЬ

ОСОБЛИВОСТІ ОБРАННЯ ТЕОРЕТИЧНОГО ЗАКОНУ РОЗПОДІЛУ ПРИ ОЦІНЦІ НАДІЙНОСТІ ЗОВНІШНЬОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ГАЗОНАПОВНЕНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

В статті авторами запропонований метод оцінки параметрів теоретичних розподілів для розрахунку показників експлуатаційної надійності твердої ізолюючої структури високовольтних апаратів, що являє собою підтримуючу ізолюючу кришку для вимірювальних високовольтних трансформаторів, заповнених газом в якості ізолюючої рідини. Ця методика дозволяє оцінити параметри нового закону розподілу, який обирається за умови, що він не суперечить існуючим законом розподілу з його відомими параметрами. Розроблена методика дозволяє отримати значення показників експлуатаційної надійності високовольтного обладнання шляхом визначення параметрів теоретичних розподілів, якщо розробник має дані експериментальних досліджень або статистичну інформацію в результаті моніторингу роботи ізоляційних конструкцій з урахуванням реальних умов експлуатації саме таких високовольтних пристроїв. Це дає можливість врахувати вплив зовнішніх факторів і експлуатаційних характеристик, властивих вимірювальним трансформаторам, як струму, так і напруги. У запропонованій методиці як приклад розглядається опорний ізоляційний кожух, що знаходиться під час експлуатації в найбільш несприятливих умовах, таких як зовнішнє забруднення, зволоження, перенапруження та ін. Теоретичні висновки підтверджуються результатами розрахунків на прикладі конструкції трансформатора струму серії ТОГ-362. Більш точне визначення ефективності запропонованої методики прогнозування параметрів теоретичних законів розподілу можна досягти проведенням додаткової серії розрахунків та експериментальних випробувань конкретних ізоляційних конструкцій. Таким чином, був зроблений висновок про можливість використання отриманих результатів для оцінки показників експлуатаційної надійності як газонаповнених вимірювальних трансформаторів, так і аналогічного високовольтного обладнання.

Ключові слова: теоретичний закон розподілу, математичне очікування, дисперсія, густина розподілу, напрацювання до відмови, ізоляційна покривка, газонаповнений трансформатор струму, напруга перекриття, коефіцієнт варіації.

Л.Б. ЖОРНЯК, А.И. АФАНАСЬЕВ, В.А. ПОЛЯКОВ, Ж.О. КУЛИК, Р.В. КОТ, И.А. КРАВЕЦ

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ ВНЕШНЕЙ ИЗОЛЯЦИИ ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В статье авторами предложен метод оценки параметров теоретических распределений для расчёта показателей эксплуатационной надёжности твёрдой изолирующей структуры высоковольтных аппаратов, что представляет собой поддерживающую изолирующую крышку измерительных высоковольтных трансформаторов, заполненных газом в качестве изолирующей жидкости. Эта методика позволяет оценить параметры нового закона распределения, который избирается при условии, что он не противоречит существующему закону распределения с его известными параметрами. Разработанная методика позволяет получить значения показателей эксплуатационной надёжности высоковольтного оборудования путём определения параметров теоретических распределений, если разработчик данные экспериментальных исследований или статистическую информацию в результате мониторинга работы изоляционных конструкций с учётом реальных условий эксплуатации именно таких высоковольтных устройств. Это даёт возможность учесть влияние внешних факторов и эксплуатационных характеристик, присущих измерительным трансформаторам, как тока, так и напряжения. В предлагаемой методике качестве примера рассматривается опорный изоляционный кожух, находящийся при эксплуатации в наиболее неблагоприятных условиях, таких как внешнее загрязнение, увлажнение, перенапряжение и др. Теоретические выводы подтверждаются результатами расчётов на примере конструкции трансформатора тока серии ТОГ-362. Более точное определение эффективности предложенной методики прогнозирования параметров теоретических законов распределения можно достичь путём проведения дополнительной серии расчётов и экспериментальных испытаний конкретных изоляционных конструкций. Таким образом, был сделан вывод о возможности использования полученных результатов для оценки показателей эксплуатационной надёжности как газонаполненных измерительных трансформаторов, так и аналогичного высоковольтного оборудования.

Ключевые слова: теоретический закон распределения, математическое ожидание, дисперсия, плотность распределения, наработка до отказа, изоляционная покрывка, газонаполненный трансформатор тока, напряжение перекрытия, коэффициент вариации.

L.B. ZHORNIAK, A.I. AFANASIEV, V. POLIAKOV, Z.O. KULIK, R.V. KOT, I.O. KRAVETS

PECULIARITY OF THEORETICAL DISTRIBUTION LAW SELECTION BY GAS-INSULATED TRANSFORMERS EXTERNAL ISOLATION CALCULATION

In the article, the authors propose a method for estimating the parameters of theoretical distributions for calculating the indicators of operational reliability. In the article, the authors propose a method for estimating the parameters of theoretical distributions for calculating the indicators of the operational reliability of a solid insulating structure of high-voltage devices. Which is a supporting insulating cover for high voltage instrument transformers filled with gas as an insulating liquid. This technique makes it possible to estimate the parameters of a new distribution law, which is chosen on the condition that it does not contradict the existing distribution law with its known parameters. The developed technique makes it possible to obtain the values of the indicators of the operational reliability of high-voltage equipment by determining the parameters of theoretical distributions, if the developer is the data of experimental studies or statistical information as a result of monitoring the operation of insulating structures, taking into account the actual operating conditions of such high-voltage devices. This makes it possible to take into account the influence of external factors and performance characteristics inherent in instrument transformers, both current and voltage. In the proposed methodology, as an example, a supporting insulating casing is considered, which is during operation in the most unfavorable conditions, such as external pollution, humidification, overvoltage, etc. The theoretical conclusions are confirmed by the results of calculations using the example of the design of a current transformer of the ТОГ-362 series. A more accurate determination of the effectiveness of the proposed method for predicting the parameters of theoretical distribution laws can be achieved by performing an additional series of calculations and experimental tests of specific insulating structures. Thus, it was concluded that it is possible to use the results obtained to assess the operational reliability of both gas-filled instrument transformers and similar high-voltage equipment.

Keywords: intensity distribution, external isolator, semiconductor covering, screen, capacity.

Вступ. Відомо, що надійність ізоляційної конструкції (ІК) апаратів високої напруги, зазвичай розглядається як властивість виробу виконувати певні завдані функції. При цьому пристрій має зберігати власні експлуатаційні показники та параметри у встановлених межах впродовж завданого проміжку часу. Особливим параметром таких пристроїв також є надійність ІК, що характеризується такими показниками, як, наприклад, пробивна або розрядна напруга, робоча напруженість поля та інші. Для окремої ІК, наприклад, прохідного або опорного ізолятора, або опорної ізоляційної покришки газонаповненого вимірювального трансформатора та інших, надійність характеризується такими показниками, як напрацювання до відмови, термін служби, які, насамперед, залежать від якості матеріалу, товщі ізоляції, електричного, теплового, механічного навантаження тощо [1, 2].

Як саме перераховані чинники впливають на термін служби ізоляційної конструкції визначити майже неможливо через технічні та технологічні особливості кожного високовольтного пристрою. Але ж можна зробити приблизне оцінювання, що, в свою чергу, має тій або інший рівень ймовірності. За таких умов критерієм оцінювання надійності можуть бути такі характеристики, як ймовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмов та густина ймовірності відмов. Всі зазначені вище характеристики надійності між собою пов'язані простими математичними співвідношеннями, які визначені для обраного теоретичного закону розподілу випадкової величини, наприклад напрацювання до відмови або напруги перекриття.

Автори робіт [1, 2], навели результати досліджень, які проводились для обладнання розподільних пристроїв високої напруги, зокрема вимірювання розрядних напруг ізоляторів, що були забруднені у природних умовах. Ці результати довели, що розкид цих напруг можна описати нормальним або усіченим нормальним законом розподілу. Але при оцінюванні кількості перекриттів лінійної ізоляції в нормальному експлуатаційному режимі авторам доводилось оперувати дуже малими ймовірностями перекриття, для яких твердження про нормальний закон розподілу розрядних напруг експериментально підтвердити дуже важко. Можливість усічення зліва графіка функції густини розподілу для теоретичних законів розподілу ймовірностей перекриття у нормальному експлуатаційному режимі дозволила використовувати як усічений нормальний, так і логарифмічно-нормальний закони розподілу для теоретичної оцінки показників надійності високовольтного обладнання [2, 3].

Мета роботи. Розробка методики прогнозування параметрів теоретичних законів розподілу задля визначення показників експлуатаційної надійності високовольтного обладнання на підставі даних експериментальних досліджень або статистичної інформації, що отримані на основі моніторингу роботи ізоляційних конструкцій в реальних умовах експлуатації, є метою цієї роботи.

Розглянемо ізоляційні конструкції газонаповнених вимірювальних трансформаторів серій ТОГ та НОГ в якості високовольтного обладнання. Автори робіт [1, 3, 13, 14] стверджують, що навіть за нормальних робочих умов ізоляційні конструкції перебувають в умовах різко неоднорідних електричних полів. Тож, опорно-ізоляційні покришки цих газонаповнених трансформаторів відчувають вплив саме цього режиму роботи. Загальний вид ізоляційної покришки трансформатора струму серії ТОГ показано на рис. 1 [11]. Для визначення його показників надійності роботи спочатку застосуємо нормальний закон розподілу, для чого необхідно мати значення таких параметрів: середньо-квадратичного відхилення σ_n та математичного очікування m_{U_n} .

У цьому випадку значення середньо-квадратичного відхилення σ_n розподілу напруг перекриття за умови застосування нормального закону розподілу можливо визначити таким чином [3]:

$$\frac{\sigma_n}{U_{\text{пер}}} = K_B = (0,03 \dots 0,06), \quad U_{\text{пер}} = E_{\text{ср.д}} \cdot l_{\text{вит}}, \quad (1)$$

де $U_{\text{пер}}$ – напруга перекриття покришки за умови максимального зволоження (знаходження під дощем);

K_B – коефіцієнт варіації, найбільші значення якого відповідають ізоляції з підвищеним забрудненням зовнішній поверхні;

$E_{\text{ср.д}}$ – середня напруженість поля уздовж шляху витoku при перекритті ізолятора під дощем (в залежності від типу забруднення та категорії розміщення обладнання має значення в межах від $25 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$ до $60 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$ [3, 13, 14];

$l_{\text{вит}}$ – довжина шляху витoku по зовнішній поверхні ізоляційної покришки.

В якості критичного значення напруги перекриття можливо використовувати напругу виникнення поверхневих часткових розрядів U_n у вигляді появи ковзкого розряду. Її значення визначається за умовою [4, 5]

$$U_n = \frac{7,8}{C_n^{0,44}},$$

де C_n – питома поверхнева ємність $\frac{\Phi}{\text{м}^2}$, значення якої для циліндричної ізоляційної конструкції покришки (див. рис.1, б) може бути визначене формулою:

$$C_n = \frac{\epsilon_d \cdot \epsilon_0}{r_2 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}},$$

де ϵ_d – відносна діелектрична проникність покришки;

ϵ_0 – постійне значення, що дорівнює $8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$;

r_1, r_2 – відповідно внутрішній та зовнішній радіуси циліндричного твердого діелектрика покришки.

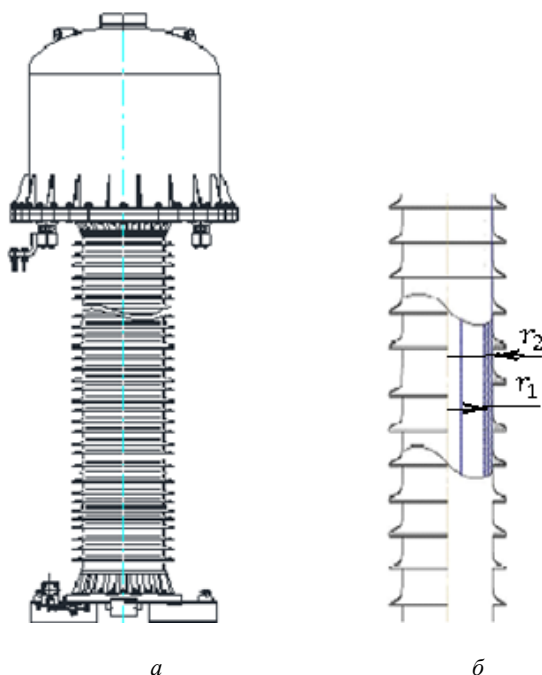


Рис.1. Загальний вид трансформатора (а) та опорно-ізоляційної покриття (б) вимірювального трансформатора струму серії ТОГ-362

Для перевірки можливості застосування логарифмічно-нормального закону розподілу виникає необхідність проведення додаткових досліджень щодо визначення його параметрів задля з'ясування відповідності його нормальному розподілу з означеними вище параметрами. Аналіз теоретичних законів розподілу, що досліджуються, зручно проводити на основі порівняння основних характеристик надійності [6-8], а саме такими, як густина розподілу відмов (напруг перекриття) $f(U)$ та ймовірність безвідмовної роботи $P(U)$, значення яких для логарифмічно-нормального закону розподілу можливо оцінити за такими умовами [7, 8]:

$$f_L(U) = \frac{1}{S \cdot U \sqrt{2\pi}} \exp \left[-0,5 \left(\frac{\ln U - m_L}{S} \right)^2 \right], \quad (2)$$

$$P_L(U) = 0,5 - \Phi \left(\frac{\ln U - m_L}{S} \right), \quad (3)$$

де m_L , S – параметри логарифмічно-нормального закону розподілу.

Для нормального закону розподілу головні характеристики надійності визначаються за умовами:

$$f_H(U) = \frac{1}{\sigma_U \sqrt{2\pi}} \exp \left[-0,5 \left(\frac{U - m_U}{\sigma_U} \right)^2 \right], \quad (4)$$

$$P_H(U) = 0,5 - \Phi \left(\frac{U - m_U}{\sigma_U} \right), \quad (5)$$

де m_U , σ_U – параметри нормального закону розподілу; Φ – нормована функція Лапласа.

Оцінку параметрів законів розподілу, що розглядаються, можливо здійснити за умовою рівнозначності двох перших моментів розподілів, тобто математичного очікування та дисперсії [9]. Параметри логарифмічно-нормального закону розподілу, який в подальшому буде відповідати нормальному розподілу з параметром σ_{U_H} , значення якого можливо оцінити за умовою (1) внаслідок

рівнозначності їх математичних очікувань та дисперсії, визначаються наступним чином. Для логарифмічно-нормального закону розподілу математичне очікування m_{U_H} та дисперсія σ_{U_H} визначаються за умови [9]:

$$\sigma_L^2 = \exp(2m + S^2) [\exp(S^2) - 1],$$

$$m_{U_L} = \exp \left(m + \frac{S^2}{2} \right). \quad (6)$$

Для нормального закону розподілу з урахуванням (1) можна записати:

$$\sigma_{U_H} = K_B \cdot U_{\text{пер}}; \quad m_{U_H} = 1,1 U_{\text{пер.д}}, \quad (7)$$

де $U_{\text{пер.д}}$ – напруга перекриття ізоляційної покриття під дощем, кВ [10].

Якщо поділити дисперсію на математичне очікування та провести необхідні перетворювання, то для обох законів розподілу можливо отримати:

$$\frac{\sigma_U^2}{m_U} = \exp(S^2) - 1 = 3 \cdot 10^{-3}. \quad (8)$$

Рівняння (8) можна вирахувати побудовою графіку (рис. 2), тобто, обираючи різні значення параметру розподілу S . Таким чином розраховується та будується графік функції виду:

$$Y_1 = \exp(S^2) - 1. \quad (9)$$

Точка збігання функції Y_1 та незмінного значення $Y_2 = 3 \cdot 10^{-3}$ надає можливість отримати значення параметру S логарифмічно-нормального закону розподілу, яке відповідає нормальному закону з визначеними вище параметрами. Результати цих викладень показано на рис. 2.

Другий параметр логарифмічно-нормального закону m визначається за умови рівнозначності математичних очікувань законів розподілу, що розглядаються, згідно з (6) та (7):

$$\exp \left(m + \frac{S^2}{2} \right) = U_{\text{пер}},$$

$$m = \ln U_{\text{пер}} - \frac{S^2}{2}.$$

Задля підтвердження вище наведених доводів про відповідність теоретичних законів розподілу, які розглядаються, завдяки розробленій методикі, в роботі наводяться розрахунки параметрів розподілу для опорно-ізоляційній покриття газонаповненого трансформатора струму серії ТОГ-362 (див. рис.1). Початкові дані та поточні розрахунки, які отримані за вище зазначеною методикою, наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Параметри нормального та логарифмічно-нормального законів розподілів

$U_{\text{ном}}$, кВ	$U_{\text{пер}}$, кВ	K_B	σ_{U_H}	S	m
330	398	0,06	24	$3 \cdot 10^{-3}$	5,985

Обираючи різні значення параметру S логарифмічно-нормального закону розподілу розраховується функція Y_1 згідно з (9) та будуються графіки функцій Y_1 та Y_2 , які наведені на рис. 2. Точка перетину отриманих графічних залежностей дає значення параметру S логарифмічно-нормального закону розподілу, численне значення якого приведено у табл. 1.

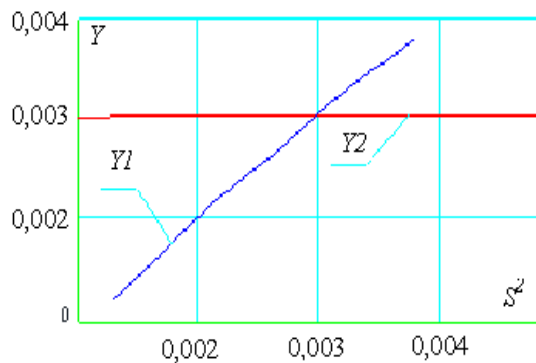


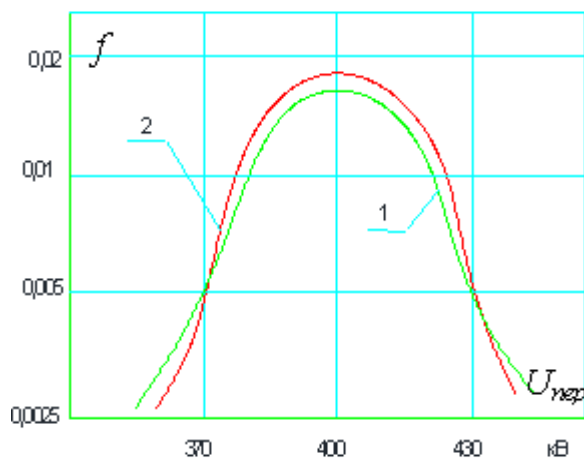
Рис. 2. Графічне визначення параметру S логарифмічно-нормального закону розподілу

Значення другого параметру m логарифмічно-нормального розподілу можливо визначити на основі умови (2) наступним чином:

$$m = \ln m_U - \frac{s^2}{2} = \ln 398 - \frac{3 \cdot 10^{-3}}{2} = 5,985$$

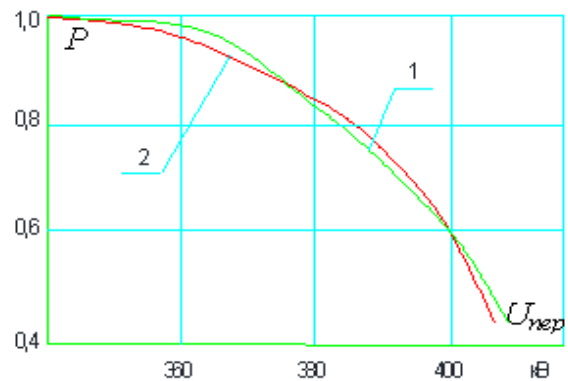
На основі отриманих значень параметрів, а також виходячи з умови адекватності законів розподілу, що розглядаються на основі формул (2)-(5) визначаються їх функції густини розподілу $f(U_{\text{пер}})$ та ймовірності безвідмовної роботи $P(U_{\text{пер}})$, які приведені на рис.3 та рис. 4.

Висновки. Аналіз отриманих графічних залежностей (див. рис. 3 та рис. 4) дозволяє зробити наступні висновки. Функції густини нормального закону розподілу та логарифмічно-нормального закону, що йому відповідає, мають близькі значення. Причому, найбільше співпадіння отриманих даних має місце на робочому відрізку, тобто в зоні номінальної напруги, що підтверджує обґрунтовану вище відповідність теоретичних законів розподілу, що розглядаються.



1 – нормальний; 2 – логарифмічно-нормальний.

Рис.3 Функції густини розподілу для теоретичних законів розподілу, що розглядаються



1 – нормальний; 2 – логарифмічно-нормальний.

Рис. 4. Функції розподілу ймовірності безвідмовної роботи для теоретичних законів розподілу, що досліджуються

Функції ймовірності безвідмовної роботи, що отримані розрахунком з використанням нормального та логарифмічно-нормального законів розподілу в умовах рівнозначності їх дисперсій та математичних очікувань мають достатньо близькі значення. Знакозмінну похибку можливо пояснити як наслідок похибок при проведенні аналітичних розрахунків та припущень, що приймаються при обранні початкових даних та врахування реальних умов експлуатації ізоляційної конструкції трансформатора струму.

Розроблена методика дозволяє здійснити визначення показників експлуатаційної надійності високовольтного обладнання шляхом визначення параметрів теоретичних розподілів, як що є дані експериментальних досліджень або статистична інформація на основі моніторингу роботи ізоляційних конструкцій в реальних умовах експлуатації.

Більш точного визначення ефективності вищезазначеної методики прогнозування параметрів теоретичних законів розподілу можна досягти проведенням додаткової серії розрахунків та експериментальних випробувань конкретних ізоляційних конструкцій.

Список літератури

- 1 Мархелев С.Д. Выбор и эксплуатация изоляции в районах с загрязненной атмосферой. С.Д. Мархелев, Е.А. Соломоник. - Энергоатомиздат, 1983. – 120с.
- 2 Мархелев С.Д. Изоляция линий и подстанций в районах с загрязненной атмосферой. С.Д. Мархелев, Е.А. Соломоник. - Л.: Энергия, 1873. – 248с.
- 3 Александров, Г. Н. Изоляция электрических аппаратов высокого напряжения: учеб. / Г. Н. Александров, В. Л. Иванов. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 208 с.
- 4 Дмитриевский В. С. Расчет и конструирование электрической изоляции: учеб. / В. С. Дмитриевский. – М.: Энергоиздат, 1981. – 392 с.
- 5 Справочник по электрическим аппаратам высокого напряжения/ Под ред.В.В.Афанасьева. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 544 с.
- 6 Барлоу Р. Математическая теория надежности. Пер. с англ. Р. Барлоу, Ф. Прошан. – М.: Советское радио, 1969.
- 7 Теория надежности радиоэлектронных систем в примерах и задачах. /Под ред. Г.В.Дружинина. – М.:Энергия, 1976. – 448 с.
- 8 Гук Ю.Б. Теория надежности в электроэнергетике. Ю.Б. Гук. - Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 208 с.
- 9 Афанасьев А.И. К вопросу выбора закона распределения отказов при расчете надежности тиристорных устройств РПН.

- //Надежность и контроль качества, 1980, №7. – с.18-22.
- 10 Ушаков, В. Я. Изоляция установок высокого напряжения / В. Я. Ушаков. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 496 с.
 - 11 КО «Запорожский завод высоковольтной аппаратуры» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.zva.zp.ua>.
 - 12 Жорняк, Л.Б. К вопросу об улучшении качества внутренней изоляции высоковольтных измерительных трансформаторов [Текст] / Л.Б.Жорняк, О.Г.Волкова, М.А.Макогон // Вісник Національного технічного університету ХПІ, 2017 - №34(1256) – с.19-25.
 - 13 Возможности компенсации напряженности электрического поля внешней изоляции высоковольтных газонаполненных трансформаторов тока [Текст] / Л.Б. Жорняк, А.И. Афанасьев, Р.С. Леонов, А.В. Карпук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – №34 (1256). – С. 14–18. Библиогр.: 25 назв. – ISSN 2079-3944.
 - 14 Особливості регулювання напруженості електричного поля уздовж зовнішньої ізоляції газонаповнених трансформаторів напруги [Текст] / Л.Б. Жорняк, О.І. Афанасьєв, Щусь В.М. і др. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х. : НТУ «ХПІ», 2019. – №2'2019 – С. 13–17. Библиогр.: 11 назв. – ISSN 2079-3944.
 - 5 Spravochnik po elektricheskim apparatam vysokogo napryazheniya. Pod red. V.V. Afanas'yeva. – L.: Energoatomizdat, 1987. – 544 p.
 - 6 Barlou R. Matematicheskaya teoriya nadezhnosti. Per. s angl. R. Barlou, F. Proshan. – Moscow: Sovetskoye radio, 1969.
 - 7 Teoriya nadezhnosti radioelektronnykh sistem v primerakh i zadachakh. Pod red. G.V. Druzhinina. – Moscow: Energiya, 1976. – 448 p.
 - 8 Guk YU.B. Teoriya nadezhnosti v elektroenergetike. YU.B. Guk. – L.: Energoatomizdat, 1990. – 208 p.
 - 9 Afanas'yev A.I. K voprosu vybora zakona raspredeleniya otkazov pri raschete nadezhnosti tiristornykh ustroystv RPN. *Nadezhnost' i kontrol' kachestva*, 1980, no 7. pp. 18-22.
 - 10 Ushakov, V. YA. Izolyatsiya ustanovok vysokogo napryazheniya. V. YA. Ushakov. – Moscow: Energoatomizdat, 1994. – 496 p.
 - 11 КО «Запорожский завод высоковольтной аппаратуры» [Elektronnyy resurs] – Rezhim dostupa: <http://www.zva.zp.ua>.
 - 12 Zhornyak L.B. K voprosu ob uluchshenii kachestva vnutenney izolyatsii vysokovol'tnykh izmeritel'nykh transformatorov [Tekst] L.B.Zhornyak, O.G.Volkova, M.A.Makogon. *Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu KHPi*, 2017 – no 34 (1256) – pp.19-25.
 - 13 Vozmozhnosti kompensatsii napryazhennosti elektricheskogo polya vneshney izolyatsii vysokovol'tnykh gazonapolnennykh transformatorov toka [Tekst] L.B. Zhornyak, A.I. Afanas'yev, R.S. Leonov, A.V. Karpuk. *Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu "KHPi". Seriya: Problemi udoskonallennya yelektrichnikh mashin i aparativ.* – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – no 34 (1256). – pp. 14–18. Bibliogr.: 25 nazv. – ISSN 2079-3944.
 - 14 Osoblivosti reguluvannya napruzenosti yelektrichnogo polya uzdovzh zovnishn'oi izolyatsii gazonapovnenikh transformatoriv naprugi [Tekst]. L.B. Zhornyak, O.I. Afanas'yev, Shchus' V.M. *Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu "KHPi". Seriya: Problemi udoskonallennya yelektrichnikh mashin i aparativ. Teoriya i praktika.* – Kharkiv : NTU "KhPI", 2019. – no 2'2019 – pp. 13–17. Bibliogr.: 11 nazv. – ISSN 2079-3944.

References (transliterated)

Надійшла (received) 09.10.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the authors

Жорняк Людмила Борисівна (Жорняк Людмила Борисовна, Zhorniak Liudmyla Borisivna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», доцент кафедри електричних та електронних апаратів; м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1417-4859>; e-mail: zporoton@zntu.edu.ua

Афанасьєв Олексій Іванович (Афанасьев Алексей Иванович, Afanasiev Alexej Ivanovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», доцент кафедри електричних та електронних апаратів; м. Запоріжжя, Україна; e-mail: lxafanasiev@gmail.com

Поляков Валерій Олександрович (Поляков Валерий Александрович, Poliakov Valerii) – студент кафедри електричних та електронних апаратів, м. Запоріжжя, Україна; e-mail: polyacoff1997@mail.ru

Кулік Жанна Олексівна (Кулик Жанна Олеговна, Kulyk Zhanna) – студентка кафедри електричних та електронних апаратів, м. Запоріжжя, Україна; e-mail: zhanna.kulik1992@gmail.com

Кот Роман Віталійович (Кот Роман Витальевич, Kot Roman) – студент кафедри електричних та електронних апаратів, м. Запоріжжя, Україна; romankot206@gmail.com

Кравець Ігор Олександрович (Кравец Игорь Александрович, Kravets Igor) – студент кафедри електричних та електронних апаратів, м. Запоріжжя, Україна; e-mail: igorcravets@gmail.com

Є.Ю. ЗОРІН, О.О. ЧЕПЕЛЮК, Ю.С. ГРИЩУК

КЛАСИФІКАЦІЯ ОДНОФАЗНИХ РЕЛЕ КОНТРОЛЮ НАПРУГИ ПОБУТОВИХ СПОЖИВАЧІВ З ОГЛЯДУ НА ТЕНДЕНЦІЇ ЇХ РОЗВИТКУ

В статті наведено класифікацію однофазних реле контролю напруги для захисту побутових споживачів електричної енергії від неприпустимих відхилень напруги в мережі живлення. Виділено такі ознаки класифікації реле контролю напруги як: конструктивне виконання, номінальна потужність, наявність регулювання параметрів, порого спрацьовування по напрузі, тип індикації стану, наявність вбудованого внутрішнього захисту реле, наявність додаткових функцій, вид вихідного комутаційного елемента тощо. Проведена класифікація систематизує інформацію щодо конструктивних, технічних і функціональних особливостей та параметрів таких реле і демонструє сучасний рівень технічного розвитку вищезазначених реле. Авторами зроблений висновок про тенденції та напрямки розвитку можливостей реле контролю напруги в майбутньому.

Ключові слова: однофазне реле контролю напруги, електропобутова техніка, захист електричних мереж від відхилень напруги, перенапруга, недостатня напруга, коливання напруги в електричній мережі.

Е.Ю. ЗОРИН, А.А. ЧЕПЕЛЮК, Ю.С. ГРИЩУК

КЛАССИФИКАЦИЯ ОДНОФАЗНЫХ РЕЛЕ КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ БЫТОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ УЧИТЫВАЯ ТЕНДЕНЦИИ ИХ РАЗВИТИЯ

В статье приведена классификация однофазных реле контроля напряжения для защиты бытовых потребителей электрической энергии от недопустимых отклонений напряжения в питающей сети. Выделены такие признаки классификации реле контроля напряжения как: конструктивное исполнение, номинальная мощность, наличие регулировки параметров, пороги срабатывания по напряжению, тип индикации состояния, наличие встроенной внутренней защиты реле, наличие дополнительных функций, вид выходного коммутационного элемента и другие. Проведенная классификация систематизирует информацию о конструктивных, технических и функциональных особенностях и параметрах таких реле и демонстрирует современный уровень технического развития вышеупомянутых реле. Авторами сделан вывод о тенденциях и направлениях развития возможностей реле контроля напряжения в будущем.

Ключевые слова: однофазное реле контроля напряжения, электробытовая техника, защита электрических сетей от отклонений напряжения, перенапряжение, недостаточное напряжение, колебания напряжения в электрической сети.

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

CLASSIFICATION OF SINGLE-PHASE VOLTAGE CONTROL RELAYS FOR HOUSEHOLD CONSUMERS TAKING INTO ACCOUNT THE TENDENCIES OF THEIR EVOLUTION

Introduction. This paper pays attention to a classification of single-phase voltage control relays for household electrical energy consumers protection from unacceptable voltage deviations within power supply network. The following signs of the classification of voltage control relays are emphasized, such as: design, rated power, the presence of parameter adjustment, voltage response thresholds, the type of status indication, the presence of built-in internal relay protection, the presence of additional functions, the type of output switching element, and others. The undertaken classification systematizes information on the design, technical and functional features and parameters of such relays and demonstrates the current level of technical development of relays that are mentioned above. A conclusion is made concerning tendencies and directions of relay capabilities developing in the future by the authors.

Key words: single phase voltage control relay, household appliances, protection of electrical networks from voltage deviations, overvoltage, undervoltage, voltage fluctuations within electrical network.

Вступ. Від безперебійного живлення, що повинні забезпечувати електричні мережі, може залежати функціонування складного електротехнічного та електронного устаткування, нерідко залежить добробут, результати тривалої праці великих колективів.

Найбільш частою причиною збоїв в роботі є порушення якості електропостачання, що обумовлено найрізноманітнішими причинами: зношеність обладнання в системі енергопостачання України, перевантаження електромереж через нестачу коштів на їх розвиток, погана якість робіт або помилки персоналу при управлінні і ремонті; вплив на електромережу різних споживачів енергії; удари блискавок, обриви та замикання ліній електропередач при стихійних лихах або з інших причин.

Усі аварійні події в електричних мережах, а також аварійні режими, що пов'язані з появами перенапруг або недостатніх напруг по-своєму є небезпечними як для устаткування, так і для людей, що робить обов'язковим встановлення відповідної захисної апаратури [1].

В даній статті велику увагу приділено огляду, технічним особливостям, а також класифікації однофазних реле контролю напруги для захисту побутових споживачів у мережах низьких напруг.

Мета роботи полягає в огляді технічних особливостей та проведенні класифікації однофазних реле контролю напруги для захисту побутових споживачів електричної енергії від неприпустимих відхилень напруги в мережі живлення для систематизації інфор-

мації щодо конструктивних, технічних і функціональних особливостей таких реле.

Ознаки класифікації однофазних реле контролю напруги. На електротехнічному ринку України для захисту однофазних побутових споживачів електричної енергії від недопустимих відхилень напруги живлення широко представлені реле контролю напруги, які здійснюють захист споживачів від недопустимих відхилень напруги в мережі живлення шляхом відключення навантаж від аварійної мережі живлення. Повторне підключення споживача до мережі живлення при нормалізації у ній напруги такі реле здійснюють автоматично. Номенклатура таких реле представлена як вітчизняними так і зарубіжними виробниками і на тепер є досить різноманітною як за технічними характеристиками, так і за способом технічної реалізації, конструктивним виконанням, алгоритмами роботи, особливостями налаштування тощо [1].

За результатами проведеного аналізу характеристик, різновидів та сучасної номенклатури реле контролю напруги, їх можна класифікувати за наступними особливостями:

- за типом конструктивного виконання;
- за типом індикації стану реле;
- за наявністю додаткових функцій;
- за номінальною потужністю (струмом) реле;
- за порогоми спрацьовування по напрузі;
- за видом комутаційного елемента;
- за наявністю регулювання параметрів;
- за наявністю вбудованого захисту самого реле (перегрів, імпульсні перенапруги, коротке замикання);
- інші ознаки.

Реле контролю напруги являють собою комбінацію двох складових – електронної, що призначена для контролю напруги й силової для швидкого роз'єднання кола. Найбільш поширеною є електронна частина реле, виготовлена на основі мікропроцесора або мікроконтролера, що дозволяє виробникам реле наділяти їх додатковими функціями, такими як регулювання порогів спрацьовування; регулювання часу автоматичного повторного включення (АПВ); вимірювання величини струму й, відповідно, такі реле можуть мати вбудований захист від перевантаження по струму. Реле деяких виробників можуть мати: можливість регулювання часу затримки відключення споживача від мережі у разі аварійної події; вбудований лічильник електроенергії; термозахист самого реле, тобто якщо температура всередині корпусу реле перевищує встановлене виробником значення, то реле вимикає живлення споживача; пам'ять аварійних подій (час і значення параметрів мережі в момент знеживлення); вбудований захист від імпульсних перенапруг; вольт-ампер-ваттметр. Найбільш повно зазначені вище додаткові функції реалізуються виробниками в реле контролю напруги стаціонарного виконання.

Описані вище додаткові можливості реле дозволяють створити багатофункціональний захисний пристрій в одному корпусі.

Далі будуть розглянуті різновиди однофазних реле

контролю напруги для захисту побутових споживачів (реле напруги) відповідно до зазначених ознак класифікації. Згадка деяких серій реле напруги в даній статті буде використана виключно в якості прикладів [2]. Повна номенклатура аналізованих в статті реле напруги і їх виробників на сучасному ринку значно ширше зазначених.

За типом конструктивного виконання розрізняють:

- реле модульної конструкції для стаціонарного монтажу на DIN-рейку у розподільному щиті
- стаціонарного виконання для монтажу у підрозетники, чи реле, що виконане у вигляді розетки;
- у вигляді адаптера для розетки або вбудовані у подовжувач;
- вбудовані в електропобутові прилади.

Перший тип реле (рис. 1), що встановлюється в розподільну шафу або щит на DIN рейку – це більш функціональний пристрій, що дозволяє захистити від перепадів напруги квартиру або приватний будинок. У приладі можуть бути й додаткові налаштування або опції, або кілька режимів експлуатації, що будуть описані нижче в статті.



Рис. 1. Зовнішній вигляд однофазних реле контролю напруги, що встановлюються на DIN-рейку: а) PH-111H [14] (Реле і автоматика, Росія); б) HRN-33 [8] (ETI, Словенія); в) Easy9 [3] (Schneider Electric, Франція); г) SVP-912 [17] (Sinotimer, Китай); е) EU102 [4] (Hager, Німеччина); д) VPD1-60 [18] (Tomzn, Китай)

Як видно, реле, що монтується на DIN-рейку можуть мати світлодіодну індикацію станів (рис. 1 б, в, д):

- світіння червоного світлодіода свідчить про неприпустиме відхилення напруги у живильному колі і відключення навантаження;
- світіння зеленого світлодіода свідчить про те, що напруга мережі живлення знаходиться в нормі і вона подана через реле на навантаження.

В однофазних реле контролю напруги для сигналізації стану реле найчастіше використовуються цифрові трьох розрядні семи сегментні індикатори (рис. 1, а, г), на які виводяться значення поточної напруги (се-

редньоквадратичне значення) в мережі живлення і стану реле, а при налаштуванні реле – поточні порого спрацьовування і тимчасова затримка повторного включення. При відліку часу затримки для повторного включення реле напруги на його дисплей також виводиться час, що залишився до включення реле.

Також деякі виробники, наприклад Hager (рис. 1, г) встановлюють у свої реле рідкокристалічні дисплеї. Такі рішення дозволяють розширити об'єм інформації доступної для виводу користувачу.

Конструктивно стаціонарні реле, що монтуються на DIN-рейку виконані у модульних корпусах шириною 3TE (1TE $\approx$ 17,6-17,8 мм), що не підтримують горіння, з механічно міцної і термостійкої пластмаси. Але на даний час зустрічаються виробники, що пропонують реле напруги у корпусах шириною 2TE або, навіть, 1TE (рис. 1, б). Ступінь захисту реле – IP20. Номінальна напруга реле – 220/230 В (середньоквадратичне значення) [1, 2]. Можуть зустрічатися і стаціонарні виконання реле, що встановлюються в підрозетники або у вигляді розеток (рис. 2, а, б)

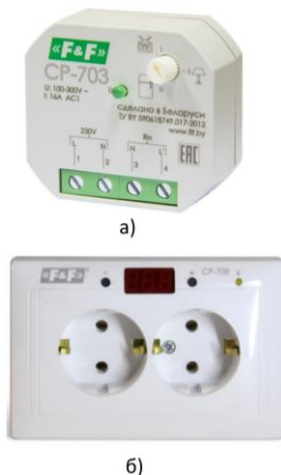


Рис. 2. Зовнішній вигляд стаціонарних однофазних реле контролю напруги, що являють собою розетки або встановлюються у підрозетник: а) CP-703 [5] (Евроавтоматика F&F, Білорусь); б) CP-708 [5] (Евроавтоматика F&F, Білорусь)

Мобільні (переносні) реле, що випускаються у вигляді розеткових мережевих адаптерів (рис. 3), підключаються безпосередньо в розетку. Навантаження, що захищається такими реле від неприпустимих відхилень напруги підключається до вбудованої в реле розетки. Вилка таких реле може бути вбудованою в реле (рис. 2, а-г) або винесеною на живильному шнурі (рис. 2, д). Мобільні реле можуть випускатися із заземлюючим (РЕ) контактом (рис. 3, а-в) – для використання в мережах TN-S і без нього – для використання в мережах TN-C [2].

Ступінь захисту мобільних (переносних) реле – IP20.

Мережеві подовжувачі з вбудованими реле напруги (рис. 4) здійснюють безпосередню захист від неприпустимих відхилень напруги побутових приладів, підключених до такого подовжувача. Число розеток (гнізд) в таких подовжувачах від 2 до 6.

Такі подовжувачі випускаються трипровідними - з

РЕ-провідником [2].



Рис. 3. Зовнішній вигляд мобільних однофазних реле контролю напруги, що являють собою адаптер для розетки: а) SR1 [6] (DS Electronics, Україна); б) PH-122 [12] (Novatek Electro, Україна); в) VP-10AS [11] (DigiTop, Україна); г) CP-700 [5] (Евроавтоматика F&F, Білорусь); е) VR10 [13] (Аско, Україна); д) ARM VR-16A [15] (Pulse Automatics, Україна)



Рис. 4. Зовнішній вигляд мобільних однофазних реле контролю напруги, що являють собою подовжувач: а) R616 [6] (DS Electronics, Україна); б) PH-16/Y6 [9] (УкрРеле, Україна)

За номінальною потужністю (струмом) реле. Номінальні потужності стаціонарних реле напруги, як правило, складають (категорія застосування АС-1): 3,5; 4,4; 5,5; 7,0; 8,8; 11,0; 13,8 кВА, що при номінальній напрузі 220 В відповідає номінальним струмам реле 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63 А [2], що є у стандартній модельній номенклатурі більшості виробників реле контролю напруги. Також зустрічаються окремі виробники, які додатково випускають реле напруги, розраховані на струми 5, 8, 10 А.

При виборі реле слід пам'ятати, що категорії застосування реле АС-1 відповідає комутація неіндуктивних або слабоіндуктивних навантажень з граничним коефіцієнтом потужності – $\cos\varphi = 0,8$, тому активна потужність реле (кВт) становить 80% повної його

потужності (кВА).

Зазначеним номінальним потужностям реле повинні відповідати максимальні потужності навантаження комутованого за допомогою реле контролю напруги. Якщо максимальна потужність навантаження перевищує номінальну комутовану потужність реле, таке навантаження слід підключати через контактори (магнітні пускачі).

Номінальні потужності і струми вбудованих реле визначаються відповідно потужностями і струмами електрообладнання (електропобутові прилади, стабілізатори напруги) в які вони вбудовані [2].

Мобільні реле напруги, як правило, випускаються на номінальні потужності (категорія застосування АС-1): 2,2 і 3,5 кВА, що при номінальній напрузі 220 В відповідає номінальним струмам 10 і 16 А. Рідше зустрічаються мобільні реле на струми 6 А, потужністю 1,3 кВА.

Мережеві подовжувачі із вбудованими реле більшістю виробників випускаються на потужність 3,5 кВА, при номінальній напрузі 220 В, що відповідає номінальному струму 16 А.

За наявністю регулювання параметрів. Реле контролю напруги для захисту побутових споживачів можуть мати фіксовані налаштування параметрів, виконаних на заводі виробника, виходячи із міркувань допустимих перенапруг та недостатніх напруг, а також часу затримки на відключення споживача від мережі живлення при виникненні аварійного режиму. При цьому деякі виробники, як наприклад Меандр [7] керуються логікою роботи своїх реле, яка може бути описана у паспорті реле і представлена у вигляді діаграм чи осцилограм (рис. 5). А деякі виробники не надають даних про логіку роботи реле. Найбільш поширена послідовність роботи реле з фіксованими параметрами спрацьовування в аварійній ситуації може бути описана наступним чином: після подачі напруги живлення пристрій витримує час готовності 5-6 секунд при цьому індикація не працює, потім зелений індикатор починає блимати вказуючи на відлік витримки часу автоматичного повторного включення (АПВ); якщо напруга знаходиться в допустимих межах, навантаження підключається до мережі напруги живлення і загоряється зелений індикатор. Можливо прискорене включення навантаження вручну шляхом натискання кнопки «вкл» на лицьовій панелі. Після аварійного відключення, включення реле відбувається автоматично при відновленні напруги до нормального рівня, в залежності від встановленої виробником чи користувачем витримки часу або без витримки.

При появі в мережі дугового струму, спалахує червоний світлодіод і реле відключає навантаження.

При спробі ручного включення в аварійному режимі пристрій не дозволить включити живлення навантаження.

У робочому режимі пристрій контролює напругу мережі живлення.

Також реле контролю напруги для захисту побутових споживачів можуть мати можливість регулювання параметрів, як порогів по мінімальній та максимальній напругах, так і час автоматичного повторного

включення (АПВ). А деякі зразки можуть мати регулювання часу затримки на відключення навантаження в аварійних режимах. Робота таких реле може бути описана наступним чином: при подачі живлення, якщо встановлена затримка спрацьовування і напруга мережі знаходиться в діапазоні між встановленими верхнім і нижнім порогами, вбудоване виконавче реле включиться після закінчення відліку часу затримки t (рис. 6). При цьому контакти реле замикаються і включається індикатор «Вихід». Якщо напруга мережі відхилилася від встановлених значень, виконавче реле вимикається після закінчення відліку часу затримки спрацьовування. Коли контрольована напруга повертається в норму, реле вмикається після закінчення затримки спрацьовування [2].

У реле із наявністю регулювань параметрів напруги спрацьовування, а також часу затримки на відключення та АПВ, регулювання може здійснюватись як ступінчасто: режим I, II, III (рис. 2а), так і плавно чи дискретно із заданим кроком. На рис. 7 представлені реле виробника Меандр [7], при цьому можна зазначити, що на рис. 7а реле із фіксованими порогоми спрацьовування по напрузі і фіксованим часом АПВ. Пристрій має тільки світлодіодну індикацію стану. На рис. 7б показане реле із регульованими порогоми спрацьовування по напрузі і фіксованим часом АПВ. Пристрій має тільки світлодіодну індикацію стану.

На рис. 7, в показане реле із регульованими порогоми спрацьовування по напрузі, а також регульованим часом АПВ. Пристрій має світлодіодну індикацію стану, а також три розрядний семисегментний індикатор, що відображає поточне значення напруги у мережі живлення.

Затримка АПВ реле напруги після нормалізації напруги в мережі живлення необхідна для виключення частих повторних включень навантажень при короткочасних неприпустимих стрибках напруги в мережі живлення, які призводять до відключення реле, що тягне за собою скорочення ресурсу роботи таких навантажень і може призвести до виходу їх з ладу (холодильники та ін.).

Тимчасова затримка повторного включення в реле напруги з фіксованою часовою затримкою у різних виробників складає, як правило, від 10 секунд до 6 хвилин.

Діапазон регулювання тимчасової затримки повторного включення в реле напруги різних виробників може відрізнятися. На основі паспортних даних реле можна сказати, що діапазон регулювання часу АПВ може починатись від 0,1-0,3 секунд і закінчуватись значенням 999 секунд.



Рис. 5. Діаграма роботи реле з фіксованими параметрами

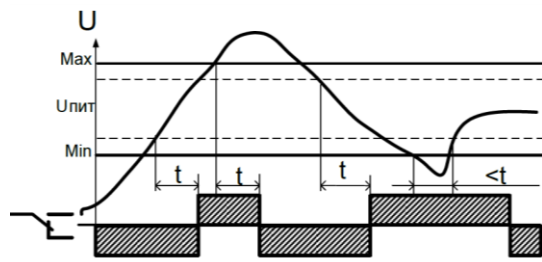


Рис. 6. Діаграма роботи реле з регульованими параметрами

За порогами спрацьовування по напрузі [2]. Як вже було зазначено вище розрізняють реле напруги з фіксованими і регульованими порогами спрацьовування по максимальній і мінімальній напрузі.

Реле напруги з фіксованими порогами спрацьовування по напрузі, як правило, аналогові. Головним елементом схеми порівняння такого реле є аналоговий компаратор – пристрій, призначений для порівняння двох сигналів. Найпростіша схема компаратора може бути побудована на операційному підсилювачі без зворотного зв'язку. На один із входів операційного підсилювача подається відома опорна напруга, на інший – порівнюваний аналоговий сигнал, наприклад сигнал з датчика. Характерним для таких реле є незначна відмінність зазначених порогів і їх розкид від 2 до 3% у різних виробників [2].

Реле напруги з регульованими порогами можуть бути як аналогові, так і цифрові. Цифрові реле є найбільш поширеними. У них як правило у якості керуючої ланки використовуються мікроконтролери, наприклад PIC12F для УЗМ-51М (рис. 7б), а там де необхідні додаткові функції такі як індикація, вольтметр тощо, можуть застосовуватись STM8S00 для F&F CP-721 [5], або STM32F03 для Zubr D2-63 [6].

Діапазон регулювання мінімального порогу спрацьовування в таких реле може знаходитись в межах 85-215 В, максимального – 210-310 В.



Рис. 7. Зовнішній вигляд стаціонарних однофазних реле контролю напруги: а) із фіксованими параметрами спрацьовування, УЗМ-50МД [7] (Меандр, Росія); б) із наявністю регулювань порогів спрацьовування по напрузі УЗМ-51М [7] (Меандр, Росія); в) із наявністю регулювань порогів спрацьовування по напрузі та часу АПВ і трирозрядним індикатором УЗМ-50ЦМ [7] (Меандр, Росія)

За типом індикації стану реле. В реле напруги сигналізація стану реле виконується світловою. При необхідності у деяких виробників передбачена можливість додавання і звукової сигналізації.

Світлова сигналізація реалізується за допомогою світлодіодів або цифрових дисплеїв (світлодіодних

або рідкокристалічних).

Прикладами конструкцій реле зі світлодіодною сигналізацією можуть служити реле на рис. 1б, в, д та рис. 7. У таких реле як правило застосовується кілька світлодіодів, які сигналізують про нормальну напругу у мережі і вклучене реле, про спрацьовування реле внаслідок неприпустимого зниження або підвищення напруги, про відлік витримки часу АПВ реле.

У цифрових реле для сигналізації стану реле найбільш часто використовуються трирозрядні семисегментні індикатори, на які виводяться значення поточної напруги (середньоквадратичне значення) в мережі живлення і стану реле, а при налаштуванні реле – поточні пороги спрацьовування і тимчасова затримка повторного вклучення. При відліку реле напруги часу затримки для повторного його вклучення на його дисплей також виводиться час, що залишився до вклучення реле. Деякі виробники можуть додатково доповнювати цифрові реле світлодіодними індикаторами стану (рис. 7в)

У сегменті більш дорогих реле можуть зустрічатися реле із рідкокристалічними дисплеями (рис. 1г). Такі дисплеї є більш інформативними на відміну від трирозрядних семисегментних індикаторів.

За наявністю вбудованого захисту самого реле. В окремих серіях реле напруги деякими виробниками (наприклад, реле ZUBR з індексом «b»; Меандр – деякі моделі реле; Евроавтоматика F&F) передбачається захист внутрішнього обладнання реле від перегріву, імпульсної перенапруги і внутрішнього короткого замикання. Причому деякі моделі реле можуть поєднувати в собі декілька видів внутрішнього захисту, наприклад, захист від імпульсної перенапруги та внутрішнього короткого замикання.

Причинами внутрішнього перегріву в реле можуть служити ослаблені під'єднання зовнішніх провідників, а також підключення через реле потужності, що перевищує встановлену допустиму потужність реле, що спричинить за собою вихід реле з ладу. При наявності захисту від внутрішнього перегріву крім поточної напруги реле контролює і свою внутрішню температуру (при її збільшенні до 80 °С відбувається аварійне відключення навантаження, індикатор спрацьовування реле буде сигналізувати про внутрішній перегрів. Розблокування пристрою стане можливим при зниженні температури нижче 60 °С [2].

Для захисту внутрішньої електроніки від імпульсних перенапруг окремі виробники реле реалізують відповідний варисторний захист. Причому, якщо реле призначено для додаткового захисту споживача від імпульсних перенапруг, то можуть використовуватися одночасно два варистори різні за параметрами: один для захисту споживача, другий – електронної схеми реле напруги.

Для захисту реле напруги від внутрішніх коротких замикань рядом виробників реле передбачається встановлення самовідновлюваних запобіжників у колах живлення електронних схем реле або інших схематичних рішень, що дозволяють вчасно відключити живлення реле при появі внутрішнього короткого замикання.

За наявністю додаткових функцій. Деякими виробниками в конструкціях реле можуть передбачатися додаткові технічні рішення для реле контролю напруги, що розширюють функціональні можливості реле. Як правило, такими функціями наділяються реле напруги побудовані на базі мікроконтролерів.

До таких функцій можна віднести контроль струму і потужності у мережі, що захищається. Такі прилади фактично поєднують в собі функції двох приладів – реле напруги і обмежувача потужності.

Прикладом такого рішення можуть служити реле серії PH-14M на рис. 8б. В такому реле поріг спрацьовування по струму виконується регульованим з дискретністю 0,1 А. Час спрацьовування струмового захисту фіксований.

При необхідності функція захисту по струму може бути відключена.

Як додаткова функція реле контролю напруги, поряд із вищевказаними функціями, в конструкціях реле передбачається встановлення варисторного захисту від імпульсних перенапруг (рис. 7,а; 8,б).

Низкою виробників в конструкціях реле напруги завбачується функція пам'яті (рис. 8,в-д) останнього спрацьовування реле (напруга останнього спрацьовування зберігається в пам'яті реле і її можна переглянути на цифровому індикаторі при натисканні відповідної клавіші або комбінації клавіш). Також деякі виробники свої багатофункціональні моделі реле наділяють функціями перегляду статистики роботи реле.

Деякі виробники виготовляють багатофункціональні моделі, приклади яких представлені на рис. 8.



Рис. 8. Зовнішній вигляд однофазних багатофункціональних реле контролю напруги, що встановлюються на DIN-рейку: а) PH-260T [11] (Новатек Електро, Україна); б) PH-14M [14] (Реле і автоматика, Росія); в) DDS238-VAP [18] (Tomzn, Китай); г) MF-63 [6] (DS Electronics, Україна); р) MP-63 [11] (DigiTop, Україна); д) SD16W Wi-Fi [10] (Tessla, Україна)

Такі реле можуть мати додаткові функції окрім вищезазначених такі як: контроль потужності; індикація активної, реактивної, повної потужності, струму; внутрішній термозахист реле; внутрішній захист від імпульсних перенапруг; захист схеми реле від внутрішнього короткого замикання; годинник реального часу із вбудованим таймером для включен-

ня/відключення навантаження по графіку; віддалене керування (Wi-Fi); вбудований лічильник спожитої електроенергії тощо.

За видом комутаційного елемента. Розрізняють реле напруги з контактним або безконтактним виходами.

В реле напруги з контактним виходом комутуючим елементом є контакт моностабільного (рис 9, а, б, г) або бістабільного (рис. 9,в) електромагнітного реле. Число контактів такого реле один або два.

Електромагнітне реле з одним контактом комутує тільки фазний провідник, а реле з двома контактами комутує фазний і нейтральний провідники [2].

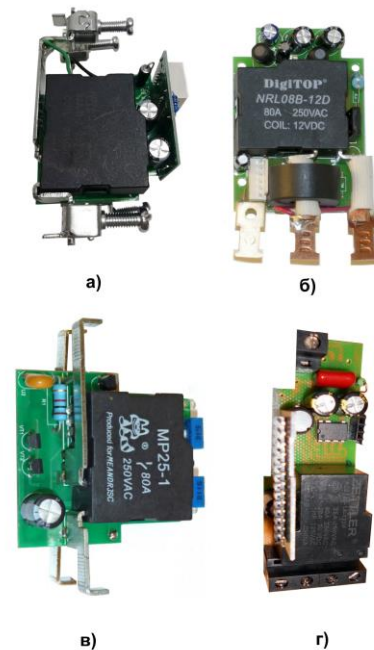


Рис. 9. Зовнішній вигляд комутаційних елементів однофазних реле контролю напруги, що встановлюються на DIN-рейку: а) D2-63 [6] (DS Electronics, Україна); б) VA-63 [11] (DigiTop, Україна); в) УЗМ-51М [7] (Меандр, Росія); г) CP-721-1 [5] (Евроавтоматика F&F, Білорусь)

Реле контролю напруги з безконтактним виходом зустрічаються відносно рідко. В якості комутуючого елемента таких реле, як правило, застосовуються симістори.

Висновки.

1. Проведена класифікація реле напруги для захисту побутових однофазних споживачів електричної енергії від неприпустимих відхилень напруги в мережі живлення за основними ознаками.

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

3. На підставі проведеної класифікації також можна зробити висновок, що вище розглянуті однофазні реле контролю напруги побутових споживачів розвиваються у напрямку розширення функціоналу пристрою і в майбутньому можна очікувати появу ще більшої кількості моделей багатофункціональних реле

на електротехнічному ринку.

Список літератури

1. Чепелюк А.А. О влиянии технического состояния внутридомовых распределительных сетей на электробезопасность бытовых однофазных потребителей электрической энергии / А.А. Чепелюк, А.Л. Хлобыстин // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ": сб. науч. тр. Темат. вып.: Проблемы усовершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2011. – № 60. – С. 46-53.
2. Чепелюк А.А. К вопросу классификации реле напряжения для защиты бытовых однофазных потребителей от недопустимых отклонений напряжения в питающей сети // Вісник Національного технічного університету "ХПИ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2014. – № 41. – С. 25-36.
3. <https://www.se.com/ww/en/product/EZ9C1240/voltage-relay-40a-1p%2Bns--over-voltage---undervoltage-relay---automatic-reclosing/>
4. <https://www.hager.ua/produkcija/rozpodil-elektroenergi/modulni-aparati/lichlniki-ta-vimiryuvalni-pristro/rele-kontrolyu-yakosti-merezhi/eu100/7697.htm>
5. <https://fif.by/catalog/cp-721-1>
6. <https://ds-electronics.com.ua/ua/rele/d2-63/>
7. <https://www.meandr.ru>
8. <https://www.eti.ua/levels-2?view=search&levelid=336%20/%20https://www.eti.ua/levels-2?view=search&levelid=172>
9. <https://www.ukrrele.com/devices-protection-extension.htm>
10. <https://www.tessla.com.ua/Пеле-напряжения-с19482425>
11. <https://digitop.ua>
12. <https://novatek-electro.com.ua/product-category/odnofazni-rele-naprugi.html>
13. https://www.acko.ua/e-store/xml_catalog/
14. <https://rele.ru/catalog/rele-kontrolya-i-zashchityi.-rele-ukazatelnyie/rele-napryazheniya.html?page=2>
15. <https://pulseautomatrics.com/rele-napryazheniya-pulse-arm-11-63a.html>
16. <https://www.amazon.co.uk/SINOTIMER-Adjustable-Auto-recovery-Protector-Protective-Color-White/dp/B07WRCB1FQ>
17. <https://sinotimer.aliexpress.ru/store/3368049>
18. https://aliexpress.ru/item/33048687678.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.18495462DmKIIY&algo_pvid=59c32fef-4d5e-4dca-bd00-9c2d43abdf1b&algo_expid=59c32fef-4d5e-4dca-bd00-9c2d43abdf1b-0&btsid=0b8b15d416025363253061207e9c3b&ws_ab_test=searchweb0_0,searchweb201602_,searchweb201603_

References (transliterated)

1. Chepeliuk A.A. O vliyaniy tekhnicheskogo sostoiannya vnutydomovikh raspredelytelnykh setey na elektrobezopasnost bitovikh odnofaznykh potrebyteley elektrycheskoi enerhyy. A. A. Chepeliuk, A. L. Khlobystyn. Vestnyk Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vip.: Problemi usovershenstvovaniya elektrycheskykh mashyn i apparatov. Teoriya y praktyka. – Kharkov: NTU "KhPI". 2011. no 60. pp. 46-53.
2. Chepeliuk A.A. K voprosu klassyfykatsii rele napriazheniya dlia zashchity bitovikh odnofaznykh potrebyteley ot nedopustymykh otkloneniy napriazheniya v pytaiushchey sety. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. – 2014. – no 41. - pp. 25-36.
3. <https://www.se.com/ww/en/product/EZ9C1240/voltage-relay-40a-1p%2Bns--over-voltage---undervoltage-relay---automatic-reclosing/>
4. <https://www.hager.ua/produkcija/rozpodil-elektroenergi/modulni-aparati/lichlniki-ta-vimiryuvalni-pristro/rele-kontrolyu-yakosti-merezhi/eu100/7697.htm>
5. <https://fif.by/catalog/cp-721-1>
6. <https://ds-electronics.com.ua/ua/rele/d2-63/>
7. <https://www.meandr.ru>
8. <https://www.eti.ua/levels-2?view=search&levelid=336%20/%20https://www.eti.ua/levels-2?view=search&levelid=172>
9. <https://www.ukrrele.com/devices-protection-extension.htm>
10. <https://www.tessla.com.ua/Пеле-напряжения-с19482425>
11. <https://digitop.ua>
12. <https://novatek-electro.com.ua/product-category/odnofazni-rele-naprugi.html>
13. https://www.acko.ua/e-store/xml_catalog/
14. <https://rele.ru/catalog/rele-kontrolya-i-zashchityi.-rele-ukazatelnyie/rele-napryazheniya.html?page=2>
15. <https://pulseautomatrics.com/rele-napryazheniya-pulse-arm-11-63a.html>
16. <https://www.amazon.co.uk/SINOTIMER-Adjustable-Auto-recovery-Protector-Protective-Color-White/dp/B07WRCB1FQ>
17. <https://sinotimer.aliexpress.ru/store/3368049>
18. https://aliexpress.ru/item/33048687678.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.18495462DmKIIY&algo_pvid=59c32fef-4d5e-4dca-bd00-9c2d43abdf1b&algo_expid=59c32fef-4d5e-4dca-bd00-9c2d43abdf1b-0&btsid=0b8b15d416025363253061207e9c3b&ws_ab_test=searchweb0_0,searchweb201602_,searchweb201603_

Поступила (received) 30.09.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

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

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

М.А. ЛЕЛЮК, В.В. ЛИТВИНЕНКО, А.А. ПОЗНЯК

АНАЛІЗ РОБОТИ ПРИВІДНИХ МЕХАНІЗМІВ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ

Проведено аналіз конструкцій та принципу роботи привідних механізмів сучасних вакуумних вимикачів середньої напруги. У відомих конструкціях вакуумних вимикачів використовуються два типи приводів: пружинно-моторні та електромагнітні. В свою чергу, електромагнітні приводи в залежності від використовуваного типу електромагніту можуть бути моностабільні неполяризовані і поляризовані та бістабільні поляризовані. Пружинно-моторні привідні механізми вимикачів складаються з привідного валу, пружин увімкнення та вимкнення, механізму зводу пружини увімкнення, механічного пристрою ручного спрацьовування, електромагнітів увімкнення та вимкнення для оперативного електричного спрацьовування. Електромагнітні привідні механізми складаються з електромагніту та в залежності від його конструкції можуть бути з поворотною пружиною або без неї. В конструкціях електромагнітних привідних механізмів з поворотними пружинами застосовуються моностабільні поляризовані електромагніти. Особливість конструкцій електромагнітних привідних механізмів з бістабільними електромагнітами полягає у відсутності поворотної пружини та наявності окремих котушок увімкнення та вимкнення. В результаті проведеного аналізу виявлено недоліки кожного з розглянутих типів приводів. Найбільшу цікавість для подальших досліджень представляють електромагнітні привідні механізми з моностабільними поляризованими електромагнітами з поворотною пружиною, що мають тільки одну котушку увімкнення та за рахунок цього зменшують габаритні розміри приводу.

Ключові слова: автоматичні вимикачі середньої напруги, пружинно-моторний привідний механізм, електромагнітний привідний механізм, постійні магніти.

Н.А. ЛЕЛЮК, В.В. ЛИТВИНЕНКО, А.А. ПОЗНЯК

АНАЛИЗ РАБОТЫ ПРИВОДНЫХ МЕХАНИЗМОВ ВАКУУМНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Проведен анализ конструкций и принципа работы приводных механизмов современных вакуумных выключателей среднего напряжения. В известных конструкциях вакуумных выключателей используют два типа приводов: пружинно-моторные и электромагнитные. В свою очередь, электромагнитные приводы в зависимости от используемого типа электромагнита могут быть моностабильными неполяризованными и поляризованными, и бистабильными поляризованными. Пружинно-моторные приводные механизмы выключателей состоят из приводного вала, пружин включения и отключения, механизма взвода пружины включения, механического устройства ручного срабатывания, электромагнитов включения и отключения для оперативного электрического срабатывания. Электромагнитные приводные механизмы состоят из электромагнита и в зависимости от его конструкции могут быть с возвратной пружиной или без нее. В конструкциях электромагнитных приводных механизмов с возвратными пружинами применяются моностабильные поляризованные электромагниты. Особенность конструкций электромагнитных приводных механизмов с бистабильными электромагнитами заключается в отсутствии возвратной пружины и наличии отдельных катушек включения и отключения. В результате проведенного анализа определены недостатки каждого из рассмотренных типов приводов. Наибольший интерес для дальнейших исследований представляют электромагнитные приводные механизмы с моностабильными поляризованными электромагнитами с возвратной пружиной, которые содержат только одну катушку включения и за счет этого позволяют уменьшить габаритные размеры привода.

Ключевые слова: автоматические выключатели среднего напряжения, пружинно-моторный приводной механизм, электромагнитный приводной механизм, постоянные магниты.

М.А. ЛЕЛЮК, В.В. ЛИТВИНЕНКО, А.А. ПОЗНЯК

ANALYSIS OF THE OPERATION OF THE DRIVE MECHANISMS OF MEDIUM VOLTAGE VACUUM CIRCUIT BREAKERS

The analysis of the designs and the principle of operation of the drive mechanisms of modern medium-voltage vacuum circuit breakers is carried out. In the known designs of vacuum switches, two types of drives are used: spring-motor and electromagnetic. In turn, electromagnetic drives, depending on the type of electromagnet used, can be monostable, unpolarized and polarized, and bistable, polarized. The spring-motor drive mechanisms of the circuit breakers consist of a drive shaft, closing and opening springs, a closing spring charging mechanism, a mechanical manual operation device, and opening and closing electromagnets for operational electrical tripping. Electromagnetic actuators consist of an electromagnet and, depending on its design, can be with or without a return spring. Monostable polarized electromagnets are used in the design of electromagnetic actuators with return springs. A feature of the designs of electromagnetic drive mechanisms with bistable electromagnets is the absence of a return spring and the presence of separate on and off coils. As a result of the analysis, the drawbacks of each of the considered types of drives were revealed. Of greatest interest for further research are electromagnetic drive mechanisms with monostable polarized electromagnets with a return spring, which contain only one turn-on coil and, due to this, allow reducing the overall dimensions of the drive.

Key words: medium voltage circuit breakers, spring-motor drive mechanism, electromagnetic drive mechanism, permanent magnets.

Вступ. Вакуумні вимикачі середньої напруги застосовуються в розподільчих мережах об'єктів інфраструктури, промислових підприємств, нафтогазовій промисловості тощо завдяки екологічній безпечності, надійності, ефективності захисту мереж та устаткування від коротких замикань, достатній швидкодії, великої кількості циклів комутації робочих струмів та компактного розміру [1].

Розробкою та виробництвом вакуумних вимикачів

для мереж середніх напруг займаються як закордонні так і вітчизняні фірми. Серед відомих закордонних фірм можна виділити концерн АБВ (Швейцарія), Siemens (Німеччина), Eaton (США), Schneider Electric (Франція), ООО «Таврида Електрик» (Росія), ОАО «Электроцит» (Росія). Серед вітчизняних виробників вакуумних вимикачів це ТОВ «АВМ АМПЕР» (м. Кременчук) та Рівненський завод високовольтної апаратури (м. Рівне).

© Лелюк М.А., Литвиненко В.В., Позняк А.А., 2020

Характеристики та надійність вакуумного вимикача безпосередньо пов'язані з роботою привідного механізму, який через привідний вал забезпечує комутацію головних контактів та автоматичне спрацювання вимикача при виникненні аварійної ситуації в мережі. У відомих конструкціях вакуумних вимикачів використовуються два типи приводів: пружинно-моторні та електромагнітні. В свою чергу, електромагнітні приводи в залежності від використовуваного типу електромагніту можуть бути моностабільні неполяризовані і поляризовані та бістабільні поляризовані. Кожен з цих типів приводів різних фірм виробників має свій принцип дії, конструктивні особливості, переваги та недоліки.

Мета роботи – огляд конструкцій та аналіз роботи привідних механізмів вакуумних вимикачів середніх напруг.

Вакуумні вимикачі з пружинно-моторним привідним механізмом. Вимикачі з даним типом привідного механізму виробляються як закордоном так і на території України. На рис. 1 показані вакуумні вимикачі фірм ABB, Siemens, Eaton, Schneider Electric, ОАО «Электроцит», ТОВ «АВМ АМПЕР» [2-7].



Рис. 1. Вакуумні вимикачі з пружинно-моторним привідним механізмом

Привідні механізми вимикачів складаються з привідного валу, пружин увімкнення та вимкнення, механізму зводу пружини увімкнення з мотор-редуктором та храповим колесом, механічного пристрою ручного спрацювання, електромагнітів увімкнення та вимкнення для оперативного електричного спрацювання, розчеплювачів (розмикання, замикання, мінімальної напруги). На рис. 2 приведено конструкцію пружинно-моторного механізму вакуумного вимикача Siemens 3AH2 [3].

Увімкнення та вимкнення вакуумного вимикача може відбуватися як в ручному так і в дистанційному режимі. При виконанні увімкнення мотор-редуктор 3 зводить пружину увімкнення до встановлення її на механічну зачіпку, при цьому індикатор стану пружини 12 буде показувати готовність апарату до включення. Взвод пружини може відбуватися автоматично, або вручну, якщо оперативне живлення відсутнє. Якщо увімкнення вимикача відбувається вручну, то необхідно натиснути кнопку увімкнення 9, привідний вал 1 зніметься з механічної зачіпки та повернеться за рахунок дії пружини увімкнення 2, якщо увімкнення дистанційне – подати напругу на котушку електромагніту увімкнення 5 для зняття з механічної зачіпки. При провороті привідного валу 1 головні контакти вакуумного вимикача замикаються і вал становиться на механічну зачіпку у положенні увімкнено, при цьому поворотна пружина 6 знаходиться у зжатому стані для виконання наступної операції оперативного або аварійного вимкнення.

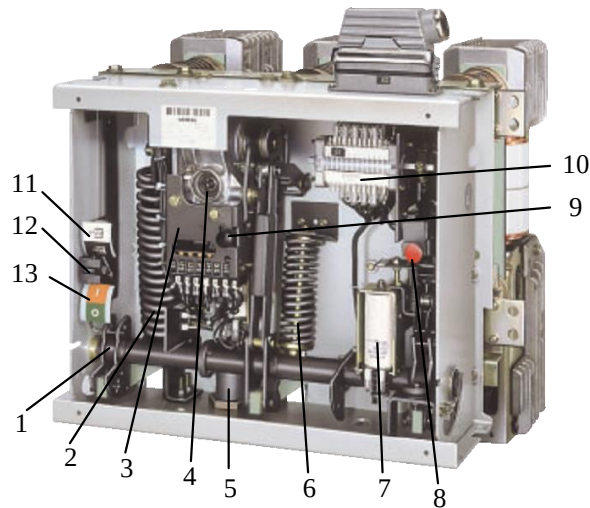


Рис. 2. Пружинно-моторний механізм вакуумного вимикача Siemens 3AH2:

1 – вал приводу; 2 – пружина увімкнення; 3 – механізму зводу пружини увімкнення з мотор-редуктором та храповим колесом; 4 – механізм ручного зводу пружини увімкнення; 5 – електромагніт увімкнення; 6 – поворотна пружина; 7 – розчеплювач; 8 – кнопка вимкнення вимикача; 9 – кнопка увімкнення вимикача; 10 – блок-контакти; 11 – індикатор стану пружини увімкнення; 12 – лічильник циклів спрацювання вимикача; 13 – індикатор стану вимикача

При виконанні вимкнення вимикача вручну необхідно натиснути кнопку вимкнення 8, при цьому привідний вал 1 зніметься з механічної зачіпки та повер-

неться за рахунок дії поворотної пружини 6, головні контакти вимикача розімкнуться і привідний вал 1 стане на механічну заціпку у положенні вимкнено. При дистанційному вимкненні напруга подається на електромагніт вимкнення і спрацьовування привідного механізму відбувається так само.

Вакуумні вимикачі з електромагнітним привідним механізмом. Суттєві недоліки пружинно-моторних приводів, такі як складна кінематика, наявність великої кількості деталей, необхідність механічної фіксації механізму в крайніх положеннях та обов'язкове планове обслуговування стали поштовхом для подальшої модернізації конструкцій вимикачів та застосування в їх конструкціях електромагнітних привідних механізмів. На теперішній час виробництвом вимикачів з даним типом привідних механізмів зай-

маються не лише закордонні фірми (ABB, Eaton, ООО «Таврида Електрик», ОАО «Электрощит»), але й вітчизняні (ТОВ «АВМ АМПЕР», Рівненський завод високовольтної апаратури). Електромагніти, що входять до складу привідних механізмів вимикачів, поляризовані, тобто в їх конструкціях використовуються постійні магніти. В залежності від стаціонарного положення електромагніту, при знеструмленій обмотці, вони бувають моно- та бістабільними.

Моностабільні поляризовані електромагніти використовуються у вакуумних вимикачах в поєднанні з поворотними пружинами, причому поворотна пружина може входити до складу електромагніту або встановлюватися окремо в привідному механізмі (рис. 3) [8-12].



Рис. 3. Вакуумні вимикачі з моностабільними поляризованими електромагнітами та поворотними пружинами: 1 – моностабільний поляризований електромагніт; 2 – поворотна пружина; 3 – синхронізуючий вал; 4 – обмотка; 5 – якорь; 6 – статор; 7 – пружина підтискання; 8 – кільцевий постійний магніт; а, б – поворотна пружина встановлена окремо від електромагніту; в, г – поворотна пружина входить в конструкцію електромагніту

Незалежно від способу розміщення поворотної пружини принцип дії електромагнітного привідного механізму у вакуумних вимикачах однаковий. Розглянемо його на прикладі вакуумного вимикача ВВ/TEL-10 (рис. 3, г). Конструктивно вимикач складається з трьох полюсів, встановлених на металевій основі, де розміщений пофазний електромагнітний привід. При виконанні увімкнення та вимкнення вимикача робота приводів синхронізується валом 3. Увімкнення вими-

кача може відбуватися в ручному або дистанційному режимі, при цьому електролітичний конденсатор розряджається на обмотку електромагнітного приводу 4 (розглянуто на прикладі одного з приводів) [12]. За рахунок магнітного потоку, що створюється струмом в обмотці, якорь 5 починає притягуватися до статора електромагніту 6, стискаючи при цьому поворотну пружину 2 та пружину підтискання головних контактів 7. Головні контакти замикаються і вимикач зали-

шається в цьому положенні при знеструмленій обмотці 4. Це можливо за рахунок наявності в конструкції електромагніту кільцевого постійного магніту 8 та намагнічених до насичення якоря 5 та статора 6, що створюють залишковий магнітний потік, достатній для їх утримання.

При вимкненні вимикача на обмотку електромагніту 4 необхідно подати струм у зворотному напрямку, при цьому намагнічені до насичення якорь 5 та статор 6 розмагнічуються і при значенні сили меншій ніж сила, що створюється поворотною пружиною 2 та пружиною підтискання 7 якорь починає рухатися у зворотному напрямку і головні контакти розмикаються. В цьому положенні вимикач залишається за рахунок зусилля, що створює поворотна пружина 2.

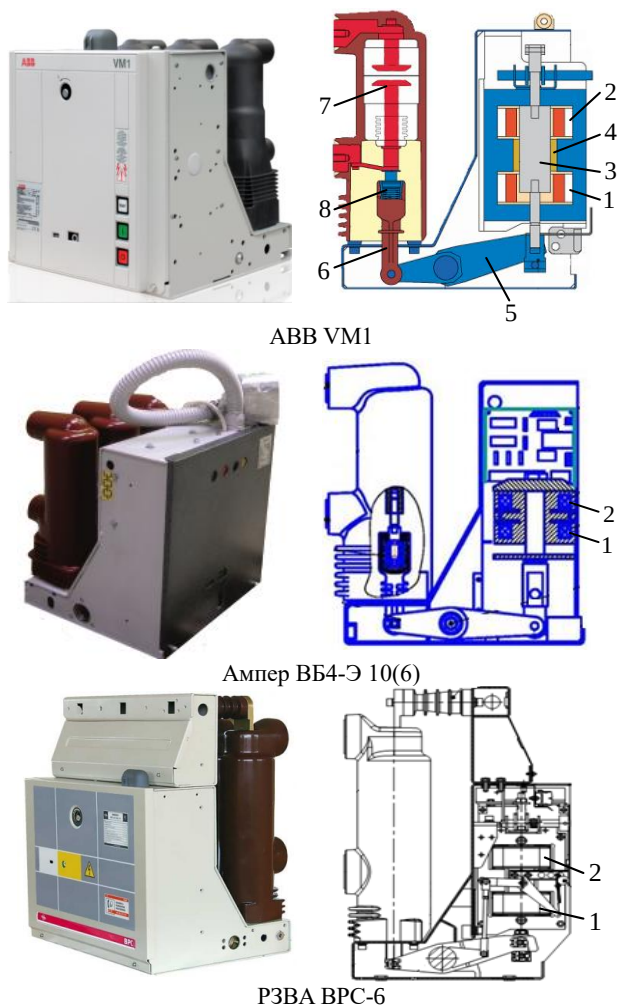


Рис. 4. Вакуумні вимикачі з бістабільними поляризованими електромагнітами:

- 1 – котушка увімкнення; 2 – котушка вимкнення; 3 – якорь;
4 – висококоерцитивні постійні магніти; 5 – привідний вал;
6 – ізоляційні тяги; 7 – головні контакти;
8 – пружини підтискання;

В розглянутому вакуумному вимикачі використання моностабільного поляризованого електромагніту з поворотною пружиною робить привод вимикача бістабільним. Існують вимикачі в яких використовуються бістабільні поляризовані електромагніти без поворотних пружин (рис. 4) [13-15]. Електромагніти вико-

нуються з плоско-паралельним (Ампер ВБ4-Э 10(6)) або вісісиметричним (ABB VM1, РЗВА ВРС-6) магнітопроводом. Особливість конструкцій електромагнітів полягає в наявності окремих одно обмоткових котушок увімкнення 1 та вимкнення 2.

Принцип дії електромагнітів однаковий, розглянемо його на прикладі вакуумного вимикача ABB VM1 (рис. 4). У вимкненому положенні вакуумного вимикача головні контакти 7 розімкнені, якорь електромагніту 3 утримується в крайньому верхньому положенні за рахунок дії висококоерцитивних постійних магнітів 4. Обмотки увімкнення 1 та вимкнення 2 знеструмлені. Для увімкнення вимикача необхідно через обмотку котушки увімкнення 1 пропустити постійний струм певного напрямку, що здійснюється за рахунок розряду електролітичного конденсатора. При цьому сила, що виникає в магнітному колі увімкнення є більшою, ніж сила утримання постійних магнітів 4, якорь починає рухатися вниз та приводить в дію привідний вал вимикача 5, ізоляційні тяги 6 рухаються в верхнє положення і головні контакти 7 замикаються. Обмотка увімкнення 1 знеструмлюється і вимикач залишається в цьому положенні за рахунок дії постійних магнітів 4. Електромагніт знаходиться в першому стаціонарному положенні.

Для вимкнення вимикача необхідно через обмотку котушки вимкнення 2 пропустити постійний струм певного напрямку, за рахунок розряду електролітичного конденсатора. Магнітний потік утворений струмом створює силу, яка є більшою, ніж сила утримання контактів 7 в замкненому положенні та сила утримання постійних магнітів 4. Якорь електромагніту 3 починає рухатись, але контакти вимикача 7 ще лишаються замкненими, проте пружини підтискання 8 в цей час розжимаються, забезпечуючи необхідну початкову швидкість головних контактів 7. Процес вимкнення є завершеним, коли якорь електромагніту 3 переходить у крайнє верхнє положення і залишається в цьому положенні за рахунок дії постійних магнітів 4 при знеструмленій обмотці котушки вимкнення 2, що відповідає другому стаціонарному положенню електромагніту.

До недоліків даних конструкцій привідних механізмів вакуумних вимикачів можна віднести значні габаритні розміри за рахунок наявності в конструкції бістабільного поляризованого електромагніту одразу двох котушок увімкнення та вимкнення.

Висновки. 1. Проведено аналіз конструкцій та особливостей роботи привідних механізмів вакуумних вимикачів середньої напруги.

2. Пружинно-моторні привідні механізми мають ряд суттєвих недоліків, таких як складна кінематика, велика кількості рухомих деталей, необхідність механічної фіксації механізму в увімкненому та вимкненому положеннях, що суттєво знижує їх надійність та потреба проведення обов'язкового планового обслуговування.

3. В порівнянні з пружинно-моторними механізмами електромагнітні мають меншу кількість конструктивних елементів, що забезпечує їх високу механічну витривалість із відносно низьким рівнем технічного обслуговування. Недоліками цих приводів є ве-

лика споживана енергія від зовнішнього джерела живлення при переході якоря з одного стійкого положення в інше, великі габарити та маса, створення суттєвих вібрацій та шуму в процесі увімкнення, відсутність можливості управління без керуючого сигналу.

4. Серед розглянутих конструкцій привідних механізмів вакуумних вимикачів середньої напруги найбільшу цікавість представляють електромагнітні привідні механізми, до складу яких входять моностабільні поляризовані електромагніти з поворотною пружиною, які мають тільки одну котушку увімкнення, що за рахунок цього зменшує габаритні розміри приводу.

Список літератури

1. Клименко Б.В. Электричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: навчальний посібник. – Харків: Вид-во «Точка», 2012. – 340 с.
2. VD4 Medium voltage vacuum circuit breakers 12...40.5 kV - 630...4000 A - 16...63 kA. <https://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/circuit-breakers/indoor-CB/iec-primary-vacuum-cb-vd4>.
3. 3AH2/3AH4 Vacuum Circuit-Breakers. Medium-Voltage Equipment. Selection and Ordering Data. Catalog HG 11.04. 2007. www.siemens.com/energy.
4. User manual W-VACi 17.5 kV W-VACiMB 25 kA 1250A IEC Mining Vacuum Circuit Breakers. October 2012. www.eaton.com.
5. Выключатели EasyPact EXE. Вакуумные выключатели на напряжение 6, 10 кВ. Стационарное и выкатное исполнение. Распределение электроэнергии среднего напряжения. www.schneider-electric.com/ua.
6. Электрошит Самара. Электроаппараты. Каталог 2020. <http://electroshield.ru>.
7. <http://www.abm-amper.com/prod/vb4-p-10-viklyuchatel-106-kv-vakuumniy-s-prujinno-motornim-privodom.php>.
8. Instructions for the Use, Operation and Maintenance of Types VCP-TL and VCP-TRL Linear Magnetic Vacuum Circuit Breakers. May 2016. www.Eaton.com.
9. James Benke, Brad Leccia. Medium Voltage Electro-Mechanical Linear Actuator Breaker. EATON. May 7, 2005.
10. Выключатели вакуумные серии ВР1. Техническая информация. НКAI.670049.043 ТИ. Редакция 3 2013. <http://www.rzva.ua>.
11. Выключатели вакуумные серии ВВМ-СЭЩ-3(4)-10. Техническая информация. ТИ – 1 56 – 2009. <http://electroshield.ru>.
12. ВВ/TEL Вакуумный выключатель. Руководство по эксплуатации. Вакуумный выключатель ВВ/TEL-10. <https://www.tavrida.com>.
13. Medium Voltage Products. VM1 Vacuum circuit-breaker with magnetic actuator mechanism. 2013. www.abb.com/mediumvoltage.
14. Выключатель вакуумный ВБ4-Э. <https://www.abm-amper.com/prod/vb4-e-10-viklyuchatel-106-kv-vakuumniy-s-elektromagnitnim-privodom.php>.

www.abm-amper.com/prod/vb4-e-10-viklyuchatel-106-kv-vakuumniy-s-elektromagnitnim-privodom.php.

15. Выключатели вакуумные типов ВРС-6 и ВРС-10. Техническая информация. НКAI.670049.022 ТИ. Редакция 9. 2013. <http://www.rzva.ua/ru/do/tehnichna-informacija>.

References (transliterated)

1. Klimenko B.V. Elektrichni aparati. Elektromekhanichna aparatura komutatsii, keruvannya ta zakhistu. Zagal'nij kurs: navchal'nij posibnik. – Kharkiv: Vid-vo «Tochka», 2012. – 340 s.
2. VD4 Medium voltage vacuum circuit breakers 12...40.5 kV - 630...4000 A - 16...63 kA. <https://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/circuit-breakers/indoor-CB/iec-primary-vacuum-cb-vd4>.
3. 3AH2/3AH4 Vacuum Circuit-Breakers. Medium-Voltage Equipment. Selection and Ordering Data. Catalog HG 11.04. 2007. www.siemens.com/energy.
4. User manual W-VACi 17.5 kV W-VACiMB 25 kA 1250A IEC Mining Vacuum Circuit Breakers. October 2012. www.eaton.com.
5. Vyklyuchateli EasyPact EXE. Vakuumnye vyklyuchateli na napryazhenie 6, 10 KV. Stacionarnoe i vykatnoe ispolnenie. Raspredelenie ehlektroehnergii srednego napryazheniya. www.schneider-electric.com/ua.
6. Ehlektroshchit Samara. Ehlektroapparaty. Katalog 2020. <http://electroshield.ru>.
7. <http://www.abm-amper.com/prod/vb4-p-10-viklyuchatel-106-kv-vakuumniy-s-prujinno-motornim-privodom.php>.
8. Instructions for the Use, Operation and Maintenance of Types VCP-TL and VCP-TRL Linear Magnetic Vacuum Circuit Breakers. May 2016. www.Eaton.com.
9. James Benke, Brad Leccia. Medium Voltage Electro-Mechanical Linear Actuator Breaker. EATON. May 7, 2005.
10. Vyklyuchateli vakuumnye serii VR1. Tekhnicheskaya informaciya. NKAI.670049.043 TI. Redakciya 3 2013. <http://www.rzva.ua>.
11. Vyklyuchateli vakuumnye serii VVM-SESHCH-3(4)-10. Tekh-nicheskaya informaciya. TI – 1 56 – 2009. <http://electroshield.ru>.
12. VV/TEL Vakuumnyj vyklyuchatel'. Rukovodstvo po ehks-pluatacii. Vakuumnyj vyklyuchatel' BB/TEL-10. <https://www.tavrida.com>.
13. Medium Voltage Products. VM1 Vacuum circuit-breaker with magnetic actuator mechanism. 2013. www.abb.com/mediumvoltage.
14. Vyklyuchatel' vakuumnyj VB4-EH. <https://www.abm-amper.com/prod/vb4-e-10-viklyuchatel-106-kv-vakuumniy-s-elektromagnitnim-privodom.php>.
15. Vyklyuchateli vakuumnye tipov VRC-6 i VRS-10. Tekhnicheskaya informaciya. NKAI.670049.022 TI. Redakciya 9. 2013. <http://www.rzva.ua/ru/do/tehnichna-informacija>.

Надійшла (received) 15.09.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Лелюк Микола Анатолійович (Лелюк Николай Анатольевич, Leliuk Mykola Anatoliyovych) – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", к.т.н., старший викладач кафедри електричних апаратів, м. Харків, тел.: (067) 968-76-90; e-mail: lelyuk.nik@gmail.com.

Литвиненко Вікторія Володимирівна (Литвиненко Виктория Владимировна, Lytvynenko Victoriia Vladimirovna) – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", старший викладач кафедри електричних апаратів, м. Харків, тел.: (067) 973-54-79; e-mail: vikalitv21082@gmail.com

Позняк Андрій Андрійович (Позняк Андрей Андреевич, Poznyak Andrey Andreevich) – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", магістр кафедри електричних апаратів, м. Харків, тел.: (050) 217-32-90; e-mail: masterdanka987@gmail.com.

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

РОЗРАХУНОК І ПРОЕКТУВАННЯ МАГНІТОПРОВОДУ ІНДУКЦІЙНИХ КУХОННИХ ПЛИТ

Все більш широке використання індукційних кухонних плит у сучасному побуті та у ресторанному виробництві робить актуальними задачу розробки методів розрахунку і проектування основних конструктивних елементів зазначеного представника сучасної електропобутової техніки. Окрім індуктора (плоскої котушки, при протіканні по якій змінного струму створюється електромагнітне поле, яке наводить в свою чергу вихрові струми в посуді, що нагрівається на індукційній кухонній плиті), одним з найважливіших елементів конструкції сучасної побутової індукційної кухонної плити є магнітопровід, виконаний з феромагнітного матеріалу та призначений для екранування електромагнітного поля, створеного індуктором, з метою зменшення розсіяння поля та, таким чином, підвищення коефіцієнта корисної дії плити. Представляє науковий та практичний інтерес розробка методики інженерного розрахунку та проектування магнітопроводу індукційної кухонної плити (матеріал для виготовлення магнітопроводу – MnZn-ферит нової марки PC95 виробництва TDK Corporation) відповідає поставленій задачі. З огляду на масогабаритні показники та низький рівень втрат, розраховані у роботі магнітопроводи можна використати у конструкціях індукційних побутових плит. Розроблена методика може бути використана в процесі перспективних науково-дослідних і конструкторських робіт з розробки індукційних кухонних плит, а також в навчальному процесі для підготовки бакалаврів і магістрів за відповідними освітніми програмами.

Ключові слова: індукційна кухонна плита, магнітопровід, розрахунок, проектування.

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

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАГНИТОПРОВОДА ИНДУКЦИОННЫХ КУХОННЫХ ПЛИТ

Все более широкое использование индукционных кухонных плит в современном быту и в ресторанном производстве делает актуальными задачу разработки методов расчета и проектирования основных конструктивных элементов указанного представителя современной электробытовой техники. Кроме индуктора (плоской катушки, при протекании по которой переменного тока создается электромагнитное поле, которое в свою очередь наводит вихревые токи в посуде, нагреваемой на индукционной кухонной плите), одним из важнейших элементов конструкции современной бытовой индукционной кухонной плиты является магнитопровод, выполненный из ферромагнитного материала и предназначенный для экранирования электромагнитного поля, созданного индуктором, с целью уменьшения рассеяния поля и, таким образом, повышения коэффициента полезного действия плиты. Представляет научный и практический интерес разработка методики инженерного расчета и проектирования магнитопровода индукционной кухонной плиты с целью выбора материала для его изготовления, определения геометрических и массогабаритных параметров магнитопровода, а также потерь в нем в процессе эксплуатации плиты. Представленная в данной статье и апробированная методика инженерного расчета и проектирования магнитопровода индукционной кухонной плиты (материал для изготовления магнитопровода – MnZn-феррит новой марки PC95 производства TDK Corporation) соответствует поставленной задаче. Учитывая массогабаритные показатели и низкий уровень потерь, рассчитанные в работе магнитопроводы можно использовать в конструкциях индукционных бытовых плит. Разработанная методика может быть использована в процессе перспективных научно-исследовательских и конструкторских работ по разработке индукционных кухонных плит, а также в учебном процессе для подготовки бакалавров и магистров по соответствующим учебным программам.

Ключевые слова: индукционная кухонная плита, магнитопровод, расчет, проектирование.

M.G. PANTELYAT, Yu.S. HRYSHCHUK, O.O. CHEPELIUK, A.K. YELOIEV

CALCULATION AND DESIGN OF MAGNETIC CORES OF HOUSEHOLD INDUCTION COOKERS

The increasing use of induction cookers in modern everyday life and in restaurant production makes it urgent to develop methods for calculating and designing the main structural elements of this representative of modern household appliances. In addition to the inductor (a flat coil alternating current in which creates an electromagnetic field which in turn induces eddy currents in the dishes heated on the induction cooker), one of the most important structural elements of a modern household induction cooker is a magnetic core made of ferromagnetic material and designed to shield the electromagnetic field created by the inductor, in order to reduce the scattering of the field and, thus, increase the efficiency of the cooker. It is of scientific and practical interest to develop a methodology for the engineering calculation and design of the magnetic core of an induction cooker in order to select the material for its manufacture, determine the geometric and mass-dimensional parameters of the magnetic core, as well as losses in it during operation of the core. The methodology for the calculation and design of the magnetic core of an induction cooker presented in this paper (the material for manufacturing of the magnetic core is MnZn ferrite of the new PC95 brand manufactured by TDK Corporation) corresponds to this task. Taking into account the overall dimensions, mass and the low level of losses, the calculated magnetic cores can be used in the designs of induction cookers. The developed methodology can be used in the process of promising research and development work on the development of induction cookers, as well as in the educational process for the preparation of Bachelors and Masters in relevant educational programs.

Keywords: household induction cookers, magnetic core, calculation, design.

Вступ. Все більш широке використання індукційних кухонних плит у сучасному побуті та у ресторанному виробництві робить актуальними задачу розробки методів розрахунку і проектування основних конструктивних елементів зазначеного представника сучасної електропобутової техніки.

В роботі [1] запропонована інженерна методика розрахунку і проектування індуктора – плоскої котушки, при протіканні по якій змінного струму створюється електромагнітне поле, яке наводить в свою чергу вихрові струми в посуді, що нагрівається на індукційній кухонній плиті. З використанням розробленої методики виконано розрахунки індукторів стосовно ряду режимів нагрівання посуду різних геометричних розмірів. Це дозволило розробити ескізні проекти 2-виткового та 12-виткового індукторів, а також одноконфорочної індукційної кухонної плити з їх використанням [1].

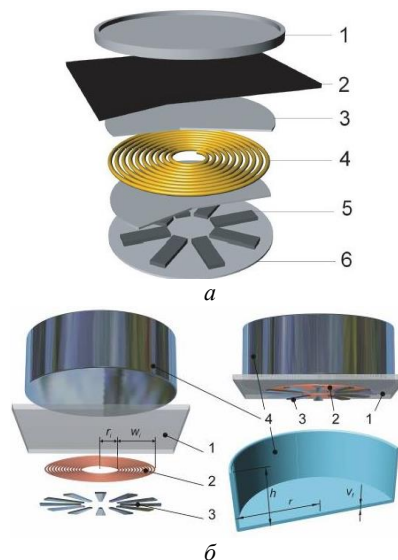
Окрім індуктора, одним з найважливіших елементів конструкції сучасної побутової індукційної кухонної плити є магнітопровід, виконаний з феромагнітного матеріалу та призначений для екранування електромагнітного поля, створеного індуктором, з метою зменшення розсіяння поля та, таким чином, підвищення коефіцієнта корисної дії плити.

Представляє науковий та практичний інтерес розробка методики інженерного розрахунку та проектування магнітопроводу індукційної кухонної плити з метою вибору матеріалу для його виготовлення, визначення геометричних і масогабаритних параметрів магнітопроводу, а також втрат у ньому в процесі експлуатації плити. Розроблена методика може бути використана в процесі перспективних науководослідних і конструкторських робіт з розробки індукційних кухонних плит, а також в учбовому процесі для підготовки бакалаврів і магістрів за відповідними освітніми програмами.

Мета роботи – розробка методики інженерного розрахунку та проектування магнітопроводу індукційної кухонної плити та її використання при розробці конструкцій плит для нагрівання посуду різних геометричних розмірів.

Магнітопроводи індукційних кухонних плит. Матеріали для виготовлення магнітопроводів. Найбільш поширеним різновидом магнітопроводу індукційних кухонних плит є система стрижнів прямокутного перерізу, розташованих під індуктором плити та виконаних з сучасного феромагнітного матеріалу – фериту відповідної марки з потрібними електрофізичними властивостями [2-5]. Відповідні конструктивні елементи індукційної кухонної плити наведені на рис. 1 [2-4].

На рис. 1,а наведено феритовий магнітопровід у вигляді восьми стрижнів прямокутного перерізу, розташованих під індуктором [2, 3]. Застосовується також інша кількість стрижнів (як правило, парна від 6 до 12, рис. 1,б) [4, 5].



а): 1 – посуд, що нагрівається (сковорода); 2 – варильна поверхня; 3 – електрична ізоляція (слюда); 4 – індуктор; 5 – феритовий магнітопровід; 6 – алюмінієва плита [2, 3]

б): 1 – склокерамічна варильна поверхня; 2 – індуктор; 3 – феритовий магнітопровід; 4 – посуд, що нагрівається (кастрюля) [4]

Рис. 1. Основні конструктивні елементи індукційної кухонної плити

Магнітопроводи побутових індукційних плит виготовляють з сучасних магнітних матеріалів – феритів [2-5]. В науково-технічній літературі відсутня інформація стосовно марок феритів, які застосовуються для виробництва стрижнів магнітопроводів побутових індукційних плит. Аналіз інформації, наведеної на сайтах постачальників відповідної продукції [6], дозволяє зробити висновок, що стрижні магнітопроводів побутових індукційних плит виготовляються з MnZn-феритів. Властивості зазначених феритів різних марок наведені у [7, 8].

Методика розрахунку і проектування магнітопроводів індукційних кухонних плит. Як було зазначено вище, метою розрахунку і проектування магнітопроводу є вибір матеріалу для його виготовлення, визначення геометричних і масогабаритних параметрів магнітопроводу, а також втрат у ньому в процесі експлуатації плити. Пропонується наступна послідовність розв'язання поставленої задачі.

1) Вибір матеріалу для виготовлення стрижнів магнітопроводу.

Як зазначено вище, стрижні магнітопроводів побутових індукційних плит виготовляються з MnZn-феритів. У [7] наведені основні властивості (початкова магнітна проникність, індукція насичення, питома потужність втрат при вказаних у [7] умовах її визначення, рекомендований діапазон робочих частот, температура Кюрі, питомий електричний опір) зазначених феритів різних виробників. Виходячи з наведеної інформації, можна виконати попередній вибір марки MnZn-фериту, орієнтуючись в першу чергу на діапазон робочих частот (частота струму в індукторі індукційної кухонної плити – 20-100 кГц) і за можливості на малу величину питомої потужності втрат. Отже, серед феритів для низьких і середніх частот (10-300

кГц) можна обрати, наприклад, новий матеріал PC95 виробництва TDK Corporation, який відповідає зазначеним вимогам.

Детальний опис, характеристики та властивості MnZn-феритів виробництва TDK Corporation наведені самим виробником у [8]. Цей документ підтверджує, що обрані ферити можуть використовуватися в різноманітних електронних і електротехнічних пристроях, у тому числі в приладах для електронагріву. Окрім величин, наведених у [7], документ [8] надає максимально детальну інформацію щодо властивостей відповідних матеріалів: додатково наведені щільність, коерцитивна сила, залишкова намагніченість, а також у графічній формі основні криві намагніченості $B(H)$ при різних температурах, залежності магнітної проникності від температури та частоти, залежності питомої потужності втрат від амплітуди індукції магнітного поля B_m , температури та частоти. Зазначена детальна інформація використовується на подальших етапах розрахунку магнітопроводу індукційної плити.

2) Вибір геометричних розмірів феритових стрижнів, розрахунок маси магнітопроводу.

В процесі проектування магнітопроводів у вигляді феритових стрижнів прямокутного перерізу, розташованих під індуктором [2-5], при виборі геометрії феритових стрижнів магнітопроводів індукційних кухонних плит слід орієнтуватися на номенклатуру відповідної продукції, що присутня на ринку. Згідно з каталогом [6], існує можливість придбання феритових стрижнів з перерізом $h \times b = 5 \text{ мм} \times 15 \text{ мм} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м} \times 15 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, де h , b – висота та товщина стрижня, відповідно. Довжина стрижня l визначається за формулою

$$l = 0,5(d_{12} - d_{11}), \quad (1)$$

де d_{12} , d_{11} – зовнішній і внутрішній діаметри індуктора плити, відповідно.

Маса магнітопроводу m розраховується як:

$$m = \rho V N, \quad (2)$$

де ρ – щільність матеріалу стрижнів; N – кількість стрижнів магнітопроводу плити; V – об'єм одного стрижня:

$$V = hbl; \quad (3)$$

Формула (3) може бути застосована, коли в магнітопроводі індукційної кухонної плити використовуються стрижні «традиційної» геометрії, зображені на рис. 1, а [2, 3]. При використанні стрижнів, звужених у напрямку внутрішнього діаметра індуктора (з метою отримати своєрідні концентратори електромагнітного поля [4, 5], див. рис. 1, б), об'єм стрижня розраховується відповідним чином.

3) Розрахунок потужності втрат у магнітопроводі.

Втрати P_C в феритових стрижнях магнітопроводу розраховуються за формулою

$$P_C = p_{cv}^* V N, \quad (4)$$

де p_{cv}^* – питома потужність втрат, яку доцільно визначати за допомогою графіків (залежності питомої потужності втрат від амплітуди індукції магнітного поля B_m , частоти та температури) для відповідної марки феритів у відповідних умовах експлуатації (конкретні значення амплітуди індукції магнітного поля B_m , частоти та температури). Потрібна графічна

інформація наведена, наприклад, у [8]. При відсутності зазначеної детальної інформації можливо використання величин p_{cv} , наведених у [7] для «фіксованих» умов (наприклад, амплітуда індукції магнітного поля 100 мТл, частота 100 кГц, температура 100 °С), але це може привести до виникнення погрешності в розрахунках потужності втрат у магнітопроводі.

Приклади виконаних розрахунків. Аналіз отриманих результатів. Розрахунки феритових магнітопроводів виконано на прикладах двох варіантів індукторів і ескізних проектів конструкцій індукційних кухонних плит, розрахованих і розроблених в [1]. Вихідні дані для розрахунків наведені в табл. 1 [1]. Посуд (сковорода різного діаметра та з різною товщиною стінки) нагрівається до зазначених у табл. 1 температур при різних частотах струму в індукторі індукційної кухонної плити.

Таблиця 1 – Вихідні дані для виконання розрахунків [1]

Номер варіанту	1	2
Діаметр днища посуду d_2 , м	0,12	0,24
Товщина стінки посуду δ_2 , м	0,003	0,004
Температура нагріву посуду t_2 , °С	100	280
Частота електромагнітного поля f , кГц	100	20
Напруга на індукторі U_1 , В	220	220
Потужність, яка виділяється в посуді P_2 , Вт	$2,0 \cdot 10^3$	$3,3 \cdot 10^3$

В табл. 2 наведено деякі результати розрахунку і проектування індукторів індукційних кухонних плит для обох розглянутих варіантів [1]. На рис. 2 наведені розроблені конструкції 2-виткового та 12-виткового індукторів (для 1-го та 2-го варіантів вихідних даних, відповідно), а на рис. 3 – ескізний проект плити з 2-витковим індуктором [1].

Таблиця 2 – Індуктори індукційних кухонних плит [1]

Номер варіанту	1	2
Зовнішній діаметр індуктора d_{12} , м	0,12	0,24
Внутрішній діаметр індуктора d_{11} , м	0,04	0,04
Зазор між індуктором та посудом δ_3 , м	0,01	0,01
Товщина індуктора δ_1 , м	$0,29 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$
Активна потужність системи «індуктор–посуд» P_{Σ} , ВА	$4,058 \cdot 10^3$	$4,79 \cdot 10^3$
Електричний ККД η	0,493	0,689
Число витків індуктора w_1	2	12
Ширина витка з ізоляцією b_1 , м	0,02	0,0083

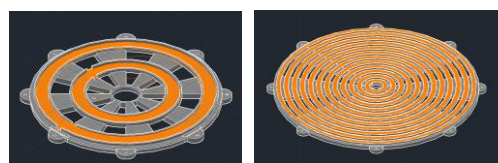


Рис. 2. Конструкції 2-виткового та 12-виткового індукторів [1]

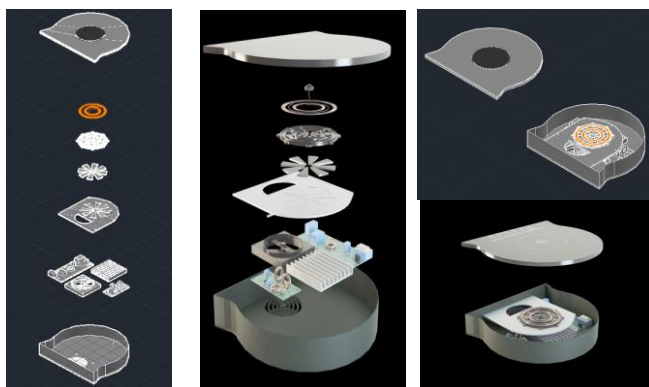


Рис. 3. Ескізний проект індукційної кухонної плити з 2-витковим індуктором [1]

У розроблених конструкціях плит передбачається використання магнітопроводів у вигляді 8-ми феритових стрижнів відповідних геометричних розмірів. Матеріал стрижнів – MnZn-ферит нової марки PC95 виробництва TDK Corporation, детальні властивості якого наведені у [8]. Переріз стрижнів обрано у відповідності до каталогу продукції [6].

Розрахунки виконувались за формулами (1)-(4). Окремо зупинимось на визначенні величини p_{cv}^* – питомої потужності втрат, яку знаходимо за допомогою графіків (залежності питомої потужності втрат від амплітуди індукції магнітного поля B_m , частоти та температури) для відповідної марки фериту у відповідних умовах експлуатації (конкретні значення амплітуди індукції магнітного поля B_m , частоти та температури) [8]. Використовуючи відповідні графіки, знаходимо величини p_{cv}^* для частот 100 кГц і 20 кГц (у відповідності до обох варіантів розрахунку), температури 60 °C (у припущенні, що магнітопровід в процесі експлуатації плити нагрівається орієнтовно до такої температури) та амплітуди індукції магнітного поля B_m на поверхні магнітопроводу. Щодо величини B_m , у відповідності з результатами виконаного раніше комп'ютерного моделювання розподілу електромагнітного поля плити [9] приймаємо її рівною орієнтовно 0,125 Тл.

Результати розрахунку магнітопроводів наведені в табл. 3.

З отриманих результатів розрахунків можна зробити висновок, що розраховані та спроектовані магнітопроводи доцільно використати у конструкціях індукційних побутових плит, оскільки:

1) Потужність втрат у стрижнях магнітопроводів несуттєва (одиниці Вт, див. табл. 3) у порівнянні з активною потужністю системи «індуктор-посуд» (див. табл. 2);

2) Маса магнітопроводу (до 300 г у розглянутих прикладах) достатньо мала у порівнянні з масою всієї конструкції (маса одноконфорочних індукційних плит, наявних у продажу – від 2,3 кг [10]).

Таблиця 3 – Результати розрахунку магнітопроводів індукційних кухонних плит

Номер варіанту	1	2
Кількість феритових стрижнів N	8	8
Переріз феритових стрижнів $h \times b$, м [6]	$5 \cdot 10^{-3} \times 15 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3} \times 15 \cdot 10^{-3}$
Довжина одного стрижня l , м	0,04	0,1
Об'єм одного стрижня, м ³	$3 \cdot 10^{-6}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$
Щільність матеріалу стрижнів, кг/м ³ [8]	$4,9 \cdot 10^3$	$4,9 \cdot 10^3$
Маса магнітопроводу, кг	0,1176	0,294
Амплітуда індукції магнітного поля B_m , Тл [9]	0,125	0,125
Питома потужність втрат p_{cv}^* , Вт/м ³ [8]	10^5	$2 \cdot 10^4$
Потужність втрат у магнітопроводі, Вт	2,4	1,2

Висновки. Розроблена й апробована методика інженерного розрахунку та проектування магнітопроводу індукційної кухонної плити з метою вибору матеріалу для його виготовлення, визначення геометричних і масогабаритних параметрів магнітопроводу, а також потужності втрат у ньому в процесі експлуатації плити. З огляду на масогабаритні показники та низький рівень втрат, розраховані у роботі магнітопроводи можна використати у конструкціях індукційних побутових плит. Методика може бути використана в процесі перспективних науково-дослідних і конструкторських робіт з розробки індукційних кухонних плит, а також в навчальному процесі для підготовки бакалаврів і магістрів за відповідними освітніми програмами.

Список літератури:

1. Пантелєв 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. Topuz N.E., Dawood K., Kaya Ü, Odabaş G., Kömürgöz G. Electromagnetic and thermal analysis of induction cooker coil // Proceedings of the 4th International Conference on Power Electronics and their Applications (ICPEA). – 25-27 September 2019, Elazığ, Turkey. – 5 p.
3. Cerri G., Kovryalov A., Primiani V.M., Russo P. Rigorous electromagnetic analysis of domestic induction heating Appliances // PIERS Online. – 2009. – vol. 5, No. 5. – P. 491-495.
4. Koller I., Novák B. Improving the energy efficiency of induction cooking // Electrical Engineering. – 2009. – vol. 91. – P. 153-160.
5. Koller I., Novák B. Improving the energy efficiency of induction cooking 2 // Electrical Engineering. – 2017. – vol. 99. – P. 171-178.
6. <https://oceanindustryhz.en.made-in-china.com/product/IKSnPECyXTWV/China-5-15-60-Mm-Induction-Cooker-Ferrite-Core.html>
7. <http://coretech.com.ua/ferrites/mnzn-power>
8. https://product.tdk.com/info/en/catalog/datasheets/ferrite_mnzn-material_characteristics_en.pdf
9. Пантелєв 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.

10. https://comfy.ua/harkov/astolnye-plity/tip_plity__indukcionnaja/

References (transliterated)

1. *Pantelyat M.G., Gurenczov Yu.V., Trofimov A.V.* Metodyka rozrakhunku induktoriv indukciyni'x kuxonnyx ply't. Visny'k NTU "XPI". Seriya: Problemy' udoskonalennya elektry'chny'x mashy'n i aparativ. Teoriya i prakty'ka. – Kh.: NTU "KhPI", 2014. – no 20 (1063). – P. 13-24.
2. *Topuz N.E., Dawood K., Kaya Ü, Odabaş G., Kömürgöz G.* Electromagnetic and thermal analysis of induction cooker coil. Proceedings of the 4th International Conference on Power Electronics and their Applications (ICPEA). – 25-27 September 2019, Elazig, Turkey. – 5 p.
3. *Cerri G., Kovyryalov A., Primiani V.M., Russo P.* Rigorous electromagnetic analysis of domestic induction heating Appliances. PIERS Online. – 2009. – vol. 5, No. 5. – P. 491-495.
4. *Koller I., Novák B.* Improving the energy efficiency of induction cooking. Electrical Engineering. – 2009. – vol. 91. – P. 153-160.
5. *Koller I., Novák B.* Improving the energy efficiency of induction cooking 2. Electrical Engineering. – 2017. – vol. 99. – P. 171-178.
6. <https://oceanindustryhz.en.made-in-china.com/product/IKSnPECyXTWV/China-5-15-60-Mm-Induction-Cooker-Ferrite-Core.html>
7. <http://coretech.com.ua/ferrites/mnzn-power>
8. https://product.tdk.com/info/en/catalog/datasheets/ferrite_mnzn-material_characteristics_en.pdf
9. *Pantelyat M.G., Gurenczov Yu.V.* Skinchenoelementny' analiz rozpodilu elektromagnitnogo polya indukciynoyi kuxonnoyi ply'ty'. Visny'k NTU "XPI". Seriya: Problemy' udoskonalennya elektry'chny'x mashy'n i aparativ. Teoriya i prakty'ka. – Kh.: NTU "KhPI", 2016. – no 32 (1204). – P. 32-36.
10. https://comfy.ua/harkov/astolnye-plity/tip_plity__indukcionnaja/

Поступила (received) 15.05.20

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Пантелеят Михайло Гаррійович (Пантелеят Михаил Гарриевич, Panteliat Mikhail 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.

Гришук Юрій Степанович (Гришук Юрий Степанович, Hryshchuk Yurii 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: grischukkpi@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: chep1@i.ua

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

Є.В. ГОНЧАРОВ, В.С. МАРКОВ, І.В. ПОЛЯКОВ

АНАЛІЗ ОПИТА ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТИЙ ПО ЕЛЕКТРОТЕХНІЦІ

В статті розглянуті проблеми та досвід проведення лабораторних занять по електротехніці. Розглядаються такі актуальні питання викладання: як погоджувати навчальний процес у всіх його формах, тобто лекційні заняття з практичними і особливо з лабораторними заняттями? Які методичні прийоми сприяють найбільш ефективній роботі студентів в електротехнічній лабораторії і кращому засвоєнню навчального матеріалу? Як стимулювати студентів до оволодіння знаннями в процесі проходження лабораторного практикуму? Збираючи електричне коло на стенді за заданою схемою, студент повинен на власні очі зрозуміти структуру електричного кола, зрозуміти відмінність між колом постійного та змінного струму, зрозуміти відмінності між однофазним і трифазним колом змінного струму, між генераторним режимом роботи електричної машини та режимом двигуна. Студенти отримують навички при роботі з вимірювальними приладами, що важливо для студента технічного профілю. Зроблені наступні висновки: проведення лабораторних занять в процесі підготовки студентів з електротехніки грає ключову роль, і скорочувати кількість академічних годин на проведення таких занять неможливо; підвищення якості викладання не зводиться до збільшення темпу викладання матеріалу і перевантаження інформацією студента, тут важливий помірний темп і розумна інерційність, інакше засвоєння матеріалу не відбудеться; якість викладання забезпечується: за рахунок чіткості, послідовності і логічності, чіткості постановки завдання – студент повинен розуміти, що йому потрібно робити на кожному етапі роботи, тобто викладач забезпечує зворотний зв'язок зі студентами та контролює їх, виправляючи помилки, звертаючи увагу на важливі нюанси навчального матеріалу; контроль засвоєння відбувається у формі співбесіди, причому, критерії оцінки заздалегідь обговорені і відомі кожному студенту; на одного викладача в лабораторії не повинно бути понад 12 студентів, інакше ускладнюється освітній процес і підвищується навантаження на викладача, що може призводити до жорсткого стилю викладання; необхідно заохочувати і стимулювати старанність і прагнення студентів до оволодіння знаннями і отримання хороших оцінок.

Ключові слова: лабораторні заняття по електротехніці, стиль викладання, стимулювання студентів.

Є.В. ГОНЧАРОВ, В.С. МАРКОВ, І.В. ПОЛЯКОВ

АНАЛІЗ ДОСВІДУ ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ З ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

У статті розглянуті проблеми та досвід проведення лабораторних занять з електротехніки. Розглядаються такі актуальні питання викладання: як погоджувати навчальний процес у всіх його формах, тобто лекційні заняття з практичними і особливо з лабораторними заняттями? Які методичні прийоми сприяють найбільш ефективній роботі студентів в електротехнічній лабораторії і кращому засвоєнню навчального матеріалу? Як стимулювати студентів до оволодіння знаннями в процесі проходження лабораторного практикуму? Збираючи електричне коло на стенді за заданою схемою, студент повинен на власні очі зрозуміти структуру електричного кола, зрозуміти відмінність між колом постійного та змінного струму, зрозуміти відмінності між однофазним і трифазним колом змінного струму, між генераторним режимом роботи електричної машини та режимом двигуна. Студенти отримують навички при роботі з вимірювальними приладами, що важливо для студента технічного профілю. Зроблені наступні висновки: проведення лабораторних занять в процесі підготовки студентів з електротехніки грає ключову роль, і скорочувати кількість академічних годин на проведення таких занять неможливо; підвищення якості викладання не зводиться до збільшення темпу викладання матеріалу і перевантаження інформацією студента, тут важливий помірний темп і розумна інерційність, інакше засвоєння матеріалу не відбудеться; якість викладання забезпечується: за рахунок чіткості, послідовності і логічності, чіткості постановки завдання – студент повинен розуміти, що йому потрібно робити на кожному етапі роботи, тобто викладач забезпечує зворотний зв'язок зі студентами та контролює їх, виправляючи помилки, звертаючи увагу на важливі нюанси навчального матеріалу; контроль засвоєння відбувається у формі співбесіди, причому, критерії оцінки заздалегідь обговорені і відомі кожному студенту; на одного викладача в лабораторії не повинно бути понад 12 студентів, інакше ускладнюється освітній процес і підвищується навантаження на викладача, що може призводити до жорсткого стилю викладання; необхідно заохочувати і стимулювати старанність і прагнення студентів до оволодіння знаннями і отримання хороших оцінок.

Ключові слова: лабораторні заняття з електротехніки, стиль викладання, стимулювання студентів.

YE.V. HONCHAROV, V.S. MARKOV, I.V. POLYAKOV

ANALYSIS OF EXPERIENCE IN CONDUCTING LABORATORY CLASSES IN ELECTRICAL ENGINEERING

The article discusses the problems and experience of conducting laboratory classes in electrical engineering. Such relevant teaching issues are considered: how to coordinate the educational process in all its forms, i.e. lectures with practical and especially with laboratory classes? What teaching methods contribute to the most effective work of students in an electrical laboratory and the best assimilation of educational material? How to stimulate students to master knowledge in the process of passing a laboratory works? Assembling the electric circuit at the stand according to the given circuit, the student must understand firsthand the structure of the electric circuit, understand the difference between the direct and alternating current circuits, understand the differences between the single-phase and three-phase alternating current circuits, between the generator and motor operation modes of an electric machine. Students gain skills when working with measuring instruments, which is important for a student of a technical profile. The following conclusions were drawn: conducting laboratory classes in the process of preparing students in electrical engineering plays a key role, and it is unacceptable to reduce the number of academic hours for conducting such classes; it is impossible to reduce the process of conducting laboratory classes in electrical engineering only to working with computer programs, but you need to use them as an additional tool in the educational process; improving the quality of teaching does not boil down to an increase in the rate of presentation of the material and overload of student information, a moderate pace and reasonable inertia are important here, otherwise the assimilation of the material will not happen; the quality of teaching is ensured: due to the intelligibility, consistency and logic, clarity of the problem statement – the student must understand what he needs to do at each stage of the work, i.e. the teacher provides feedback to students and controls them, correcting errors, paying attention to the important nuances of the educational material; control of assimilation takes place in the form of an interview, moreover, assessment criteria are agreed in advance and known to each student; there should not

be more than 12 students per teacher in the laboratory, otherwise the educational process becomes more complicated and the load on the teacher increases, which can lead to a rigid teaching style; it is necessary to encourage and stimulate the diligence and desire of students to acquire knowledge and obtain good grades.

Key words: laboratory classes in electrical engineering, teaching style, student stimulation.

Вступление. В настоящее время, в условиях постоянно сокращающихся академических часов на преподавание профессионально-ориентированных дисциплин, к которым относится и электротехника, возникает проблема качественного усвоения дисциплины студентами.

При уменьшении времени общения студента с преподавателем и замены этого времени на самостоятельную подготовку, как правило, происходит естественное ухудшение качества усвоения материала. Особенно сомнительным в этой связи выглядят сокращения академических часов на практические и лабораторные занятия, которые на наш взгляд, являются ключевыми в процессе подготовки будущего инженера. Помимо этого, более чем полувековой совместный опыт преподавания авторов статьи позволяет сделать ряд важных выводов по поводу проведения лабораторных занятий, что позволит дать рекомендации по улучшению учебного процесса.

Постановка задачи. Необходимо обосновать важность именно лабораторных занятий в такой дисциплине как электротехника. Если такие занятия действительно столь важны, то, как повысить качество преподавания и какие практические рекомендации дать по улучшению процесса преподавания в электротехнической лаборатории? Это и является целью статьи.

Для этой цели нужно решить ряд задач, стоящих перед преподавателями, ответив на такие вопросы:

- 1) как согласовывать учебный процесс во всех его формах, т.е. лекционные занятия с практическими и особенно с лабораторными занятиями?
- 2) какие методические приёмы способствуют наиболее эффективной работе студентов в электротехнической лаборатории и лучшему усвоению учебного материала?
- 3) как стимулировать студентов к овладению знаниями в процессе прохождения лабораторного практикума?

Анализ. Не отказываясь от новых методов обучения, таких как игровые формы проведения занятия или IT-технологии, в частности, компьютерные программы, авторы настаивают на важности именно лабораторного практикума, где студенты получают тактильный и визуальный опыт общения с реальным электрооборудованием, осваивают не только теорию, но и приобретают практический опыт работы, учатся работать коллективно.

В соответствии с [1] студент на лабораторных занятиях приобретает опыт постановки эксперимента, который подтверждает теоретические положения, модели, законы. Так, на лабораторных занятиях по электротехнике, непосредственно возле лабораторного стенда происходит проработка базовых законов электротехники: Ома, Кирхгофа, закона электромагнитной индукции и т.д. Несмотря на то, что студенты должны хорошо знать эти законы из курса физики, но как пока-

зывает наш многолетний опыт, порядка половины студентов в группе не могут самостоятельно определить сопротивление резистора косвенным методом, т.е. когда измеряется напряжение и сила тока на участке электрической цепи.

Собирая электрическую цепь на стенде по заданной схеме, студент должен воочию понять структуру электрической цепи, понять различие между цепями постоянного и переменного тока, понять различия между однофазной и трехфазной цепью переменного тока, между генераторным и двигательным режимом работы электрической машины. Студенты получают навыки при работе с измерительными приборами как одно-, так и многопредельными, что важно не только для электротехнической лаборатории, но и для дальнейшего обучения студента технического профиля. Еще более важны и визуально значимы лабораторные работы по разделу «электроника и микропроцессорная техника». К тому же, именно на этих работах, подавляющее большинство студент получает навыки работы с таким измерительным устройством как осциллограф.

Более того, на лабораторных работах по электротехнике студенты получают базовые сведения по электробезопасности, в частности получают информацию об опасных уровнях напряжений и токов, что необходимо не только инженеру, но и современному человеку вообще.

Идеальная ситуация, когда лабораторная работа идет непосредственно за лекцией, получается далеко не всегда. Поэтому в методических указаниях по лабораторным работам необходимо давать общие теоретические положения, как, например, это сделано на кафедре общей электротехники НТУ «ХПИ» в [2, 3, 4]. Это существенно помогает в самостоятельной работе студента, особенно при подготовке к лабораторной работе и оформлении отчета по ней. Преподаватель, ведущий лабораторное занятие, в начале этого занятия осуществляет инструктаж, останавливаясь на важных теоретических моментах темы занятия.

В лаборатории необходимо, чтобы каждый (!) студент возле стенда вел протокол эксперимента и вообще аккуратно относился к той информации, которую он получает на занятии. И в этом состоит важная роль преподавателя, который непосредственно проверяет и контролирует работу студентов.

Исходя из нашего опыта, должен соблюдаться комплексный подход в преподавании курса электротехники, т.е. триада лекция – практика – лаборатория, не должна нарушаться. В частности, считаем недопустимым сокращение количества академических часов на изложение электротехники – менее 80 академических часов в семестр, из которых – 32 часа лекций в семестр, 32 часа лабораторных занятий и 16 часов практических. Ниже этого уровня изложение дисциплины становится сильно усеченным, при этом приходится урезать и сокращать значительную часть лекционного материала, что является критичным для получения полноценных знаний по электротехнике, которая является

одной из базовых дисциплин для студентов технических специальностей. Так, например, на некоторых специальностях в НТУ «ХПИ» количество аудиторных занятий по электротехнике было снижено до 32 часов: 16 часов лекций и столько же лабораторных занятий, при полном отсутствии практических занятий. Можно ли при такой аудиторной нагрузке говорить о качественном процессе преподавания и усвоения студентами дисциплины, если даже на минимальный контроль знаний не остается времени?

Вынесение большого объема учебного материала на самостоятельную проработку не способствует повышению уровня образования, так как по нашему мнению, действительно качественно работать самостоятельно над усвоением теоретического материала могут не более 10% студентов.

Также возникает важный вопрос – как правильно и вообще эффективно построить учебный процесс в электротехнической лаборатории с учетом специфики работы. А именно при фронтальном методе, когда учебная группа, разделенная на отдельные подгруппы, выполняет одну и ту же работу – каждая возле своего стенда.

Многолетняя практика показывает, что «усредненный» студент имеет подготовку не выше среднего балла и соответствующий интеллектуальный уровень, поэтому преподаватель вынужден исходить из этого.

Следовательно, нельзя перегружать студента информацией или значительно ускорять темп изложения материала. Даже студент с очень хорошей подготовкой и интеллектуальными способностями не сможет выдержать слишком высокий темп и плотность материала. Необходимо выдерживать паузы для усвоения информации студентами, т.е. важна разумная инерционность! Возможные крайности в стиле ведения лабораторного занятия также недопустимы. Первая – студент фактически превращается в статиста, лабораторный эксперимент почти полностью за него проводит преподаватель, а студент только фиксирует результат в протокол исследования. Вторая – студент предоставлен сам себе, без какого-либо контроля со стороны преподавателя, так как из-за объединения потоков и групп на лабораторных занятиях число студентов может достигать 20, а то и 30 человек на одного преподавателя!

Хотя понимаем, что в условиях определенного образовательного цейтнота, зачастую возникает необходимость спешки. Но, при этом, необходимо также осуществлять строгий контроль за действиями студента в лаборатории с высокими напряжениями, и также необходимо следить, чтобы каждый студент не только участвовал в выполнении лабораторного эксперимента, но и, повторимся, фиксировал результат этого эксперимента в заранее заготовленный протокол. Поэтому важно руководить оптимальным количеством студентов не более 12 человек на одного преподавателя. Если число студентов значительно превышает этот показатель, то для обеспечения нормального учебного процесса преподаватель вынужден переходить к более жесткой форме общения со студентами. За долгие годы преподавания можем сделать вывод, что оптимальный вариант для преподавателя – 3 подгруппы по 4 человека возле одного стенда.

Флуктуации поведения в учебной группе с увеличением числа студентов практически прямо пропорционально возрастают и их можно считать информационным шумом, подавить который может как раз определенная «авторитарность» стиля общения: повышение голоса, предельная четкость указаний без метафор и шуток, ускорение темпа преподавания. Это приводит к увеличению физической и эмоциональной нагрузки как на преподавателя, так и на студента, что не всегда легко преодолимо, а это в свою очередь может сказаться на ослаблении контроля и ухудшении качества преподавания. Тем более страдает разумная инерционность процесса преподавания, о которой говорилось выше.

Важная проблема преподавания – стимулирование студентов в процессе обучения. В этой связи рейтинговая система, принятая в высшей школе в постсоветское время, хорошо себя зарекомендовала. Стало возможным при хорошей успеваемости получить итоговую оценку только за счет поточных оценок, причем, удельный вес оценки за сданные лабораторные работы весьма значителен. В течение семестра преподаватель может поощрять прилежание студента. Например, чем раньше происходит защита отчета по лабораторной работе, тем более высокий балл получает студент. Участие студентов в первом и втором этапе Всеукраинской олимпиады по электротехнике также поощряется, и особо поощряются призеры олимпиады. В последние годы стипендиальный рейтинг также является стимулом к хорошей успеваемости. Хотя надо понимать, что в вопросе побудительных стимулов в системе высшего образования, не все зависит только от преподавателя.

Выводы:

1) проведение лабораторных занятий в процессе подготовки студентов по электротехнике играет ключевую роль, и сокращать количество академических часов на проведение таких занятий недопустимо;

2) нельзя свести процесс проведения лабораторных занятий по электротехнике только к работе с компьютерными программами, а использовать их нужно, как дополнительный инструмент в учебном процессе;

3) повышение качества преподавания не сводится к увеличению темпа изложения материала и перегрузки информацией студента, здесь важен умеренный темп и разумная инерционность, иначе усвоения материала не произойдет;

4) качество преподавания обеспечивается: за счет внятности, последовательности и логичности, четкости постановки задачи – студент должен понимать, что ему нужно делать на каждом этапе работы, т.е. преподаватель обеспечивает обратную связь со студентами и контролирует их, исправляя ошибки, обращая внимание на важные нюансы учебного материала;

5) контроль усвоения происходит в форме собеседования, причем, критерии оценки заранее оговорены и известны каждому студенту;

6) на одного преподавателя в лаборатории не должно быть свыше 12 студентов, иначе усложняется образовательный процесс и повышается нагрузка на преподавателя, что может приводить к жесткому стилю преподавания;

7) необхідно поощрять и стимулировать прилежание и стремление студентов к овладению знаниями и получению хороших оценок.

Список літератури

- 1 Система стандартів з організації навчального процесу. Лабораторні заняття. Порядок підготовки та проведення. СТБУЗ-ХПІ-2.05-2003.
- 2 Електричні кола: лаб. практи. з електротехніки : в 3-х ч. – Ч.1 / В.Г.Данько, Н.В.Крюкова, В.С. Марков та ін. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – 52 с.
- 3 Електротехнічні пристрої: лаб. практи. з електротехніки у 3-х ч. Ч. II / В.Ф. Болюх, В.С.Марков, І.В. Поляков та ін. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – 54 с.
- 4 Електроніка та мікропроцесорна техніка : лаб. практикум з електротехніки: в 3-х ч. Ч.ІІІ / В.Ф.Болюх, В.С. Марков, І.В. Поляков та ін. – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – 76 с.

References (transliterated)

- 1 The system of standards for the organization of the educational process. Laboratory classes. Procedure of preparation and carrying out. СТБУЗ-ХПІ-2.05-2003.
- 2 Electric circuits: a laboratory workshop on electrical engineering / V.G. Danko, N.V. Kryukova, V.S. Markov, I.V. Polyakov, E.V. Goncharov. – Kh.: NTU “KhPI”, Part I, 2015. – 47 p.
- 3 Electrotechnical devices: laboratory workshop on electrical engineering / V.G. Bolyukh, V.S. Markov, I.V. Polyakov, E.V. Goncharov, N.V. Kryukova. – Kh.: NTU “KhPI”, Part II, 2016. – 52 p.
- 4 Electronics and Microprocessor Technology: Laboratory Electrical Workshop / V.G. Bolyukh, V.S. Markov, I.V. Polyakov, E.V. Goncharov, N.V. Kryukova. – Kh.: NTU “KhPI”, Part III, 2018. – 76 p.

Поступила (received) 16.01.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

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

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

В.С. ГРИНЧЕНКО**ОЦІНКА ДОВЖИНИ СИСТЕМИ КОНТУРНОГО ЕКРАНУВАННЯ ПРИ ЗМЕНШЕННІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ**

Розглянуто зменшення магнітного поля кабельної лінії електропередачі за допомогою системи контурного екранування. Отримано наближені аналітичні вирази для розрахунку комплексної амплітуди та діючого значення магнітної індукції в області екранування. Запропоновано прозору фізичну інтерпретацію отриманих співвідношень і параметру γ , який вони містять. Розглянуто граничний випадок $\gamma=1$, коли довжина системи контурного екранування набагато перевищує відстань від кабельної лінії до області екранування. Для випадку довільної довжини системи контурного екранування запропоновано функцію апроксимації залежності параметра γ від відношення відстані між крайніми точками екранного контуру та областю екранування до відстані між центральним кабелем лінії електропередачі та границею області екранування. Для визначення довжини системи контурного екранування розв'язано обернену задачу. У результаті дано рекомендації щодо оцінки довжини системи контурного екранування, якщо відомо таке: гранично допустимий рівень магнітного поля, який має бути досягнуто у всій області екранування; величина струму в кабельній лінії та відстань між її кабелями; амплітуда та початкова фаза струму в системі контурного екранування, а також відстань між її проводами, які розташовано паралельно кабельній лінії; довжина області екранування та її віддаленість від кабельної лінії.

Ключові слова: кабельна лінія, екранування, гранично допустимий рівень, магнітне поле, промислова частота.

В.С. ГРИНЧЕНКО**ОЦЕНКА ДЛИНЫ СИСТЕМЫ КОНТУРНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ ПРИ УМЕНЬШЕНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ**

Рассмотрено уменьшение магнитного поля кабельной линии электропередачи при помощи системы контурного экранирования. Получены приближенные аналитические выражения для расчета комплексной амплитуды и действующего значения магнитной индукции в области экранирования. Дана прозрачная физическая интерпретация полученных соотношений и параметра γ , который они содержат. Рассмотрен предельный случай $\gamma=1$, когда длина системы контурного экранирования намного превосходит расстояние от кабельной линии до области экранирования. Для случая произвольной длины системы контурного экранирования предложена функция аппроксимации зависимости параметра γ от отношения расстояния между крайними точками экранирующего контура и областью экранирования к расстоянию между центральным кабелем линии электропередачи и границей области экранирования. Для определения длины системы контурного экранирования решена обратная задача. В результате даны рекомендации по оценке длины системы контурного экранирования, если известно следующее: предельно допустимый уровень магнитного поля, который должен быть достигнут во всей области экранирования; величина тока в кабельной линии и расстояние между ее кабелями; амплитуда и начальная фаза тока в системе контурного экранирования, а также расстояние между ее проводами, которые расположены параллельно кабельной линии; длина области экранирования и ее удаленность от кабельной линии.

Ключевые слова: кабельная линия, экранирование, предельно допустимый уровень, магнитное поле, промышленная частота.

V.S. GRINCHENKO**LENGTH ESTIMATION FOR LOOP SHIELDING SYSTEM WHEN DECREASING CABLE LINE MAGNETIC FIELD**

This paper deals with a mitigation of a cable line magnetic field by a loop shield. Approximate analytical expressions for a phasor and rms value of a magnetic flux density in a shielding area are developed. I give a clear physical interpretation for the obtained relations and the parameter γ that they contain. The limiting case $\gamma=1$ is considered, when the loop shield length is much greater than the distance from the cable line to the shielding area. For the case of an arbitrary length of the loop shield, I propose a function to approximate the dependence of γ on the ratio of the distance between the extreme points of the loop shield and the shielding area to the distance between the central cable of the power line and the shielding area boundary. To determine the loop shield length, the inverse problem is solved. As a result, I develop recommendations for estimating the loop shield length taking into account the following: the magnetic field reference level in the shielding area; the current in the cable line and the distance between its cables; the amplitude and the phase shift of the current in the loop shield, as well as the distance between its conductors, which are parallel to the cable line; the length of the shielding area and its distance from the cable line.

Keywords: cable line, shielding, reference level, magnetic field, power frequency.

Вступ. Найбільш доцільним засобом передачі електричної енергії в житлових зонах, особливо в разі щільної забудови, є підземні високовольтні кабельні лінії (КЛ). Це зумовлено тим, що згідно [1] ширина охоронної зони повітряних ліній електропередачі сягає десятків метрів.

Для прокладки високовольтних КЛ використовують одножильні кабелі з ізоляцією зі зшитого поліетилену. Нормативний документ [2] допускає прокладання кабелів як у горизонтальній площині, так і у вершинах трикутника. Прокладання кабелів «у площині» набуло широке розповсюдження, оскільки забезпечує більшу пропускну спроможність

КЛ, подальше підвищення якої досягається збільшенням відстані між кабелями. Проте магнітне поле (МП) КЛ із розташуванням кабелів «у площині» істотно перевищує МП при розташуванні кабелів «у трикутник» [3]. Оскільки в будівлях, що розташовуються поблизу трас КЛ, МП не повинно перевищувати гранично допустимий рівень $B_0=0,5$ мкТл [2], то виникає необхідність його екранування.

Традиційно для зменшення МП КЛ використовують електромагнітні та магнітні (магнітостатичні) екрани [4-6]. Проте на цей час найбільш перспективним засобом зменшення МП КЛ

є системи контурного екранування (СКЕ) [7-10]. Принцип дії СКЕ аналогічний до принципу дії електромагнітного екрана: первинне змінне МП КЛ створює змінний магнітний потік, що пронизує СКЕ, та відповідно до закону електромагнітної індукції в проводах СКЕ індукуються електричний струм. Для підвищення ефективності екранування використовують СКЕ із різною кількістю контурів, варіюють їхню форму та орієнтацію в просторі, використовують допоміжні конденсатори та феромагнітні елементи. Так, в [10] запропоновано одноконтурний екран із несиметричним магнітним зв'язком, який забезпечує високу ефективність екранування та мінімізує тепловий вплив на КЛ, що дає змогу уникнути зниження її пропускної спроможності.

Проте відомі дослідження обмежено аналізом екранованого МП у плоскопаралельному наближенні. Тобто вважається, що довжина СКЕ набагато перевищує відстань від КЛ до зони екранування. Тому питання визначення довжини СКЕ лишається недослідженим.

Метою даної роботи є оцінка довжини СКЕ, при якій в області екранування МП КЛ зменшується до гранично допустимого рівня.

Умовні позначення та використана система координат показані на рис. 1. Точка початку координат розташовується на висоті 0,5 м над умовним рівнем землі. Тоді згідно [2] МП КЛ нормується в площині xOz .

Силові кабелі пронумеровано латинськими літерами: L – лівий, C – центральний, R – правий. Вони розташовані в площині $y = -h_1$. Відстань між сусідніми кабелями позначено a_1 . Вважається, що КЛ працює в усталеному симетричному режимі, частота дорівнює промисловій 50 Гц, а струми КЛ утворюють пряму послідовність. Тоді комплексні амплітуди струмів у жилах визначаються у такий спосіб:

$$\begin{cases} \dot{I}_L = \sqrt{2} I e^{-j\frac{2\pi}{3}}, \\ \dot{I}_C = \sqrt{2} I, \\ \dot{I}_R = \sqrt{2} I e^{j\frac{2\pi}{3}}, \end{cases} \quad (1)$$

де I – діюче значення струму в жилах кабелів; j – уявна одиниця.

У цій роботі взято до уваги лише екранний контур без урахування інших елементів, які належать СКЕ. Контур розташований в площині $y = -h_2$. Протяжні частини контуру паралельні КЛ. Довжина контуру – l_2 , його ширина – $2a_2$, комплексна амплітуда струму в екранному контурі – $\dot{I}_2$.

На рис. 2,а показано розташування КЛ, екранного контуру СКЕ та області екранування в горизонтальній проекції. Довжину області екранування позначено l , відстань до КЛ – b . Різниця половин довжин екранного контуру та області екранування $c = (l_2 - l)/2$.

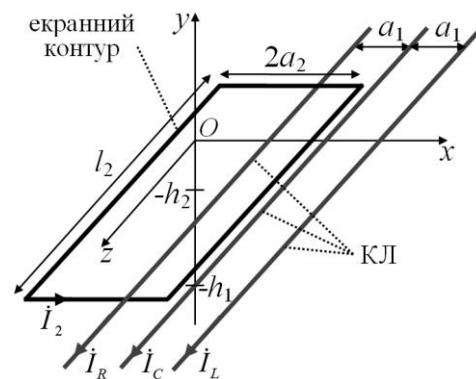


Рис. 1. Схема розташування КЛ та екранного контуру

Визначення МП. При аналізі МП системи «КЛ – СКЕ» зроблено низку спрощень:

а) Оскільки рівень МП в області екранування тим більший, чим ближче розташована точка спостереження до КЛ, то розглянуто МП лише у крайній точці Р області екранування.

б) В [11] показано, що МП системи струмів (1) при розташуванні проводів в одній площині еквівалентно МП прямого та оберненого проводів зі струмом

$$\dot{I}_1 = j \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I.$$

Відповідно, КЛ замінено двома

струмовими нитками, як показано на рис. 2,б.

в) Оскільки довжина поперечних ділянок СКЕ, які паралельні осі x, зазвичай набагато менша за довжину повздовжніх ділянок, що паралельні осі z, то при аналізі МП першими знехтувано.

г) Вважається, що кут огляду СКЕ із точки Р є тупим. Тому повздовжні ділянки СКЕ змінено на напівнескінченні струмові нитки.

д) Вважається, що область екранування віддалено настільки, що можна нехтувати глибиною прокладки КЛ та СКЕ, тобто $h_1 = h_2 = 0$. Отже, точка спостереження Р та струмові нитки, які показано на рис. 2,б, розташовано в одній площині.

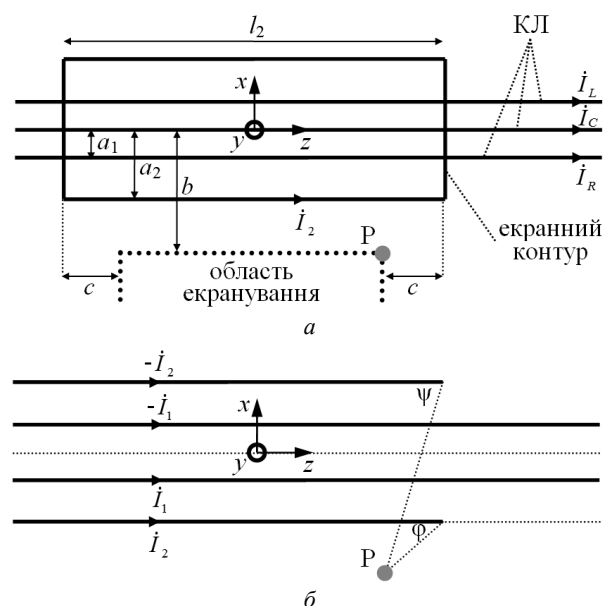


Рис. 2. Горизонтальна проекція КЛ та екранного контуру (а) та вигляд спрощеної системи струмових ниток (б)

Отже, враховуючи прийняті припущення, задачу зведено до розрахунку МП струмових ниток у точці спостереження Р (рис. 2,б). Оскільки точка Р та струмові нитки лежать в одній площині, то комплексна амплітуда магнітної індукції в точці Р має тільки одну ненульову у-компоненту. Для зручності розглядається мінус у-компонента магнітної індукції:

$$\dot{B}_p = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\dot{I}_1}{b-a_1} - \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\dot{I}_1}{b+a_1} + \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\dot{I}_2}{b-a_2} (1+\cos \varphi) - \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\dot{I}_2}{b+a_2} (1+\cos \psi),$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала, а косинуси кутів φ та ψ , які показано на рис. 2, очевидним способом виражаються через a_2 , b та c .

Праву частину отриманого співвідношення переписано в термінах безрозмірних змінних $\tilde{a}_1 = a_1/b$, $\tilde{a}_2 = a_2/b$, $\tilde{c} = c/b$ та розкладено в ряд в околиці $\tilde{a}_1 = 0$, $\tilde{a}_2 = 0$, лишаючи тільки лінійні члени. У результаті

$$\dot{B}_p = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\dot{I}_1}{b} \cdot \left\{ 2\tilde{a}_1 + \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} \frac{2\tilde{c} + \tilde{c}^3 + (1+\tilde{c}^2)^{3/2}}{(1+\tilde{c}^2)^{3/2}} \tilde{a}_2 \right\}.$$

Повертаючись до початкових розмірних змінних, отримано вираз для комплексної амплітуди магнітної індукції в точці Р:

$$\dot{B}_p = \frac{\mu_0}{\pi b^2} \cdot \{ a_1 \cdot \dot{I}_1 + \gamma \cdot a_2 \cdot \dot{I}_2 \}, \quad (2)$$

де безрозмірний параметр

$$\gamma = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{\frac{c}{b}}{\sqrt{1 + \left(\frac{c}{b}\right)^2}} \cdot \left(1 + \frac{1}{1 + \left(\frac{c}{b}\right)^2} \right) \right). \quad (3)$$

Вираз (2) має просту фізичну інтерпретацію, оскільки перший доданок його правої частини є наближеним значенням величини МП КЛ, а другий доданок – МП СКЕ. Параметр γ залежить від довжини СКЕ та визначає внесок її струмів у результуюче МП. Коли c набагато більша за b , параметр $\gamma = 1$, та, відповідно, співвідношення (2) описує МП системи нескінченних струмових ниток.

З (2) випливає, що діюче значення магнітної індукції, що використовується при нормуванні МП, має вигляд

$$B = \sqrt{\frac{\dot{B}_p \cdot \dot{B}_p^*}{2}} = \frac{\mu_0}{\sqrt{2} \pi b^2} \cdot \left\{ a_1^2 \dot{I}_1 \dot{I}_1^* + \gamma^2 \cdot a_2^2 \dot{I}_2 \dot{I}_2^* + \gamma \cdot a_1 a_2 (\dot{I}_1^* \dot{I}_2 + \dot{I}_1 \dot{I}_2^*) \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

де $\dot{B}_p^*$ та $\dot{B}_p$ є комплексно-спряженими.

Оцінка довжини СКЕ. Для визначення довжини СКЕ в ліву частину (4) покладено $B = B_0$, а отримане співвідношення розв'язано відносно γ . В результаті отримано таке:

$$\gamma = -\frac{a_1}{a_2} \cdot \text{Re} \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} - \sqrt{\left(\frac{a_1}{a_2} \cdot \text{Im} \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{\pi b^2 B_0}{\mu_0 a_2 I_2} \right)^2}, \quad (5)$$

де I_2 – амплітуда струму в екранному контурі.

Параметр γ визначає довжину c крайової ділянки СКЕ. Зважаючи на поведінку γ як функції змінної c/b , яка представлена на рис. 3, запропоновано такий спосіб її апроксимації:

$$\gamma = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{5}{6} \cdot \frac{c}{b}, & \frac{c}{b} < \frac{3}{5}, \\ 1, & \frac{c}{b} \geq \frac{3}{5}. \end{cases} \quad (6)$$

Найбільша розбіжність між точним (3) та наближеним (6) значеннями γ спостерігається лише у відносно вузькому інтервалі поблизу $c/b = \sqrt{2}$.

Обертаючи (6), отримано таке:

$$\frac{c}{b} = \begin{cases} \frac{3}{5} \cdot (2\gamma - 1), & \gamma < 1, \\ \frac{3}{5}, & \gamma \geq 1. \end{cases} \quad (7)$$

Порівняльний аналіз результатів розрахунку МП за наближеним співвідношенням (4) і точними виразами, які описують МП системи «КЛ – СКЕ» без використання спрощень a -д та не приводяться в цій роботі через їхню громіздкість, показує, що отримане за допомогою (7) значення c необхідно помножити на корегувальний множник 1,5. Тобто проекція СКЕ на область екранування виступає за її границю (у напрямку осі z) на $1,5 \cdot c$ з кожного кінця.

Отже, для оцінки довжини СКЕ при зменшенні МП КЛ із прокладкою кабелів «у площині» необхідно:

- визначити довжину l області екранування;
- визначити відстань a_1 між сусідніми кабелями та діюче значення струму I у КЛ;
- визначити напіввідстань a_2 між проводами СКЕ та комплексну амплітуду струму $\dot{I}_2$ у її проводах;
- визначити відстань b від центрального кабелю КЛ до границі області екранування, що розташована всередині будинку на відстані 0,5 м від стіни;
- визначити гранично допустимий рівень магнітної індукції B_0 за допомогою нормативних документів;
- розрахувати значення параметра γ за допомогою (5), де $\dot{I}_1 \approx j \cdot 1,22 \cdot I$.
- визначити c за допомогою (7).

Нарешті, загальна довжина СКЕ дорівнює $l + 3 \cdot c$.

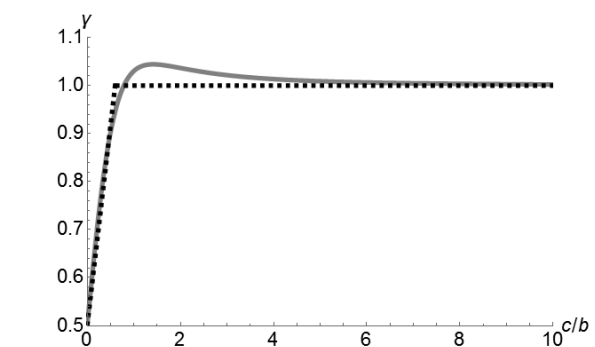


Рис. 3. Графік залежності параметра γ від відношення розмірів c/b (суцільна крива) та її апроксимація (пунктирна)

Висновки.

1. У роботі отримано наближені аналітичні вирази для комплексної амплітуди та діючого значення магнітної індукції в області екранування, які можуть застосовуватися для оцінки рівня магнітного поля кабельної лінії при використанні систем контурного екранування.

2. Розроблено рекомендації для оцінки довжини систем контурного екранування, при якій магнітне поле, утворене кабельною лінією електропередачі, буде зменшено в області екранування до гранично допустимого рівня.

Список літератури

1. Постанова Кабінету Міністрів України від 4 березня 1997 р. № 209 «Про затвердження Правил охорони електричних мереж» у редакції від 5 квітня 2017 р.
2. Правила улаштування електроустановок. – К: Міненергуюгилля України, 2017. – 617 с.
3. Магнитное поле линий электропередачи и методы его снижения до безопасного уровня / В.Ю. Розов, С.Ю. Реуцкий, Д.Е. Пелевин, О.Ю. Пилигина // *Технічна електродинаміка*. – 2013. – № 2. – С. 3-9.
4. Salinas E. Conductive and ferromagnetic screening of 50 Hz magnetic fields from a three-phase system of busbars / E. Salinas // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2001. – Vol. 226-230. – Pp. 1239-1241.
5. Electromagnetic shielding of high-voltage cables / M. De Wulf, P. Wouters, P. Sergeant, L. Dupre, E. Hoferlin, S. Jacobs, P. Harlet // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2007. – Vol. 316. – Pp. e908–e911.
6. Highly efficient shielding of high-voltage underground power lines by pure iron screens / M. Zucca, G. Lorusso, F. Fiorillo, P.E. Roccato, M. Annibale // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2008. – Vol. 320. – Pp. e1065–e1069.
7. Magnetic shielding solutions for the junction zone of high voltage underground power lines / A. Canova, D. Bavastro, F. Freschi, L. Giaccone, M. Repetto // *Electric Power Systems Research*. – 2012. – Vol. 89. – Pp. 109-115.
8. del Pino-López J.C. The effectiveness of compensated passive loops for mitigating underground power cable magnetic fields / J.C. del Pino-López, P. Cruz-Romero // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2011. – Vol. 26, no. 2 – Pp. 674-683.
9. Maioli P. Passive loops technique for electromagnetic fields mitigation: applications and theoretical considerations / P. Maioli, E. Zaccone // *Jicable International Conference on Insulated Power Cables*. – 2007. – Pp. 231-236.
10. Эффективное контурное экранирование магнитного поля трехфазных кабельных линий при ограниченном тепловом воздействии на силовые кабели / В.Ю. Розов, В.С. Гринченко,

А.В. Ерисов, П.Н. Добродеев // *Електротехніка і Електромеханіка*. – 2019. – № 6. – С. 50-54.

11. Walling R.A. Series-capacitor compensated shield scheme for enhanced mitigation of transmission line magnetic fields / R.A. Walling, J.J. Paserba, C.W. Burns // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 1993. – Vol. 8, no. 1. – Pp. 461–469.

References (transliterated)

1. Decree of the Cabinet of Ministries of Ukraine dated March 4, 1997 No. 209 "About the statement of Rules of protection of electric networks": Edition on April 5, 2017. (Ukr).
2. *Pravyla ulashtuvannya elektroustanovok* [Rules of arrangement of electrical installations]. Kyiv, Minenergovugillja Ukraïny, 2017. 617 p. (Ukr).
3. Rozov V.Yu., Reutskii S.Yu., Pelevin D.E., Piliugina O.Yu. Magnitnoe pole linii elektroperedachi i metody ego snizheniia do bezopasnogo urovnia [The magnetic field of power transmission lines and the methods of its mitigation to a safe level]. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2013, no. 2, pp. 3-9. (Rus).
4. Salinas E. Conductive and ferromagnetic screening of 50 Hz magnetic fields from a three-phase system of busbars. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2001, vol. 226-230, pp. 1239-1241.
5. De Wulf M., Wouters P., Sergeant P., Dupre L., Hoferlin E., Jacobs S., Harlet P. Electromagnetic shielding of high-voltage cables. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2007, vol. 316, pp. e908–e911.
6. Zucca M., Lorusso G., Fiorillo F., Roccato P.E., Annibale M. Highly efficient shielding of high-voltage underground power lines by pure iron screens. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2008, vol. 320, pp. e1065–e1069.
7. Canova A., Bavastro D., Freschi F., Giaccone L., Repetto M. Magnetic shielding solutions for the junction zone of high voltage underground power lines. *Electric Power Systems Research*. 2012, vol. 89, pp. 109-115.
8. del Pino-López J.C., Cruz-Romero P. The effectiveness of compensated passive loops for mitigating underground power cable magnetic fields. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2011, vol. 26, no. 2, pp. 674-683.
9. Maioli P., Zaccone E. Passive loops technique for electromagnetic fields mitigation: applications and theoretical considerations. *Jicable International Conference on Insulated Power Cables*. 2007, pp. 231-236.
10. Rozov V.Yu., Grinchenko V.S., Yerisov A.V., Dobrodeyev P.N. Efficient shielding of three-phase cable line magnetic field by passive loop under limited thermal effect on power cables. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2019, no. 6, pp. 50-54.
11. Walling R.A., Paserba J.J., Burns C.W. Series-capacitor compensated shield scheme for enhanced mitigation of transmission line magnetic fields. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1993, vol. 8, no. 1, pp. 461–469.

Поступила (received) 01.10.2020

Відомості про автора / Сведения про автора / About the author

Грінченко Володимир Сергійович (Грінченко Владимир Сергеевич, Grinchenko Volodymyr Serhiiovych) – Державна установа «Інститут технічних проблем магнетизму Національної академії наук України», кандидат технічних наук, заступник директора з наукової роботи; м. Харків, Україна; e-mail: vsgrinchenko@gmail.com

А.В. БОРЦОВ**ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ПОВЕРКИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ДЕЛИТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ**

Создан и экспериментально исследован генератор импульсов напряжения для поверки высоковольтных делителей напряжения. В генераторе в качестве ключевого элемента использован высоковольтный быстродействующий *MOSFET* – транзистор. Для устранения эффекта Миллера нагрузка генератора включена в исток *MOSFET* – транзистора. Нагрузка согласована с выходом генератора. Генератор подключается к объекту испытаний с помощью экранированной витой пары длиной 0,5 метра. Влияние емкости нагрузки и экранированной витой пары компенсируется *RL* – цепью, включенной на выходе генератора. Такое включение нагрузки позволило получить время нарастания импульса напряжения равным времени коммутации *MOSFET* – транзистора. Генератор имеет следующие амплитудно-временные характеристики: форма импульса напряжения – прямоугольная, амплитуда импульса напряжения – 350 В, длительность фронта импульса напряжения не более 25 нс, выброс на фронте импульса напряжения не превышает 3 %, длительность спада импульса напряжения не более 40 нс. Длительность импульса напряжения плавно регулируется от 2 мкс до 65 мкс. Генератор импульсных напряжений использован при метрологической поверке на низком напряжении устройства для измерения импульсов высокого напряжения УИВН-ОДН-1,2 (г. Артемовск) в 2016г. Экспериментальные исследования показали хорошее совпадение метрологических характеристик УИВН-ОДН-1,2 на низком и на высоком напряжении. Следовательно, с помощью генератора можно поверять на низком напряжении высоковольтные делители напряжения с коэффициентом деления до 50000. Генератор прост в изготовлении и не требует сложной настройки.

Ключевые слова: высоковольтный делитель напряжения, генератор импульсов напряжения, *MOSFET* – транзистор, эффект Миллера, коэффициент деления, форма импульса напряжения, амплитуда импульса напряжения, фронт импульса напряжения, спад импульса напряжения

О.В. БОРЦОВ**ГЕНЕРАТОР ІМПУЛЬСНИХ НАПРУГ ДЛЯ ПОВІРКИ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ДІЛЬНИКІВ НАПРУГИ**

Створено й експериментально досліджено генератор імпульсів напруги для повірки високовольтних дільників напруги. У генераторі як ключовий елемент використано високовольтний швидкодіючий *MOSFET* – транзистор. Для усунення ефекту Міллера навантаження включено в витік *MOSFET* – транзистора. Навантаження узгоджено з виходом генератора. Генератор підключається до об'єкта випробувань за допомогою екранованої кручений пари довжиною 0,5 метра. Вплив ємності навантаження та екранованої крученої пари компенсується *RL* – ланцюгом, включеним на виході генератора. Таке включення навантаження дозволило отримати час наростання імпульсу напруги рівним часу комутації *MOSFET* – транзистора. Генератор має наступні амплітудно-тимчасові характеристики: форма імпульсу напруги – прямокутна, амплітуда імпульсу напруги – 350 В, тривалість фронту імпульсу напруги не більше 25 нс, викид на фронті імпульсу напруги не перевищує 3%, тривалість спаду імпульсу напруги не більше 40 нс. Тривалість імпульсу напруги плавно регулюється від 2 мкс до 65 мкс. Генератор імпульсних напруг використано при метрологічній повірці на низькій напрузі пристрою для вимірювання імпульсів високої напруги УІВН-ОДН-1,2 (м Артемівськ) в 2016р. Експериментальні дослідження показали хороший збіг метрологічних характеристик УІВН-ОДН-1,2 на низькій і на високій напрузі. Таким чином, за допомогою генератора можна повірять на низькій напрузі високовольтні дільники напруги з коефіцієнтом ділення до 50000. Генератор простий у виготовленні і не вимагає складного налагодження.

Ключові слова: високовольтний дільник напруги, генератор імпульсів напруги, *MOSFET* – транзистор, ефект Міллера, коефіцієнт ділення, форма імпульсу напруги, амплітуда імпульсу напруги, фронт імпульсу напруги, спад імпульсу напруги

A.V. BORTSOV**PULSED VOLTAGE GENERATOR FOR VERIFICATION HIGH VOLTAGE DIVIDERS**

The voltage pulse generator for testing high-voltage dividers has been created and experimentally investigated. The generator uses a high-voltage high-speed *MOSFET* – transistor as a key element. To eliminate the Miller effect, the load is included in the source of the *MOSFET* – transistor. The load is matched with the generator output. The generator is connected to the test object using a 0.5 meter shielded twisted pair cable. The influence of the load capacitance and shielded twisted pair is compensated by the *RL* – circuit connected to the generator output. Such switching on the load made it possible to obtain the rise time of the voltage pulse equal to the switching time of the *MOSFET* – transistor. The generator has the following amplitude-time characteristics: the shape of the pulse is rectangular, the amplitude of the voltage pulse is 350 V, voltage pulse front duration is not more than 25 ns, surge at the front of a voltage pulse does not exceed 3 %, and voltage drop is not more than 40 ns. The duration of the voltage pulse is continuously adjustable from 2 μ s to 65 μ s. The pulse voltage generator was used during metrological verification at low voltage of the device for measuring high voltage pulses UIVN-ODN-1,2 (Artyomovsk) in 2016. Experimental investigations have shown good agreement between the metrological characteristics of UIVN-ODN-1.2 at low and high voltage. Therefore, with the help of a generator, it is possible to verify high voltage dividers with a division ratio of up to 50,000 at low voltage. The generator is simple to manufacture and does not require complex settings.

Keywords: high-voltage divider, a pulse generator, *MOSFET* – transistor, Miller effect, division factor, voltage pulse shape, voltage pulse amplitude, voltage pulse front, voltage pulse decline

Введение. Обычно устройство для измерения импульсных высоких напряжений состоит из высоковольтного делителя напряжения (ВДН), измерительного кабеля и осциллографа. Так как эталонные источники импульсных напряжений мегавольтного диапазона для калибровки высоковольтных делителей напряжения отсутствуют, экспериментальное опреде-

ление погрешности измерений представляет собой сложную задачу [1, 2]. При этом основное требование к ВДН – передача с заданной погрешностью формы измеряемого импульса и его амплитудно-временных характеристик: амплитуды, фронта и длительности импульса. Коэффициент деления ВДН K_d , определяемый как отношение измеряемого напряжения к

напряжению на выходе ВДН, может составлять десятки тысяч. Использование при создании ВДН высоковольтных генераторов импульсных напряжений (ГИН), например, ГИН Аркадьева-Маркса или ГИН с использованием SOS – эффекта, не представляется целесообразным в виду их сложности и высокой стоимости [3].

Для экспериментальной проверки ВДН естественно использовать низковольтные (амплитуда импульсов $U_m \leq 500$ В) генераторы импульсных напряжений. Современные цифровые осциллографы позволяют измерять с погрешностью не более 5 % импульсы напряжения амплитудой $U_{\text{пвх}} \geq 5$ мВ [4]. Следовательно, коэффициент деления $K_d = U_m / U_{\text{пвх}} = 100 U_m$ (В). Применение стандартных генераторов с $U_m \leq 50$ В ограничивает коэффициент деления в диапазоне $K_d \leq 5000$.

Цель работы – разработка, изготовление и экспериментальные исследования генератора импульсных напряжений, позволяющего проверять ВДН с коэффициентом деления $K_d \leq 50000$.

Принцип действия и описание генератора. Генератор реализован по блок-схеме, представленной на рис. 1.

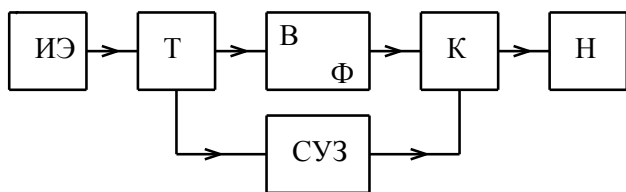


Рис. 1. Блок-схема генератора импульсных напряжений: ИЭ – источник энергии; Т – сетевой трансформатор; В – выпрямитель; Ф – фильтр; СУЗ – система управления и защиты; К – коммутатор; Н – нагрузка

В качестве источника энергии (ИЭ) использована однофазная сеть 220 В, 50 Гц. Сетевой трансформатор (Т) служит для питания системы управления и защиты (СУЗ) и “гальванической развязки” генератора от источника энергии. С выхода блока выпрямителя (В) – фильтр (Ф) постоянное напряжение +350 В коммутатором (К) подается на нагрузку (Н). Режим работы коммутатора задается системой управления и защиты.

Электрическая схема генератора импульсных напряжений представлена на рис. 2.

Трансформатор TR1 содержит две вторичных обмотки – первая, с коэффициентом трансформации K_T близким к 1, служит для создания рабочего напряжения генератора $U = 350$ В (VD1, C1, C2). Ко второй обмотке подключен стабилизатор напряжения +15 В (VD2, C3, C4, DA1, L1, C5, C9) для питания системы управления и защиты.

Генератор управляющих импульсов (DD1.1, DD1.2, C6, VD3, VD4, R1, R2, RP1) [5] позволяет регулировать длительность в диапазоне от 2 мкс до 65 мкс. Согласование генератора с коммутатором VT1 осуществляется драйвером верхнего ключа IR2117 (DD2, VD5, C7, C8).

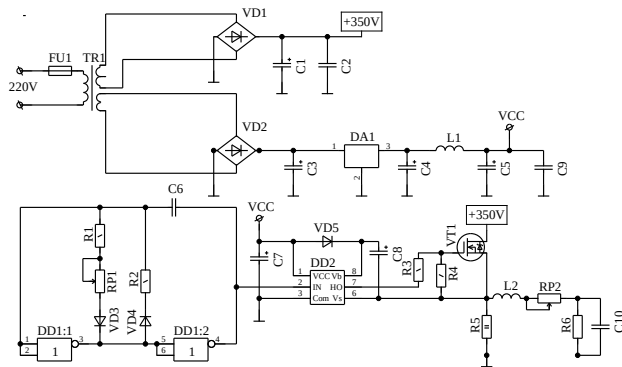


Рис. 2. Электрическая схема генератора импульсных напряжений

В качестве нагрузки использован малоиндуктивный резистор R5 сопротивлением 50 Ом. Импульс напряжения с нагрузки снимается экранированной витой парой длиной 0,5 метра (волновое сопротивление около 50 Ом) [5].

Входное сопротивление R6 и входная емкость C10 осциллографа “заваливают” фронт импульса. Для коррекции фронта импульса использована цепь RP2, L2.

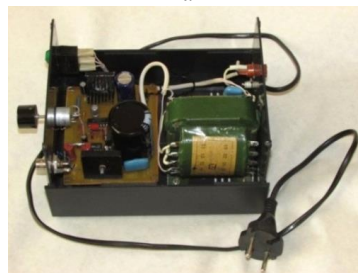
В качестве коммутатора выбран высоковольтный быстродействующий MOSFET – транзистор IRF840 с параметрами: максимальное рабочее напряжение – 500 В, время коммутации – 20 нс [6].

Известно, что для быстродействующих ключей характерен эффект Миллера – сильное влияние “проходной” емкости затвор-сток MOSFET – транзистора на форму импульса [7]. Для подавления эффекта Миллера нагрузка включена в цепь затвор-исток MOSFET – транзистора [5]. Такое включение нагрузки позволило получить время нарастания импульса, мало отличающееся от времени коммутации MOSFET – транзистора.

Внешний вид генератора импульсных напряжений показан на рис. 3.



а



б

Рис. 3. Внешний вид генератора: а – с верхней крышкой; б – со снятой верхней крышкой

Результаты измерений. Измерения при настройке генератора проводились осциллографом RIGOL DS1102E с полосой пропускания 100 МГц и погрешностью измерения не превышающей 5 % [4].

Из осциллограмм (рис. 4) видно, что амплитуда импульса напряжения – 350 В и время нарастания импульса на уровне 0,1-0,9 не превышает 20 нс, что соответствует длительности фронта не более 25 нс.

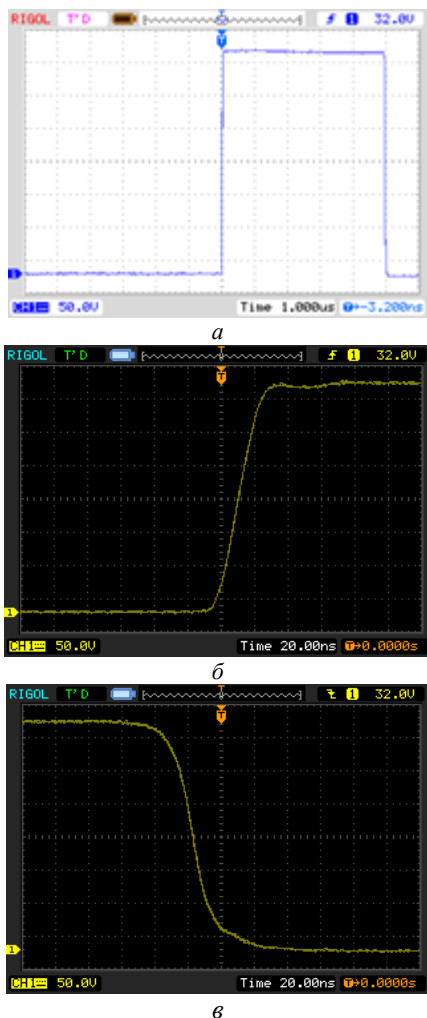


Рис. 4. Осциллограммы импульсов напряжения: а – полный импульс; б – фронт импульса; в – спад импульса

Выводы. 1. Разработан и изготовлен генератор импульсов напряжения с амплитудой 350 В и длительностью фронта не превышающей 25 нс. Данные амплитудно-временные параметры позволяют поверять высоковольтные делители напряжения с коэффициентом деления до 50000.

2. Генератор успешно апробирован при проверке высоковольтных омических делителей напряжения.

Список литературы

1. Кужекин И.П. Испытательные установки и измерения на высоком напряжении. М.: Энергия. 1980. 136 с.
2. Шваб А. Измерения на высоком напряжении. (Измерительные приборы и способы измерения). Пер. с нем. М.: Энергия. 1973. 232 с.
3. Кремнев В.В., Месяц Г.А. Методы умножения и трансформации импульсов в силовой электронике. Новосибирск: Наука. 1987. 226 с.
4. <http://www.rigol.com>
5. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 2-х томах. Пер. с англ. М.: Мир. 1983. – Т. 1. 598 с.
6. <http://www.irf.com>
7. Семенов Б.Ю. Силовая электроника: от простого к сложному. М.: СОЛОН-Пресс. 2005. 416 с.

References (transliterated)

1. Kuzhekin I.P. Ispytatel'nyye ustanovki i izmereniya na vysokom napryazhenii. Moscow: Energiya. 1980. 136 p.
2. Shvab A. Izmereniya na vysokom napryazhenii. (Izmeritel'nyye pribory i sposoby izmereniya). Per. s nem. Moscow: Energiya. 1973. 232 p.
3. Kremnev V.V., Mesyats G.A. Metody umnozheniya i transformatsii impul'sov v sil'notochnoy elektronike. Novosibirsk: Nauka. 1987. 226 p.
4. <http://www.rigol.com>
5. Khorovits P., Khill U. Iskusstvo skhemotekhniki: V 2-kh tomakh. Per. s angl. Moscow: Mir. 1983. – T.1. 598 p.
6. <http://www.irf.com>
7. Semenov B.YU. Silovaya elektronika ot prostogo k slozhnomu. Moscow: SOLON-Press. 2005. 416 p.

Поступила (received) 24.02.20

Відомості про авторів / Сведения про авторов / About the authors

Борцов Олександр Васильович (Борцов Александр Васильевич, Bortsov Alexander Vasilievich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри інженерної електрофізики; м. Харків, Україна; email: avbortsov@gmail.com.

*I. О. КОСТЮКОВ***ВПЛИВ ПАРАЗИТНОЇ ІНДУКТИВНОСТІ НАКОПИЧУВАЛЬНОГО КОНДЕНСАТОРА ТА ЄМНОСТІ НАВАНТАЖЕННЯ НА ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ У ВИСОКОВОЛЬТНИХ УСТАНОВКАХ ІЗ ІМПУЛЬСНИМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ**

У статті розглядається вплив паразитних індуктивностей накопичувального конденсатора і ємності об'єкта контролю на струми в первинній та вторинній обмотках імпульсного трансформатора. Крім того розглядається вплив паразитних індуктивностей на напругу на навантажувальній ємності об'єкта контролю, а також на ємності накопичувального конденсатора. Згідно з результатами проведеного моделювання паразитна індуктивність об'єкта контролю має більш значний вплив на форму напруги на ємності навантаження ніж паразитна індуктивність накопичувального конденсатора.

Ключові слова: характеристичний поліном, взаємна індуктивність, перетворення Лапласа.

*И. А. КОСТЮКОВ***ВЛИЯНИЕ ПАРАЗИТНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ НАКОПИТЕЛЬНОГО КОНДЕНСАТОРА И НАГРУЗОЧНОЙ ЕМКОСТИ НА ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ УСТАНОВКАХ С ИМПУЛЬСНЫМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ**

В статье рассматривается влияние паразитных индуктивностей накопительного конденсатора и емкости тестируемого объекта контроля на токи в первичной и вторичной обмотке импульсного трансформатора. Кроме того рассматривается влияние паразитных индуктивностей на напряжение на нагрузочной емкости объекта контроля, а также на емкости накопительного конденсатора. Согласно результатам проведенного моделирования паразитная индуктивность объекта контроля оказывает более значительное влияние на форму напряжения на нагрузочной емкости, чем паразитная индуктивность накопительного конденсатора.

Ключевые слова: характеристический полином, взаимная индуктивность, преобразование Лапласа.

*I. KOSTIUKOV***THE INFLUENCE OF STRAY INDUCTANCE OF STORAGE CAPACITOR AND LOAD CAPACITANCE ON TRANSIENTS IN HIGH VOLTAGE FACILITIES WITH PULSE TRANSFORMERS**

High voltage facilities based on gaining of voltage pulses by means of applying various types of pulse transformers are widely used in various engineering applications. Such high voltage facilities can be used for the elaboration of particle accelerators and in practice of forming pulses of high voltage for the purposes of electrical equipment testing. Technical characteristics of such high voltage facilities are significantly influenced by the technical characteristics of applied pulse transformer and, therefore, by the parameters of applied equivalent scheme of pulse transformer. Requirements to the obtained time dependencies of formed voltage pulses that arise in practice of testing high voltage insulation by applying pulses of high voltage demand to take into consideration the influence of parasitic parameters of equivalent scheme. This paper presents the results of consideration of the influence of parasitic inductances of storage capacitor and capacitance of tested object on currents in primary and secondary windings of pulse transformer. The influence of stray inductance on time dependence of voltage on load capacitance of tested object of control, as well as on time dependence of voltage on capacitance of storage capacitor is also considered. According to the results of carried out simulations, the inevitable parasitic inductance of tested object has more significant effect on time dependence of voltage on load capacitance than the parasitic inductance of storage capacitor.

Ключові слова: characteristic polynomial, mutual inductance, Laplace transform.

Introduction. High voltage pulse transformers are widely used in practice of forming pulses of high voltage in various engineering applications. Generators of high voltage with pulse transformers, for example, can be used for the elaboration of particle accelerators [1] and in practice of forming pulses of high voltage for the testing of electrical equipment [2]. For different purposes such transformers can be elaborated either with magnetic core, made of material with low value of power losses, or without any magnetic core. In case of properly chosen parameters of equivalent schemes, that fit specific ratios between the values of load capacitance, storage capacitance and values of inductances of primary and secondary windings, such high voltage facilities correspond to the scheme of Tesla transformer and can operate in a resonant mode. In some cases, especially which correspond to the operation of pulse transformer in a resonant mode, the analysis of transients in primary and secondary circuits often is carried out without taking into consideration energy dissipation in windings of pulse transformer [3-4].

Nevertheless, certain requirements to the obtained time dependencies of formed pulses on load capacitance, that arise in practice of testing high voltage insulation by applying pulses of high voltage, require more specified model, which allows to take into consideration the influence of power losses in primary and secondary windings on the value of voltage formed on load capacitance. Another factor that can cause impact on voltage pulses formed on capacitive load of tested object is determined by inevitable stray inductance of storage capacitance that leads to additional voltage drop in primary winding of pulse transformer. For high voltage capacitors that have been designed for operating in high voltage facilities for forming short pulses of voltage, the value of stray inductance usually is considered as a standardized parameter. For example, for such high voltage pulse capacitors as ИМ-40-0.9-У3 and ИМ-70-0.9-У3, according to the listed in [5] parameters, the value of stray inductance is equal to $300 \cdot 10^{-9}$ Hn. In general case parasitic inductance can contain components caused by the inductances of

capacitor plates, internal connecting busses and outputs of high voltage capacitor [6]. Stray inductance of load capacitance, similarly to the stray inductance of storage capacitor, can cause influence on time dependence of voltage on load capacitance of tested object. This paper was motivated by the necessity of taking into consideration and clarifying of mentioned influence.

The objective of this paper is the modeling of the influence of parasitic inductance of storage capacitor and load capacitance on time dependencies of voltage drop on load capacitance.

Lumped equivalent schemes of pulse transformer.

The analysis can be made on the basis of the following simplified equivalent schemes of pulse transformer:

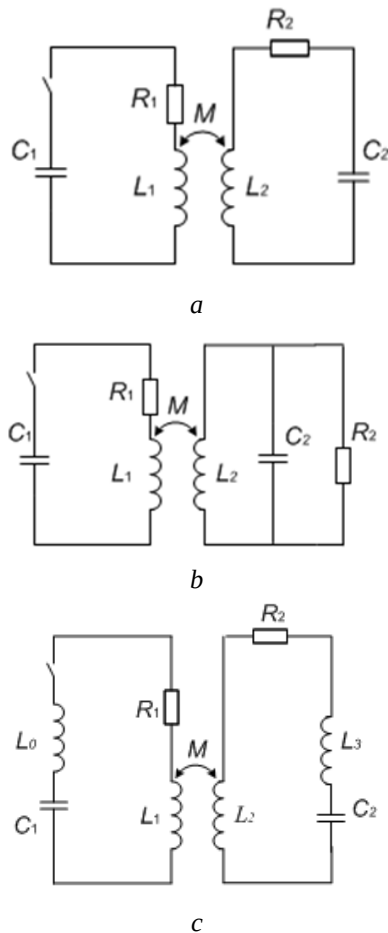


Fig. 1. Equivalent schemes for the analysis of transients in primary and secondary windings, caused by the discharge of storage capacitor: a) with series connection of power loss resistance [3], b) with parallel connection of power loss resistance [7], c) with series connection of power loss resistance and stray inductance of storage capacitor and load capacitance.

On the equivalent schemes presented on Fig. 1 R_1 and R_2 denote power loss resistances that have been caused by power losses in primary and secondary windings, L_1 and L_2 denote the values of inductances of primary and secondary windings, C_1 and C_2 respectively denote the values of storage capacitor and load capacitance of tested capacitive object, M is the value of mutual induction between the primary and secondary windings, L_0 denotes the value of stray inductance of storage capacitor, L_3 is the value of stray inductance of load capacitance. Taking into consideration the presence of skin-effect in wires of

primary and secondary windings such parameters of described equivalent schemes as L_1 , L_2 , R_1 , R_2 can exhibit some dependence on spectral properties of discharge current. The modeling of the influence of stray capacitance of tested object and storage capacitor was carried out under the assumption of negligible possible influence of non-uniform distribution of currents in wires of primary and secondary windings on the parameters of described equivalent schemes. The analysis also is to be hold for the case of air pulse transformer, therefore the value of mutual inductance M can be considered to be independent on magnetic properties of core material.

It should be noted that the equivalent schemes on Fig. 1 have been presented with some simplifications, as they do not take into consideration the presence of stray capacitance between primary and secondary windings and stray capacitances of primary and secondary windings with respect to the ground.

As it can be noticed, the main distinction between the equivalent schemes described on Fig. 1 a Fig. 1 b is caused by the fact that power losses in secondary circuit can be taken into consideration either by series connection or by parallel connection of power loss resistance R_2 . Current analysis will be made for the case of series connection of R_2 and C_2 . Comprehensive analysis of transients in this equivalent scheme has also been carried out in [8]. However, mentioned analysis doesn't contain the consideration of issues caused by stray inductance of storage capacitor.

The influence of stray inductance of storage capacitor on currents in primary and secondary winding.

For lumped equivalent scheme on Fig. 1 a in the case of negligible stray inductance of tested object ($L_3 = 0$) the system of equations that determine the values of voltage drop on every element of equivalent scheme can be written in the following form:

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 + \frac{1}{C_1} \int i_1 dt - M \frac{di_2}{dt} + L_0 \frac{di_1}{dt} = U_0; \quad (1)$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 + \frac{1}{C_2} \int i_2 dt - M \frac{di_1}{dt} = 0. \quad (2)$$

where U_0 is the value of voltage on storage capacitance. Laplace transform of terms in (1) and (2) can be written in the following form:

$$pL_1 i_1 + R_1 i_1 + \frac{i_1}{pC_1} - pMi_2 + pL_0 i_1 = \frac{U_0}{p}; \quad (3)$$

$$pL_2 i_2 + R_2 i_2 + \frac{i_2}{pC_2} - pMi_1 = 0. \quad (4)$$

Therefore, the expression for Laplace transform for currents in primary and secondary winding of pulse transformer can be written in the following form:

$$i_1(p) = \frac{U_0 C_1 (L_2 C_2 p^2 + R_2 C_2 p + 1)}{a_1 p^4 + b_1 p^3 + c_1 p^2 + d_1 p + 1}; \quad (5)$$

$$i_2(p) = \frac{p^2 M U_0 C_1 C_2}{a_1 p^4 + b_1 p^3 + c_1 p^2 + d_1 p + 1}; \quad (6)$$

where all constants a_1 b_1 c_1 d_1 can be calculated by using the following expressions:

$$a_1 = C_1 C_2 ((L_1 + L_0) L_2 - M^2); \quad (7)$$

$$b_1 = C_1 C_2 (L_2 R_1 + R_2 (L_1 + L_0)); \quad (8)$$

$$c_1 = (R_2 C_2 R_1 + L_1 + L_0) C_1 + L_2 C_2; \quad (9)$$

$$d_1 = R_1 C_1 + R_2 C_2. \quad (10)$$

It can be noticed, that the influence of stray inductance of storage capacitor leads to increasing of coefficients a_1 , b_1 , c_1 , whereas coefficient d_1 is not subjected to the influence of stray inductance of storage capacitor.

Conventional scheme of deriving time dependencies for currents in primary and secondary windings implies the necessity of obtaining the roots of the following polynomial:

$$a_1 p^4 + b_1 p^3 + c_1 p^2 + d_1 p + 1 = 0. \quad (11)$$

In practice of analysis transients in electrical circuits calculated roots of such algebraic equations usually can be obtained in a complex form with negative real parts, as a consequence of currents attenuation. For the case of highly damped oscillations imaginary part of roots can be negligible in comparison with real part.

In general form time dependence of voltage on storage capacitance can be determined by using the following expression:

$$u_{c_1}(t) = \frac{1}{C_1} \int_0^t i_1(t) dt = \frac{1}{C_1} \sum_{n=1}^4 \frac{N(p_n)}{M'(p_n)} \cdot \left(\frac{e^{p_n t}}{p_n} - \frac{1}{p_n} \right); \quad (12)$$

where all p_n denote the roots of characteristic polynomial (11), $N(p_n)$ denotes the values of nominator in (5) in points that correspond to the roots of characteristic polynomial (11), $M'(p_n)$ denotes the values of derivative from denominator in (5) in points that correspond to the roots of characteristic polynomial (11).

Similarly to the previous expression, the time dependence of voltage on the load capacitance of tested object can be determined by using the following expression:

$$u_{c_2}(t) = \frac{1}{C_2} \int_0^t i_2(t) dt = \frac{1}{C_2} \sum_{n=1}^4 \frac{B(p_n)}{Q'(p_n)} \cdot \left(\frac{e^{p_n t}}{p_n} - \frac{1}{p_n} \right) \quad (13)$$

where $B(p_n)$ denotes the values of nominator in (6) in points that correspond to the roots of characteristic polynomial (11), $Q'(p_n)$ denotes the values of derivative from denominator in (6) in points that correspond to the roots of characteristic polynomial (11).

The influence of stray inductance of load capacitance on currents in primary and secondary winding. The case of substantial stray inductance of load capacitance corresponds to the equivalent scheme presented on Fig. 1 c. For the case of significant stray inductance of tested object, coefficients in polynomial (11) should be, obviously, written in the following form:

$$a_2 = C_1 C_2 ((L_2 + L_3) L_0 + (L_2 + L_3) L_1 - M^2) \quad (14)$$

$$b_2 = C_1 C_2 (L_0 R_2 + R_2 L_1 + R_1 (L_2 + L_3)) \quad (15)$$

$$c_2 = (R_2 C_2 R_1 + L_1 + L_0) C_1 + (L_2 + L_3) C_2 \quad (16)$$

The distinction between (7)-(9) and (14)-(16) will be determined only by the presence of additional term, caused by parasitic inductance of tested object. Therefore, all calculations can easily be carried out by applying expressions (12) and (13), but by using the roots of charac-

teristic polynomial with coefficients a_2 , b_2 , c_2 instead of a_1 , b_1 , c_1 . It can be seen that for the case of negligible stray inductance of load capacitance expressions (14-16) can easily be reduced to the previously considered case of constants a_1 , b_1 , c_1 .

Fig. 2 and Fig. 3 present the results of mathematical modeling of time dependencies of voltage on load capacitance. Fig. 4 and Fig. 5 present the influence of stray inductance on the roots of algebraic equation (11). All calculations have been carried out for the value of voltage on storage capacitance equal to 10 kV. The value of mutual inductance between the primary and secondary winding was set equal to $1.133 \cdot 10^{-4}$ Hn. The values of inductance of primary and secondary windings have been chosen equal to $182 \cdot 10^{-6}$ Hn and $126 \cdot 10^{-6}$ Hn. The values of storage capacitor and load capacitance have been respectively chosen equal to 3 μ F and 2 nF.

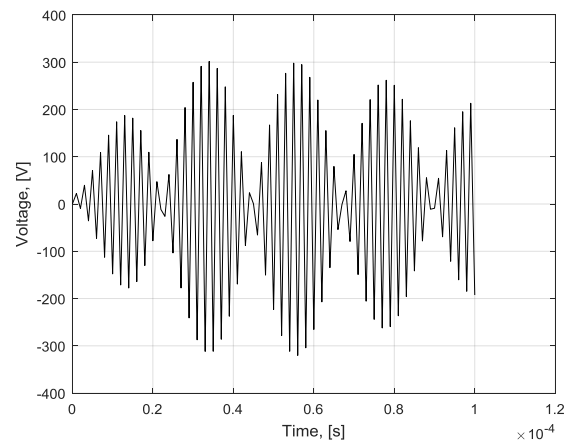


Fig. 2. Difference between voltages on load capacitance, calculated for the case of $L_0 = 0$, $L_3 = 0$ and for the case of $L_0 = 300 \cdot 10^{-9}$ Hn and $L_3 = 0$.

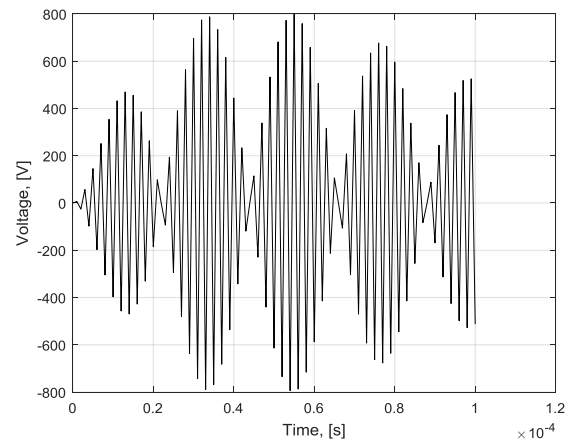


Fig. 3. Difference between voltages on load capacitance calculated for the case of $L_0 = 0$, $L_3 = 0$ and for the case of $L_0 = 0$, $L_3 = 300$ nHn.

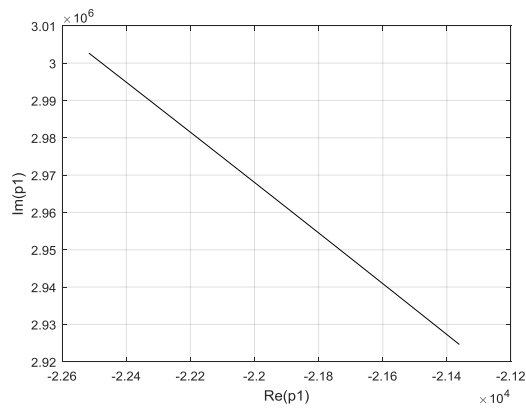


Fig. 4. Real and imaginary components of characteristic polynomial roots for the case of $L_0 = 0$ and L_3 considered to be variable in a range from 0 to $300 \cdot 10^{-8}$ Hn.

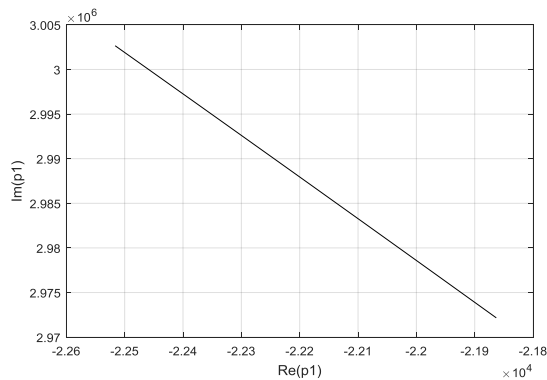


Fig. 5. Real and imaginary components of characteristic polynomial roots for the case of $L_3 = 0$ and L_0 considered to be variable in a range from 0 to $300 \cdot 10^{-8}$ Hn.

As it can be concluded from the results of calculations on Fig. 2 and Fig. 3, the presence of stray inductance of tested object causes more significant impact on time dependence of voltage drop on tested capacitive object in comparison with stray inductance of storage capacitor. While for the case of $L_0 = 300$ nHn and $L_3 = 0$ the highest difference in voltages reaches 0.3 kV, for the case of $L_0 = 0$ and $L_3 = 300$ nHn the highest difference in voltages reaches 0.8 kV. As it can also be concluded from the results of modelling presented on Fig. 4 and Fig. 5, stray inductances of storage capacitor and load capacitance cause some distinction in obtained roots of characteristic polynomial.

Conclusions. Carried out analysis illustrates the influence of stray inductance of load capacitance and storage capacitor on time dependence of voltage on load capacitance of tested object. Both sources of parasitic induct-

ance can be taken into consideration by increasing the inductances of primary and secondary windings in corresponding terms of characteristic polynomial. According to the obtained results, stray inductance of tested object causes more significant influence on time dependence of voltage on load capacitance in comparison with stray inductance of storage capacitor.

Список литературы

- 1 Желтов К. А. Пикосекундные сильнотоочные электронные ускорители. М.: Энергоатомиздат, 1991. 120 с.
- 2 Фрюнгель Ф. Импульсная техника. Генерирование и применение разрядов конденсаторов. М.: Энергия, 1965. 488 с.
- 3 Denicolai M. Optimal performance for Tesla transformers. *Review of Scientific instruments*. 2002. Vol. 73, No. 9.
- 4 Cook E.G., Reginato L.L., Off-resonance transformer charging for 250-kV water Blumlein, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1979. Vol. 26, No. 10, P. 1512-1517
- 5 Берзан В. П., Гелкнман Б. Ю., Гураевский М. Н. и др. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки. М.: Энергоатомиздат, 1987. 656 с.
- 6 Кучинский Г. С., Назаров Н. И. Силовые электрические конденсаторы. М.: Энергоатомиздат, 1992. 320 с.
- 7 Jain K.K., Chennareddy D., John P.I., Saxena Y.C., Design and Performance of a Tesla Transformer Type Relativistic Electron Beam Generator, *Sadhana*, 9 (1986), No. 1, 19-29
- 8 Corum J., Daum J. Moore H. L. *Tesla coil research*. New Jersey, US army armament research, development and engineering center Publ., 1992, 38 p.

References (transliterated)

- 1 Zheltov K. A. *Pikosekundnye sil'notochnye jelektronnye uskoriteli* [Picosccond high-current electronic accelerators]. Moscow, Jenergija Publ., 1991. 120 p.
- 2 Frjungle' F. *Impul'snaja tehnika. Generirovanie i primenenie razrjadov kondensatorov*. [Impulse technique. Capacitor Discharge Generation and Application]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1965. 488 p.
- 3 Denicolai M. Optimal performance for Tesla transformers. *Review of Scientific instruments*. 2002. Vol. 73, No. 9.
- 4 Cook E.G., Reginato L.L., Off-resonance transformer charging for 250-kV water Blumlein, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1979. Vol. 26, No. 10, P. 1512-1517
- 5 Berzan V. P., Gelknman B. Ju., Guraevskij M. N. *Jelektricheskie kondensatory i kondensatornye ustanovki*. [Electric capacitors and capacitor installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 656 p.
- 6 Kuchinskij G. S., Nazarov N. I. *Silovye jelektricheskie kondensatory* [Power Electric Capacitors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1992. 320 p.
- 7 Jain K.K., Chennareddy D., John P.I., Saxena Y.C., Design and Performance of a Tesla Transformer Type Relativistic Electron Beam Generator, *Sadhana*, 9 (1986), No. 1, 19-29
- 8 Corum J., Daum J. Moore H. L. *Tesla coil research*. New Jersey, US army armament research, development and engineering center Publ., 1992, 38 p.

Поступила (received) 25.05.20

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the authors

Костюков Іван Олександрович (Костюков Иван Александрович, Kostiukov Ivan) – кандидат технічних наук, старший викладач, кафедра електроізоляційної та кабельної техніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail iakostiukow@gmail.com.

УДК 621.763: 621.74.047

doi: 10.20998/2079-3944.2020.1.10

*Р.Э. МОХНАЧ, П.Д. АНДРИЕНКО***МЕДНЫЕ И СТАЛЕМЕДНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ВЫСОКИМИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ**

Получены экспериментальные образцы сталемедного и медного композиционного проводника в том числе и из отходов меди по разработанной технологии. Исследованы физические и эксплуатационные свойства медного композиционного материала, особое внимание обращено на износостойкость, которую проверили в составе рабочего пантографа электрички, исследовали электропроводность полученного медного композита. Показано, что электропроводность композиционного материала из меди выше в области рабочих температур пантографа, а износостойкость значительно выше, чем у образца из стандартного медного материала.

Ключевые слова: наночастицы, стальная матрица, композиционный материал, структура.

*Р.Е. МОХНАЧ, П.Д. АНДРИЄНКО***МІДНІ І СТАЛЕМІДНІ КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ З ВИСОКИМИ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ**

Отримано експериментальні зразки сталемідного і мідного композиційного провідника в тому числі і з відходів міді за розробленою технологією. Досліджено фізичні та експлуатаційні властивості мідного композиційного матеріалу, особливу увагу звернено на зносостійкість, яку перевірили в складі робочого пантографа електрички, досліджували електропровідність отриманого мідного композиту. Показано, що електропровідність композиційного матеріалу з міді вище в області робочих температур пантографа, а зносостійкість значно вище, ніж у зразка з стандартного мідного матеріалу.

Ключові слова: наночастиці, стальна матриця, композиційний матеріал, структура.

*R.E. MOKHNACH, P.D. ANDRIENKO***COPPER AND STEEL-COPPER COMPOSITE MATERIALS WITH HIGH ELECTRICAL PROPERTIES**

Experimental samples of steel-copper and copper composite conductors, including those from copper waste, were obtained according to the developed technology. The physical and operational properties of the copper composite material were investigated, special attention was paid to the wear resistance, which was tested as part of the working pantograph of the electric train, and the electrical conductivity of the obtained copper composite was investigated. It is shown that the electrical conductivity of the composite material made of copper is higher in the range of operating temperatures of the pantograph, and the wear resistance is much higher than that of the sample made of standard copper material.

Keywords: nanoparticles, steel matrix, composite material, structure.

Введение Расширение сети железных дорог и увеличение скорости движения локомотивов обуславливает актуальность разработки технологий производства и ремонта медных и сталемедных заготовок для производства, как проводов, так и ремонтной базы для производства и восстановления пантографов, предназначенных для высокоскоростных железнодорожных магистралей. Условие отсутствия собственных ископаемых для производства меди на Украине, дефиците и постоянно растущей цене на нее на мировом рынке острую актуальность имеет производство медной продукции из вторичных медных отходов. Одним из вариантов решения этой проблемы увеличения объема производства высокопрочных медных заготовок, по размерам, близким к размерам готовых изделий, может быть решена при получении в процессе непрерывной или полунепрерывной разливки меди. С целью повышения конструктивной прочности, без потери высокого уровня электропроводности, целесообразно не только армировать медь стальной проволокой-вставкой, но и получать медную матрицу

с улучшенными параметрами. Отработка параметров технологии получения медных и сталемедных непрерывнолитых заготовок в реальных условиях производства связана с большими материальными и финансовыми затратами, поэтому использование математического и физического моделирования является наиболее эффективным. Анализ публикаций по математическому моделированию процесса формирования непрерывнолитой, как и полунепрерывнолитой медной заготовки свидетельствует об их разнородности и немногочисленности, а наличия моделей описания процесса затвердевания сталемедной заготовки, получаемой в процессе взаимодействия расплава меди со стальной вставкой не выявлено. Приведем обнаруженный ряд существующих сведений и созданных математических моделей. В работе [1] приводятся сведения относительно получения крупных промышленных слитков меди с учетом гидродинамики движения расплава, в условиях формирования маломерных заготовок, они не применимы. Работы Ф. В. Недопекина [2], по

© Мохнач Р.Э., Андриенко П.Д., 2020

моделированию процесса формирования стального слитка с армирующей вставкой также относится к крупным промышленным слиткам. Математическая модель теплофизических процессов [3], при затвердевании сталемедного композита, разработанная авторами работы, касается принципиально иного процесса – взаимодействия большого числа стальных гранул с медным расплавом. Следует отметить исследования и математическое моделирование [4, 5], тепловых особенностей процесса формирования проволочных заготовок из драгоценных сплавов при непрерывном литье в графитовый кристаллизатор. Разработанная ими модель относится к процессу циклического вытягивания заготовки на установке, отличающейся как конструктивно, так и небольшими размерами. Сложность описания [6] процесса затвердевания меди в кристаллизаторе состоит в неопределенности коэффициента затвердевания в математическом выражении этого закона, а также заметного влияния на него перегрева над температурой ликвидуса.

Цель работы – исследование композиционного электротехнического материала с улучшенными эксплуатационными характеристиками, предъявляемыми для применения в области контактных сетей и токосъемников подвижного состава железных дорог.

Постановка задачи. Медь как электропроводный материал широко применяется в электротехнике и радиоэлектронике. Однако существенным недостатком меди как конструкционного материала является небольшая механическая прочность. Для электротехнических материалов существенным оказываются и негативные показатели трения меди по меди. Наиболее эффективным методом упрочнения меди является легирование некоторыми элементами, однако даже незначительное содержание последних существенно снижает электропроводность меди. Поэтому перспективным является разработка на основе меди металломатричных композитных материалов из лома меди, сочетающих высокую электропроводность медной матрицы с повышенной механической прочностью и улучшенными свойствами по отношению к истиранию. Такие материалы должны иметь высокопрочный армирующий каркас, размещенный внутри металлической матрицы из высокоэлектропроводной меди.

Результаты исследования. Радиус стальной армирующей вставки оказывает существенное влияние на кинетику кристаллизации медной матрицы и время полной ее кристаллизации [7]. Определено рациональное сочетание диаметра стального провода и зависимость времени полной кристаллизации медной матрицы армированной металломатричной сталемедной заготовки в зависимости от радиуса стальной вставки. Повышение прочностных характеристик таких материалов связано с увеличением сечения стальной арматуры [7]. В результате исследований определяли зависимость времени полной кристаллизации медной

матрицы. Определили рациональное сечение диаметров стального провода и медной матрицы. Актуальной является проблема повышения прочностных свойств медной матрицы без заметного снижения электропроводности. В работах [13,14] были получены результаты, которые легли в основу разработанной опытной установки медных и сталемедных материалов. Установка состоит из индукционной печи, кристаллизатора, механизма непрерывной подачи и вытяжки, водоохлаждаемого кристаллизатора, и позволяет получить материал с радиусом стальной вставки до 0,15 см, с радиусом медной матрицы до 0,4 см. Конечный диаметр сталемедной заготовки составляет до 1,1 см.

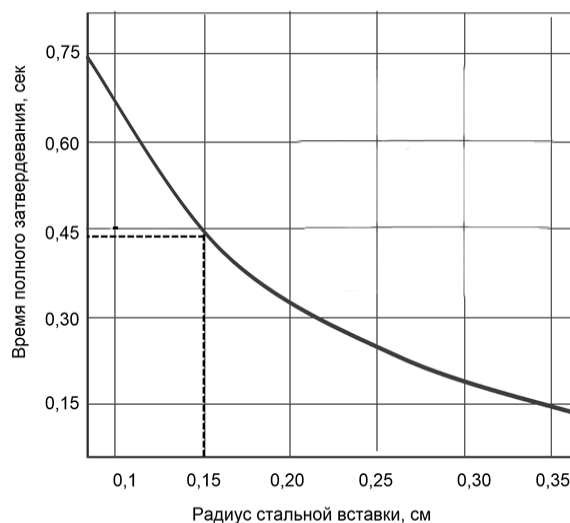


Рис. 1. Зависимость времени полного затвердевания сталемедной заготовки от радиуса стальной армирующей вставки.

Указанная зависимость аппроксимирована формулой:

$$y = 0,036 \times x^{-0,56}, r = 0,929 \quad (1)$$

Определяли зависимости полного времени затвердевания заготовки. Принципиально эта задача может быть решена применением дисперсионного упрочнения. Необходимо, чтобы в медной матрице образовалась вторая фаза в виде очень мелких и однородно распределенных частиц, имеющих некогерентную поверхность раздела с матрицей. Образование частиц второй фазы путем легирования меди некоторыми элементами, например, бериллием [10, 11], неизбежно приводит к снижению электропроводности меди. Более рациональным является введение в расплавленную медь частиц и обеспечение их равномерного распределения по сечению матрицы. Увеличение предела текучести меди при упрочнении ее частицами можно рассчитать по методике, приведенной в работе [8].

Определение краевого угла смачивания расплавом меди корундовой подложки. Необходимым условием равномерного распределения частиц в расплаве является минимальная взаимная адгезия и большая адгезия к расплаву. Вместе с тем, введение частиц не

должно увеличивать краевой угол смачивания и поверхностное натяжение расплава, так как в этом случае нарушается прочность соединения медной матрицы и армирующей стальной вставки. Расплав модифицировали комплексным составом с частицами меди, алюминия, карбидом кремния, карбонитридами титана. Величина краевого угла смачивания характеризует насколько применяемый материал будет взаимодействовать с матричным расплавом на физико-химическом и термическом уровнях [9]. Провели эксперимент по определению краевого угла смачивания [Θ] расплавом меди корундовой подложки. После чего расплав модифицировали наночастицами меди, алюминия, карбидом кремния, карбонитридами титана и бора. Результаты определения краевого угла смачивания приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Краевой угол смачивания расплавом меди подложки из корунда (метод лежащей капли)

Модификатор	Без модификатора	Карбонитрид титана	Карбонитрид бора	Медь	Алюминий	Карбид кремния
Θ, град.	134,5	83	90	128	107	84,5

Модифицирование наночастицами меди заметного влияния на краевой угол смачивания не оказало. Модифицирование алюминием снизило краевой угол смачивания. В наибольшей степени снизили краевой угол смачивания наночастицы карбонитрида титана, бора и карбида кремния. Изменение одного свойства системы неизбежно влечет изменение остальных физических свойств. Микрофотографии чистой медной «матрицы» и армированного медного композита, из вторичных материалов представлены на рисунке 3, увеличение 200. Вместе с тем, введение наночастиц не должно увеличивать краевой угол смачивания и поверхностное натяжение расплава, так как в этом случае нарушается прочность соединения медной матрицы и армирующей составляющей.

Расчетная скорость образования кристаллов меди, для опытного материала составила $1,33 \text{ ед}/(\text{см}^3 \cdot \text{с})$, что позволяет определить зарождение кристаллов в расплаве происходит по гомогенному механизму.

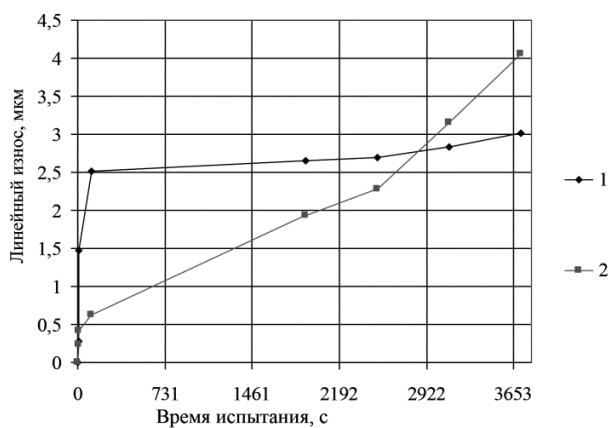
Проверка на износостойкость. Электрический износ, по отношению к механическому играет не существенную роль [16]. Проверяли износостойкость методом нанесения меток микротвердости. Устройство изготовлено на базе настольного сверлильного станка SPD-13. Электродвигатель, мощностью 350 Вт через клиноременную передачу вращает шпиндель, на конце которого находится трехкулачковый самоцентрирующий сверлильный патрон. В патроне закреплен вал, с плоским шлифованным диском, изготовленным из твердого сплава ВК-100. Нижний конец вала опирается на радиально-упорный шарикоподшипник, установленный в отверстии рабочего стола станка. На

рабочем столе закреплена стойка, с кронштейном, с нагружающим приспособлением.

Нагружающее приспособление состоит из направляющей втулки, в которой перемещается шток. На верхнем конце штока закреплен держатель груза, с грузом. Масса груза через этот шток, передается непосредственно на держатель образца. Образец, (в данном случае в виде плоской пластинки размером $8 \times 10 \times 1,5 \text{ мм}$) был закреплен пайкой на шестигранной головке. Последняя входит в шестигранное отверстие держателя образца. Наличие зазора порядка 0,3 мм между ними обеспечивает самоустановку образца относительно плоскости диска. Скорость вращения диска составляла до 98 км/час, с усилием до 40Н. Анализ износостойкости экспериментального литого материала и традиционно используемой заготовки представлен на рисунке 2. На литом образце, в начальный период притирки контактирующих частей износ происходит значительно быстрее. Затем проявились ожидаемые антифрикционные свойства, и износ переходил в стабильную фазу и не имел стремительного экстремума. На образце из меди марки М0 этап притирки с быстрым износом четко не проявлялся, но износ происходил более интенсивно, и после 3000 секунд испытания носил уже катастрофически интенсивный характер. Исследования под микроскопом обнаружили вырывы частиц материала [13, 14].

Испытания на электропоезде EP2, у которого в составе пантографа была включена медная композиционная вставка, показали снижение износа материала, по сравнению со штатным в 1,4 раза.

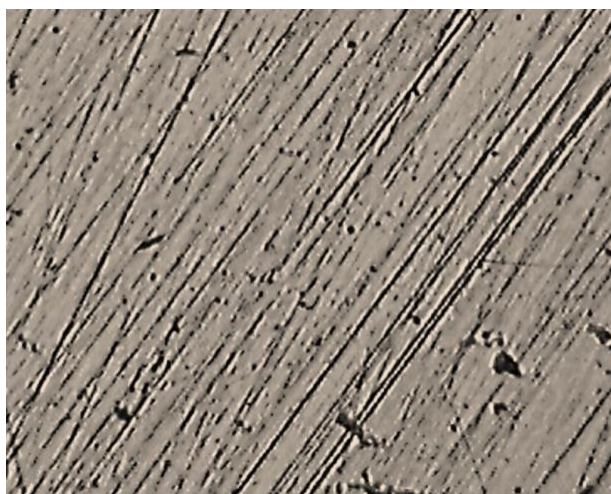
Исследование электропроводности. В процессе исследований армированного медного материала особое внимание уделяли электротехническим свойствам, таким, как электропроводность, при рабочей температуре 100°C так и выше. Поставленная задача снижения удельного сопротивления, или повышения электропроводности имеет решение при выполнении некоторых условий. Многие материалы проявляют фундаментально другие физические свойства, которые становятся очевидными только на уровне нанометрических размеров (менее 100 нанометров) [10, 11]. Необходимо, чтобы в медной матрице образовалась вторая фаза в виде очень мелких и однородно распределенных частиц, имеющих некогерентную поверхность раздела с матрицей. Образование частиц второй фазы путем легирования меди некоторыми элементами, например, бериллием, неизбежно приводит к снижению электропроводности меди. Более рациональным является введение в расплавленную медь наночастиц карбонитрида бора, не оказывающих влияние на электропроводность и обеспечение их равномерного распределения по сечению матрицы.



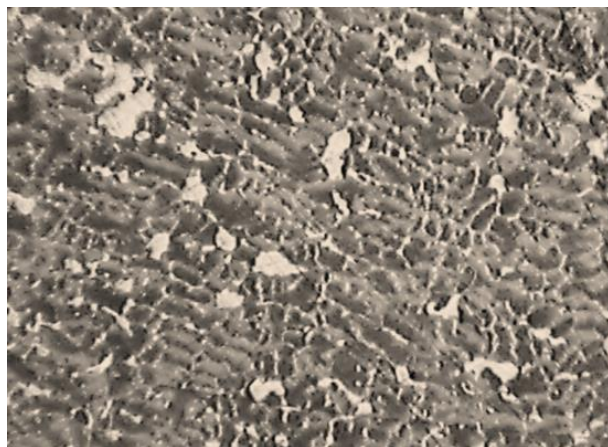
1 – непрерывнолитой образец, ориентированный структурой вдоль направления износа; 2 – деформированный образец

Рис. 2. Сравнительный анализ износостойкости деформированной и непрерывнолитой заготовки.

Для армированных отливок существенное влияние на качество последних оказывают поверхностные явления на границах раздела «жидкий металл – твердое тело». Надежное соединение матрицы и стальной армирующей вставки в значительной степени определяется смачиванием жидким металлом твердого тела. Необходимым условием равномерного распределения наночастиц в расплаве является минимальная взаимная адгезия и большая адгезия к расплаву.



а



б

а – микроструктура медной матрицы, б – микроструктура полученного композиционного материала

Рис. 3. Изменение структуры исследуемого материала

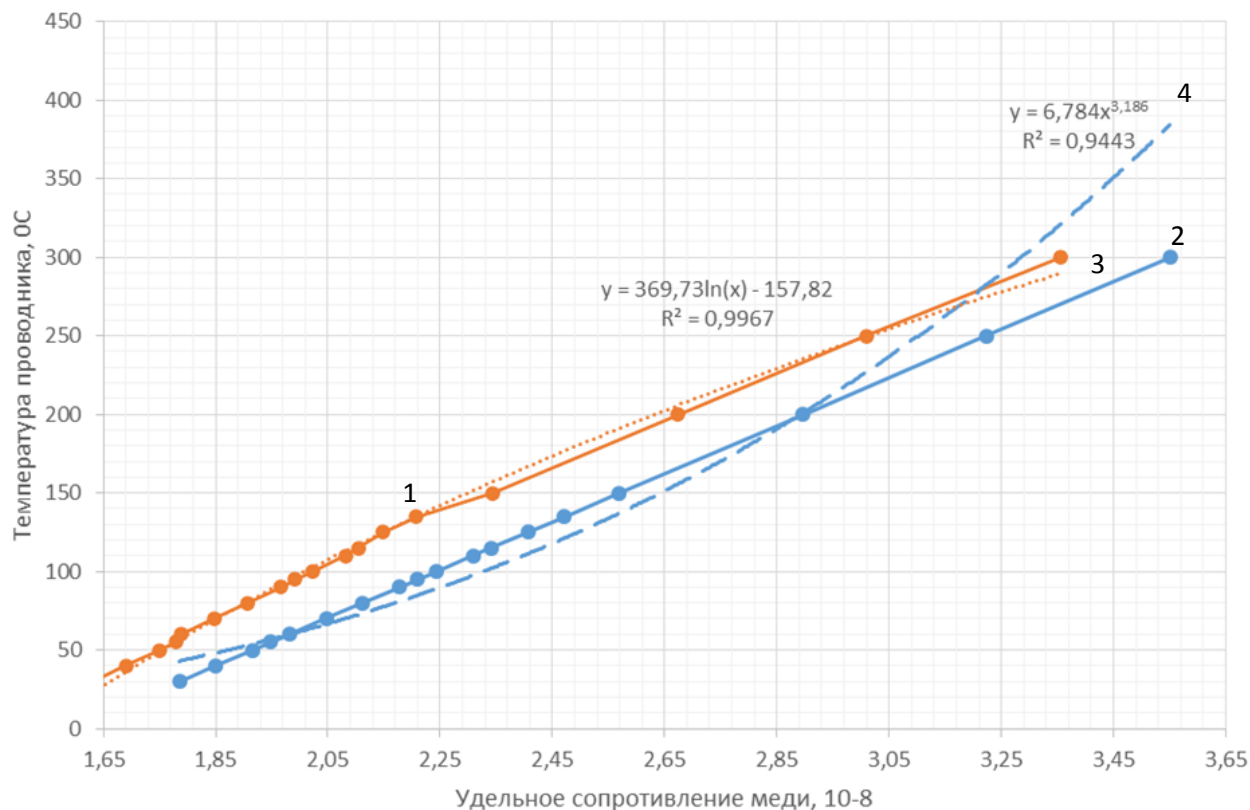
Электрический импеданс медного материала зависит от нескольких факторов:

- удельного сопротивления;
- внешней температуры.

Наиболее заметное изменение импеданса медного композиционного материала происходит при температуре более 50°C, проводимость выше, чем у стандартных образцов медного провода марки М0. Но и до этой температуры получены положительные результаты. В работах [10] показана возможность аномального увеличения электропроводности при повышении температуры в 200 раз при нагреве образца до 100 °С. В свою очередь [11] показано что спеченные порошки проводят лучше, чем монокристаллы. Возможна смешанная проводимость, наряду с электронной, существует и ионная (работы Тубандта) около 200°C – 20% от общей проводимости системы.

Результаты испытаний измерений удельного сопротивления на образцах медного композиционного материала отображены на рис. 4.

В сталемедном проводе необходимо обращать внимание на выбор марки металла с точки зрения снижения добавочных потерь от высших гармоник, которые присутствуют в контактной сети, желательно выбирать материалы соответствующей прочностью с малой магнитной проницаемостью [12, 15].



1 – данные эксперимента, 2 – справочные и расчетные данные, 3 – линия тренда эксперимента, 4 – линия тренда, для справочных и расчетных данных

Рис. 4. Теоретическое (нижняя линия) и экспериментальное (верхняя линия) удельные сопротивления

В полученном материале измеренная величина в диапазоне до 100°C имеет стойкую отличительную особенность, удельное сопротивление исследуемого материала ниже, а, следовательно, и электрические потери меньше в среднем на 10%. Линия (2) данные для чистого медного проводника – (4) линия тренда, со статистической формулой, построенная по табличным данным, а верхняя линия (1) данные по результатам эксперимента – (3) линия тренда рассчитанная по экспериментальным данным для исследуемого композиционного материала. Каждая точка на линии соответствует усреднению по пяти опытам исследования на трех образцах.

Зависимость удельного сопротивления от температуры, для чистой меди, аппроксимируется зависимостью (кривая 2):

$$y = 6,784 \times x^{3,186}, \quad R^2 = 0,9443 \quad (2)$$

Зависимость удельного сопротивления от температуры, для композиционного материала, аппроксимируется зависимостью (кривая 1):

$$y = 369,73 \ln x^{-157,82}, \quad R^2 = 0,9967 \quad (3)$$

Выводы. Показана возможность получения композиционного медного проводника из вторичных материалов меди, сочетающих оптимально высокую электропроводность медной матрицы с повышенной механической прочностью и с повышенной износостойкостью, также возможно получение композиционного медного проводника с армирующей стальной вставкой.

Список литературы

- 1 Смирнов А. Особенности полунепрерывной розливки медных заготовок и оптимизация режимов осциляции кристаллизатора / А.Н. Смирнов, О.В. Антыкуз, Ю.Д. Савенков // Наукові праці ДонНТУ. Металургія. – Випуск 11 (159). – С.145–153.
- 2 Недопекин Ф.В. Математическое моделирование гидродинамики и теплопереноса при формировании композитных слитков / Ф.В.Недопекин, В.М. Мелихов, В.В. Белоусов // Технічна фізика та промислова теплоенергетика – 2009. – вип.1. – С.149–158.
- 3 Затуловский А.С. Теплофизика и кинетика формирования макронеоднородного литого композита системы медный расплав-сталь / А.С. Затуловский, Ю.Н. Пономаренко // Процессы литья. – 2007. – №4. – С. 47–52.
- 4 Марукович Е.И. Моделирование процесса вертикального непрерывного литья проволочных заготовок / Е.И. Марукович, В.А. Пумпур, В.А. Харьков [и др.] // Литье и металлургия. – 2006. – №1. – С.12–15.
- 5 Марукович Е.И. Анализ тепловых особенностей формирования непрерывнолитых проволочных отливок // Е.И. Марукович, А.М. Брановицкий, Ю.А. Лебединский [и др.] / Литье и металлургия. – 2008. – № 2. – С. 5–7.
- 6 Масальский А.С. Исследование затвердевания стали в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ с целью совершенствования температурно- скоростного режима разливки / Автореферат диссертации на соиск. степени канд. техн. наук.- Магнитогорск - 2009.

- 7 Математическое моделирование процесса затвердевания медных и сталемедных заготовок при непрерывном литье / Титова Е.С., Сокол А.Н., Титова Т.М., Огурцов А.П., Полетаев В.П. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2011. – № 2. – С. 274–278.
- 8 Статическая прочность и механика разрушения сталей / Под ред. В. Даля, В. Антона. – М.: Metallurgija, 1986. – 566 с.
- 9 К. Мейер. Физико-химическая кристаллография. М.: Metallurgija, 1972. – 480 с.
- 10 Курчатова И. В., Кобеко П. П. Ионная и смешанная проводимость твердых тел // Курчатова И. В. Собрание научных трудов в 6 томах. Т. 1. – 2005. – С. 115-135.
- 11 Хевеши Г. Редкие земли с точки зрения строения атома [Электронный ресурс] : пер. с нем. Н. И. Влодавец ; под ред. В. Г. Хлопина / Г. Хевеши, 1929. – 165 с.
- 12 Электротехнический справочник. Практическое применение современных технологий. – СПб.: Наука и Техника, 2014. – 592 с.
- 13 Steel-copper nano composited materials / Tsyganov, V., Naumik, V., Byalik, H., Ivschenko, L., Mokhnach, R. // MS and T 2019 - Materials Science and Technology 2019, pp. 439-443.
- 14 Creation of wearproof eutecticum composition materials for the details of the high temperature dynamic systems / Tsyganov, V., Ivschenko, L., Byalik, H., Mokhnach, R., Sakhniuk, N. // MS and T 2019 - Materials Science and Technology 2019, pp. 450-456.
- 15 Андриенко П. Д. Влияние высших гармоник тока на выбор токопроводов систем питания кранов / П. Д. Андриенко, О. В. Немыкина, А. А. Андриенко // Электротехника і електромеханіка. - 2019. - № 3. - С. 24-29. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/elem_2019_3_6.
- 16 Электрический износ в паре трения токоприемник - контактный провод [Текст] // Железные дороги мира. - 2007. - № 5. - С. 43-49.
- 4 Marukovich E.I., Pumpur V.A., Khar'kov V.A. Modelirovanie processa vertikal'nogo nepreryvnogo lit'ja provolochnykh zagotovok. *Lit'e i metallurgija*. 2006. No 1. Pp. 12-15.
- 5 Marukovich E.I., Branovickij, Ju.A. Lebedinskij A.M. Analiz teplovykh osobennostej formirovanija nepreryvnolitykh provolochnykh otlivok. *Lit'e i metallurgija*. 2008. no 2. Pp. 5-7.
- 6 Masal'skij A.S. Issledovanie zatverdevanija stali v kristallizatore sljabovoj MNLZ s cel'ju sovershenstvovanija temperaturno- skorostnogo rezhima razlivki. *Avtoreferat dissertacii na soisk. stepeni kand. tekhn. nauk*. Magnitogorsk. 2009.
- 7 Titova E.S., Sokol A.N., Titova T.M., Ogurcov A.P., Poletae V.P. Matematicheskoe modelirovanie processa zatverdevanija mednykh i stalemednykh zagotovok pri nepreryvnom lit'e. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroenija*. 2011. No 2. Pp. 274-278.
- 8 Statischeckaja prochnost' i mekhanika razrushenija stalej. Pod red. V. Dalja, V. Antona. Moscow: Metallurgija, 1986. 566 p.
- 9 Mejer K.. Fiziko-khimicheskaja kristallografija. Moscow: Metallurgija, 1972. 480 p.
- 10 Kurchatov I.V., Kobeck P.P. Ionная i smeshannaja provodimost' tverdykh tel. *Sobranie nauchnykh trudov v 6 tomakh*. T. 1. 2005. Pp. 115-135.
- 11 Kheveshi G. Redkie zemli s tochki zrenija stroenija atoma [Ehlektronnyj resurs] : per. s nem. N. I. Vlodavec ; pod red. V. G. Khlopina, 1929. 165 p.
- 12 Ehlektrotekhnicheskij spravochnik. Prakticheskoe primenenie sovremennykh tekhnologij. SPb.: Nauka i Tekhnika, 2014. 592 p.
- 13 Tsyganov V., Naumik V., Byalik H., Ivschenko L., Mokhnach R. Steel-copper nano composited materials. MS and T 2019 - Materials Science and Technology 2019, pp. 439-443.
- 14 Tsyganov V., Ivschenko L., Byalik H., Mokhnach R., Sakhniuk N. Creation of wearproof eutecticum composition materials for the details of the high temperature dynamic systems. MS and T 2019 - Materials Science and Technology 2019, pp. 450-456.
- 15 Andrienko P.D., Nemykina O.V., Andrienko A.A. Vlianie vysshikh garmonik toka na vybor tokoprovodov sistem pitaniya kranov. *Elektrotehnika i elektromekhanika*. 2019. No 3. Pp. 24-29. Rezhim dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/elem_2019_3_6.
- 16 Ehlektricheskij iznos v pare trenija tokopriemnik - kontaktnyj provod [Tekst]. *Zheleznye dorogi mira*. 2007. No 5. Pp. 43-49.

References (transliterated)

- 1 Smirnov A.N., Antykuz O.V., Savenkov Ju.D. Osobennosti polunepreryvnoj rozlivki mednykh zagotovok i optimizacija rezhimov osciljacii kristallizatora. *Naukovi praci DonNTU. Metallurgija*. Vol. 11 (159). Pp.145–153.
- 2 Nedopekin F.V., Melikhov V.M., Belousov V.V. Matematicheskoe modelirovanie gidrodinamiki i taplomassoprenosa pri formirovanii kompozitnykh slitkov. *Tekhnichna fizika ta promislova teploenargetika*. 2009. vol. 1. Pp.149-158.
- 3 Zatulovskij A.S. Ponomarenko Ju.N. Teplofizika i kinetika formirovanija makroeterogenного litogo kompozita sistemy mednyj rasplav-stal'. *Processy lit'ja*. 2007. No 4. Pp. 47-52.

Поступила (received) 28.10.2020

Відомості про авторів / Сведения про авторов / About the authors

Мохнач Річард Едуардович (Мохнач Ричард Эдуардович, Mokhnach Richard Eduardovich) – Національний університет «Запорізька Політехніка», завідувач лабораторії, м. Запоріжжя, Україна; e-mail: etkmpk@gmail.com.

Андрієнко Петро Дмитрієвич (Андриенко Петр Дмитриевич, Andrienko Petr) – Національний університет «Запорізька Політехніка», д.т.н., професор, завідувач кафедри електричних та електронних апаратів; м. Запоріжжя, Україна; e-mail: andrp@ukr.net.

В.П. КАЛІНЧИК, В.В. КАЛІНЧИК, В.А. ПОБІГАЙЛО

МЕТОДОЛОГІЯ КОМПЛЕКСНОГО ПІДХОДУ ДО ВИБОРУ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ НЕБЕЗПЕЧНИХ ТА ШКІДЛИВИХ ФАКТОРІВ

В статті показано, що основною вимогою до розробки системи управління забезпеченням безпечних умов і охорони праці є виключення неповноти взаємозв'язків необхідної інформації і розв'язуваних всередині завдань, що дозволяє реалізовувати таку відкриту систему управління, яка в даних умовах давала б можливість реалізовувати цільові функції безпеки та охорони праці. Процесі аналізу показників впливу серед всієї їх сукупності виникає потреба вибрати найбільш впливові з точки зору досягнення кінцевого якісного результату – впливу та можливості контролю та аналізу рівня безпеки та охорони праці. Причому основним ядром такої системи управління охороною праці є система моніторингу небезпечних та шкідливих факторів виробничого середовища, яка побудована на основі комплексного підходу до структури контролю шкідливих та небезпечних виробничих факторів. Показано, що суть системи моніторингу полягає у взаємозв'язку технічного, програмного і методичного забезпечення з необхідністю взаємного контролю результатів спостереження, корегування практичних дій у сфері безпеки та охорони праці. Показано, що моніторинг небезпечних та шкідливих факторів – одна з основних функцій системи управління охороною праці, яка спрямована на підвищення оперативності та якості реагування у сфері охорони праці на всіх рівнях контролю, дотримання норм, правил та режимів безпечного функціонування виробничої системи. Приведена структурна схема задач моніторингу небезпечних та шкідливих факторів за умов комплексного підходу. Причому до складу таких задач входять задачі формування показників впливу на рівень ефективності охорони праці, задача визначення інтервалу контролю небезпечних та шкідливих факторів, який задовольняв би як вимогам моніторингу динаміки змін факторів виробничого середовища, так і вимогам управління рівнями небезпечних або шкідливих факторів. Показано, що однією із основних функцій моніторингу є функція прогнозування тенденцій розвитку небезпечних та шкідливих факторів, яка є обов'язковою складовою частиною в системі управління охороною праці виробничої системи, що дає можливість планування необхідних заходів щодо запобігання таких випадків. Показано, що з точки зору простоти реалізації, часу розрахунку, з огляду на вимоги, що пред'являються до методів прогнозування, на перше місце слід поставити адаптивні методи прогнозування, зокрема модель експоненціального згладжування. Завершальною функцією моніторингу є функція оцінки рівня впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів, яка включає в себе методологію оцінки ризиків, що спирається на визначенні рівнів шкідливого впливу факторів ризику і ступеня їх впливу на організм людини і комплексну оцінку факторів виробничого середовища.

Ключові слова: охорона праці, моніторинг, фізичні фактори, управління, виробнича система.

В.П. КАЛІНЧИК, В.В. КАЛІНЧИК, В.А. ПОБЕГАЙЛО

МЕТОДОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА К ВЫБОРУ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ОПАСНЫХ И ВРЕДНЫХ ФАКТОРОВ

В статье показано, что основным требованием к разработке системы управления обеспечением безопасных условий и охраны труда является исключение неполноты взаимосвязей необходимой информации и решаемых внутри задач, позволяет реализовывать такую открытую систему управления, в данных условиях давала бы возможность реализовывать целевые функции безопасности и охраны труда. процессе анализа показателей влияния среди всей их совокупности возникает потребность выбрать наиболее влиятельные с точки зрения достижения конечного качественного результата - влияния и возможности контроля и анализа уровня безопасности и охраны труда. Причем основным ядром такой системы управления охраной труда является система мониторинга опасных и вредных факторов производственной среды, которая построена на основе комплексного подхода к структуре контроля вредных и опасных производственных факторов. Показано, что суть системы мониторинга заключается во взаимосвязи технического, программного и методического обеспечения с необходимостью взаимного контроля результатов наблюдения, корректировки практических действий в сфере безопасности и охраны труда. Показано, что мониторинг опасных и вредных факторов - одна из основных функций системы управления охраной труда, которая направлена на повышение оперативности и качества реагирования в сфере охраны труда на всех уровнях контроля, соблюдения норм, правил и режимов безопасного функционирования производственной системы. Приведена структурная схема задач мониторинга опасных и вредных факторов в условиях комплексного подхода. Причем в состав таких задач входят задачи формирования показателей влияния на уровень эффективности охраны труда, задача определения интервала контроля опасных и вредных факторов, который удовлетворял бы требованиям мониторинга динамики изменений факторов производственной среды, так и требованиям управления уровнями опасных или вредных факторов. Показано, что одной из основных функций мониторинга является функция прогнозирования тенденций развития опасных и вредных факторов, которая является обязательной составной частью в системе управления охраной труда производственной системы, дает возможность планирования необходимые меры по предотвращению таких случаев. Показано, что с точки зрения простоты реализации, времени расчета, с учетом требований, предъявляемых к методам прогнозирования, на первое место следует поставить адаптивные методы прогнозирования, в частности модель экспоненциального сглаживания. Завершающей функцией мониторинга является функция оценки уровня воздействия опасных и вредных производственных факторов, которая включает в себя методологию оценки рисков, опирается на определении уровней вредного воздействия факторов риска и степени их влияния на организм человека и комплексную оценку факторов производственной среды.

Ключевые слова: охрана труда, мониторинг, физические факторы, управления, производственная система.

METHODOLOGY OF COMPREHENSIVE APPROACH TO THE CHOICE OF SYSTEM STRUCTURE MONITORING OF DANGEROUS AND HARMFUL FACTORS

The article shows that the main requirement for the development of a management system for ensuring safe conditions and labor protection is the elimination of incomplete interconnections between the necessary information and the tasks solved within, it allows the implementation of such an open control system, in these conditions it would make it possible to implement the target functions of safety and protection. us labor. In the process of analyzing the impact indicators among their entire set, there is a need to select the most influential in terms of achieving the final qualitative result - the impact and the possibility of monitoring and analyzing the level of labor safety and health. Moreover, the main core of such an OSH management system is a system for monitoring hazardous and harmful factors of the working environment, which is built on the basis of an integrated approach to the structure of controlling harmful and hazardous industrial factors. It is shown that the essence of the monitoring system lies in the interconnection of technical, pro- software and methodological support with the need for mutual control of observation results, adjustments of practical actions in the field of occupational safety and health. It is shown that monitoring of hazardous and harmful factors is one of the main functions of the labor protection management system, which is aimed at increasing the efficiency and quality of response in the field of labor protection at all levels of control, compliance with norms, rules and modes of safe functioning of the production system. The block diagram of the tasks of monitoring dangerous and harmful factors in the context of an integrated approach is given. Moreover, such tasks include the tasks of forming indicators of the impact on the level of efficiency of labor protection, the task of determining the interval for monitoring hazardous and harmful factors, which would satisfy the requirements for monitoring the dynamics of changes in the factors of the working environment, and the requirements for managing the levels of hazardous or harmful factors. It is shown that one of the main monitoring functions is the function of predicting the development trends of hazardous and harmful factors, which is an obligatory component in the occupational safety management system of the production system, which makes it possible to plan the necessary measures to prevent such cases. It is shown that from the point of view of simplicity of implementation, calculation time, taking into account the requirements for forecasting methods, in the first place should be put adaptive forecasting methods, in particular the exponential smoothing model. The final monitoring function is the function of assessing the level of exposure to hazardous and harmful production factors, which includes a methodology for assessing risks, is based on determining the levels of harmful effects of risk factors and the degree of their influence on the human body and a comprehensive assessment of factors of the working environment.

Keywords: labor protection, monitoring, physical factors, management, production system.

Вступ. Положення Закону України «Про охорону праці» [1] зобов'язують роботодавця організувати функціонування системи управління охороною праці, яка забезпечує моніторинг та оцінку технічного стану виробничого обладнання та устаткування, атестацію робочих місць на відповідність нормативно-правовим актам з охорони праці в порядку і строки, що визначаються законодавством, та за їх підсумками вживати заходи до усунення небезпечних і шкідливих для здоров'я виробничих факторів.

Метою роботи є удосконалення системи моніторингу небезпечних та шкідливих факторів виробничого середовища як однієї з основних функцій системи охорони праці структури управління охороною праці.

Викладення основного матеріалу. Незважаючи на певні позитивні зрушення, зокрема зниження рівня виробничого травматизму, залишається необхідність подальшого удосконалення системи управління охороною праці (СУОП) на підприємствах. Результати досліджень вітчизняних та закордонних вчених переконливо свідчать про необхідність урахування комбінованого впливу фізичних факторів виробничого середовища (ФФВС) на здоров'я людини.

Основною вимогою до розробки системи управління забезпеченням безпечних умов і охорони праці є виключення неповноти взаємозв'язків необхідної інформації і розв'язуваних всередині завдань, що дозволяє реалізовувати таку відкриту систему управління, яка в даних умовах давала б можливість реалізовувати цільові функції безпеки та охорони праці.

Технічні, організаційні та психологічні причини виробничого травматизму в умовах штатних ситуацій

сполучені в значній мірі з порушеннями правил безпеки та інших нормативних документів, що встановлюють і регламентують діяльність працівників.

У процесі аналізу показників впливу серед всієї їх сукупності виникає потреба вибрати найбільш впливові з точки зору досягнення кінцевого якісного результату – впливу та можливості контролю та аналізу рівня безпеки та охорони праці. Запропоновану структуру побудови управління ризиком можна використовувати для оцінки якості охорони праці на будь-якому абстрактному підприємстві. Причому основним ядром такої системи є система моніторингу небезпечних факторів (рис. 1).

Метою моніторингу небезпечних та шкідливих факторів є забезпечення безпечних умов, досягнення запланованих завдань по охороні праці, мінімізація негативних наслідків.

Моніторинг небезпечних факторів направлений на: а) підвищення оперативності та якості реагування у сфері охорони праці на усіх рівнях контролю; б) достовірне науково-інформаційне забезпечення програм розвитку у сфері охорони праці; в) виявлення змін при веденні безпечних умов праці; г) оптимальний вибір цілей та завдань у сфері охорони праці.



Рис. 1. Функціональна модель системи моніторингу небезпечних та шкідливих факторів

Аналізуючи питання охорони праці можна стверджувати, що завдання управління виробничими ризиками вимагає як технічних, так і організаційно-управлінських рішень [2-5]. Серед завдань, які потребують детального аналізу є питання комплексного аналізу, моніторингу та розробки моделей і засобів системи управління охороною праці. Застосування комплексного підходу до оцінювання функціонування систем управління у сфері охорони праці потребує системного контролю [6]. Результатом комплексного підходу є формування засобів управління виробничими ризиками на основі ефективних технічних та організаційно-управлінських механізмів.

Отже, моніторинг небезпечних та шкідливих чинників – одна з основних функцій системи управління охороною праці, яка спрямована на підвищення оперативності та якості реагування у сфері охорони праці на всіх рівнях контролю, дотримання норм, правил та режимів безпечного функціонування виробничої системи [4, 6].

Структурна схема задач моніторингу небезпечних та шкідливих чинників за умов комплексного підходу показана на рис. 2.

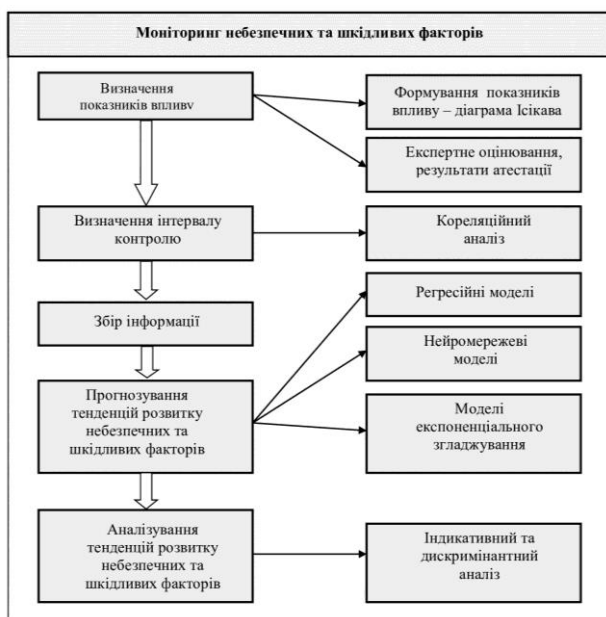


Рис. 2. Структурна схема задач моніторингу за умов комплексного підходу

Формування показників впливу на рівень ефективності охорони праці потребує механізму оцінювання. Поставлену задачу дозволяє здійснити графічна модель емпіричного аналізу, а саме діаграма Ісікави [6,7]. На цьому етапі відбувається аналіз за наступними кроками: а) підбір показників, які характеризують проблемну ситуацію, виявлення базисних (основних) показників, які характеризують сутність проблеми, яка вирішується; б) виявлення показників, які є цільовими, виявлення чинників, які безпосередньо мають вплив на завдання яке вирішується; в) групування показників по блоках (складові цільових показників). Об'єднуються в один блок показники, які характеризують завдання, що є загальним для даного цільового показника.

Приклад формування факторного поля небезпечних та шкідливих факторів для людини впливів підприємства з вироблення скла і скляних виробів показано на рис. 3.

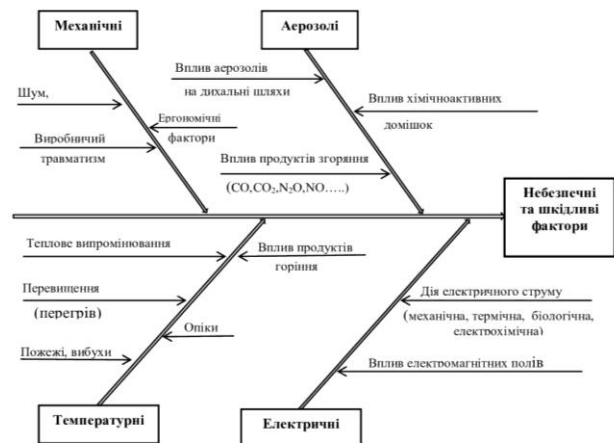


Рис. 3. Сукупність впливаючих небезпечних та шкідливих факторів

При збиранні вихідної інформації виникає задача визначення інтервалу контролю небезпечних та шкідливих факторів, який задовольняв би як вимогам моніторингу динаміки змін факторів виробничого середовища, так і вимогам управління рівнями небезпечних або шкідливих факторів [8].

Однією із основних функцій моніторингу є функція прогнозування тенденцій розвитку небезпечних та шкідливих факторів. В той же час прогнозування небезпеки настання нещасних випадків на виробництві є обов'язковою складовою частиною в системі управління охороною праці виробничої системи, що дає можливість планування необхідних заходів щодо запобігання таких випадків. Будь-який метод управління, в тому числі в системі управління охороною праці, включає два етапи: етап визначення можливих величин й етап вироблення і реалізації управляючих дій [9]. Перевага надається тим методам, які ґрунтуються на дослідженні прогнозних оцінок. Основними вимогами, що висуваються до систем реального часу, є досить висока точність прогнозування і простота алгоритмів, робота в умовах невизначеної і недостатньої інформації. В роботах [5,10] наведено достатній ана-

ліз моделей та методів прогнозування, що застосовуються в системах управління охороною праці. Проте ці моделі застосовуються в основному для прогнозування рівня виробничого травматизму, коли об'єкт дослідження розглядається як статичний і при прогнозуванні не враховується інформація, що відображає зміни в досліджуваному об'єкті. Тому вони не завжди можуть бути використані для прогнозування розвитку небезпечних та шкідливих факторів виробничих систем.

Враховуючи сказане, розглянемо методи, які можуть бути використані для прогнозування розвитку небезпечних та шкідливих факторів виробничої системи. Причому, моделі прогнозування повинні бути уніфікованими і адаптивними до можливих змін контрольованих параметрів [9,10].

На даний момент налічується більше 100 класів моделей прогнозування [11], причому найширше розповсюдження набули формалізовані методи, які можуть бути розділені на статистичні та структурні моделі прогнозування.

Статистичні моделі представлені такими групами і використовуються в роботах:

- *регресійні моделі*. Регресійний аналіз використовується для вирішення безлічі завдань в прогнозуванні, де потрібні вивчення відносини між двома і більше змінними. [12]. Мета такого аналізу є визначення залежності між вихідної змінної і безліччю зовнішніх регресорів. Для визначення коефіцієнтів регресії можуть бути використані, як метод найменших квадратів [13], так і метод максимальної правдоподібності [14].

- *моделі експоненціального згладжування*. Даний клас моделей один з найпростіших, тому найчастіше використовується в практиці для вирівнювання часового ряду. Суть моделі полягає в тому, що прогнозні значення постійно переглядаються при надходженні нових фактичних даних. У міру старіння спостережень модель експоненціального згладжування надає їм експоненціально спадні ваги, тому минулі спостереження мають менший вплив на прогнозні значення в порівнянні з останніми доступними даними [15-20].

Моделі, в яких функціональна залежність між майбутніми та фактичними значеннями часового ряду, як і зовнішніми факторами, задана структурно, відносяться до групи структурних моделей. Вони представлені такими групами, як нейромережеві моделі, моделі на базі ланцюгів Маркова, моделі на базі класифікаційно-регресійних дерев [21-23].

Переваги тих чи інших методів прогнозування визначаються в основному часовими характеристиками програм і точністю прогнозів. При цьому можна показати, що експоненціальне згладжування, метод авторегресії для одновимірних процесів зводяться один до іншого, і можна знайти відповідні співвідношення між дисперсією шуму динаміки в моделі авторегресії і параметром згладжування в методі експоненціального згладжування. Тому точність названих методів навряд чи буде істотно відрізнятися. Тим часом з точки зору простоти реалізації, часу розрахунку, з огляду на вимоги, що пред'являються до методу прогнозування, на

перше місце слід поставити адаптивні методи прогнозування, зокрема модель експоненціального згладжування.

Завершальною функцією моніторингу є функція оцінки рівня впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів, яка включає в себе методологію оцінки ризиків, що спирається на визначенні рівнів шкідливого впливу факторів ризику і ступеня їх впливу на організм людини і комплексну оцінку факторів виробничого середовища.

Для створення такої системи необхідно використання відповідного математичного апарату, який дозволить вирішити поставлені завдання.

Комплексний підхід забезпечує раціональні підходи до питання вибору проектів структури системи моніторингу, забезпечувати прогноз показників для визначення основних тенденцій розвитку шкідливих та небезпечних факторів. Підхід повинен забезпечувати обґрунтований вибір проектів для початкового впровадження, враховуючи економічні та технологічні критерії.

Оскільки виконання поставлених цілей і завдань має багатоетапну і розгалужену схему, для їх вирішення необхідно використовувати комплекс математичних моделей, кожна з яких спрямована на вирішення своїх завдань, з метою їх компонування для досягнення поставленої мети - підвищення ефективності функціонування системи моніторингу небезпечних та шкідливих факторів виробничого середовища.

Висновок. Моніторинг фізичних чинників виробничого середовища є однією з основних функцій системи охорони праці, заснований на зборі фактичного матеріалу, мета якого полягає в одержанні певної інформації про об'єкт дослідження та спрямований на дотримання норм, правил та режимів безпечного функціонування виробничої системи, виконання запланованих заходів і дій, дотримання встановлених значень показників. На даний момент не існує єдиного прозорого механізму побудови системи моніторингу небезпечних та шкідливих факторів, а існуючі системи моніторингу забезпечують виконання ряду певних функцій, що недостатньо для комплексної оцінки стану охорони праці. Запропоновано комплексний підхід до структури моніторингу шкідливих та небезпечних чинників, відмінною рисою якого є поетапний процес оцінки стану виробничого об'єкту, який включає визначення, збір та аналіз тенденцій розвитку шкідливих та небезпечних чинників виробничого середовища.

Список літератури

1. Закон України «Про охорону праці» № 2695-ХІІ від 14 жовтня 1992 р / Верховна Рада України. – Офіц. вид. - К.: Відомості Верховної Ради України, 1992. - № 49. - ст.668.
2. Содержание категории «мониторинг социально-экономических и экологических процессов» [Электронный ресурс] / Г.В. Бушмелева. – Режим доступа: www.bali.ostu.ru/umc/zj2006_2.php
3. Природопользование. Словарь-справочник. [ред.-упоряд. Н. Ф. Реймерс]. – М.: Мысль, 1990. – 639 с.

4. Сладкова О. Б. Информационный мониторинг: теоретико-методолог. основы [Текст]: Учеб. пособие / О.Б. Сладкова. – М.: МГУКИ, 2001. – 65 с.
5. Т.М. Таїрова. Методологічні засади моніторингу виробничого травматизму / Т. М. Таїрова. – К.: «Основа». 2014. – 201 с.
6. Ткачук К.Н., Калінчик В.В. Механізми побудови системи моніторингу небезпечних та шкідливих факторів виробничих об'єктів / Енергетика: економіка, технології, екологія – 2014. – № 1. – С. 85-89.
7. Басовский Л.Е. Управление качеством [Текст] / Л.Е. Басовский, В.Б. Протасьев. – М.: ИНФРА-М, 2001. – 212 с.
8. Ткачук К.Н., Калінчик В.В. Определение шага дискретизации при контроле параметров электрооборудования / Проблемы охраны труда, промышленной та цивільної безпеки: Збірник матеріалів Сьомої науково-методичної конференції (з участю студентів), м. Київ, 13-14 листопада 2012 р. – К.: Основа, 2012. – С. 156-162.
9. Ткачук К.Н. Моніторинг небезпечних факторів виробничої системи / Ткачук К.Н., Калінчик В.В. - Енергетика: економіка, технологія, екологія – 2013. - № 2. – С. 66 – 70.
10. Калінчик В.В. Моделі та методи прогнозування параметрів системи управління охороною праці / НТУУ „КПІ” Н.-д. ін-т ав-томатики та енергетики „Енергія”. – Київ, 2011. – 22 с.: – Бібліогр.: 26 назв. – Укр. – Деп. в ДНТБ України 19.05.11, № 25 - Ук – 2011.
11. Тихонов Э.Е. Методы прогнозирования в условиях рынка: учебное пособие / Э.Е. Тихонов – Невинномысск : Северо-Кавказский ГТУ, 2006. - 221 с. - ISBN 5895710778
12. Draper N.R. Applied Regression Analysis / N.R. Draper, H. Smith // Wiley-Interscience. - Third edition. - 1998. - 736 p. – ISBN 978-0471170822.
13. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений / Ю. В. Линник. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 1958. - 336 с.
14. Магнус Я.Р. Эконометрика. Начальный курс: Учеб. – 8-е изд., испр. / Я.Р. Магнус, П.К. Катышев, А.А. Пересецкий. – М.: Дело, 2007. – 504 с.
15. Brown R. G. Exponential Smoothing for Predicting Demand. Cambridge / R. G. Brown, A.D. Little. - Massachusetts: Arthur D. Little Inc., 1956. - 15 p.
16. Лукашин Ю. П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов / Ю. П. Лукашин. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 415 с. - ISBN 5-279-02740-5.
17. Holt C.C. Forecasting seasonals and trends by exponentially weighted moving averages / Holt C.C. – Carnegie Institut of Technology, Pittsburg, Pennsylvania. – 1957. – 412 p.
18. Winters P.R. Forecasting sales by exponentially weighted moving averages / P.R. Winters // Management Science. - 1960. - Vol. 6. - №3.
19. Чуев Ю.В. Прогнозирование количественных характеристик и процессов / Чуев Ю.В., Михайлов Ю.Б., Кузьмин В.И. – М.: Сов. радио, 1975. – 400 с.
20. К.Н. Ткачук. Прогнозування як складова функція системи моніторингу небезпечних та шкідливих факторів виробничого середовища / К.Н. Ткачук, В.В. Калінчик // Збірник наукових праць. Матеріали III Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки в країнах Європи та Азії» – Переяслав-Хмельницький. – 2018. – С. 25-27.
21. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – 2-е изд., стереотип. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 382 с.
22. Kalman R.E. New results in linear filtering and predication theory / Kalman R.E., Bucy R.S // J. Of Basic Eng. Trans. ASME – 1960. - No 60. - p. 51-91.
23. Ивахненко А.Г. Обзор задач, решаемых по алгоритмам Метода Группового Учета Аргументов (МГУА) [Электронный ресурс] / А.Г. Ивахненко, Г.А. Ивахненко // Режим доступа: <http://www.gmdh.net/articles/rus/obzorad.pdf>

References (transliterated)

1. Закон України «Про окhoronu pratsi» no 2695-XII vid 14 zhovtnia 1992 r. Verkhovna Rada Ukrainy. Ofits. vyd.- K.: Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy, 1992. no 49. st.668.
2. Bushmeleva G.V. Soderzhanie kategorii «monitoring social'no-ehkonomicheskikh i ehkologicheskikh processov» [Elektronnij resurs]. Rezhim dostupu: www.bali.ostu.ru/umc/zj2006_2.php
3. Prirodopol'zovanie. Slovar-spravochnik. [red-uporjad. N. F. Rejmers]. – Moscow: Mysl, 1990. 639 p.
4. Sladkova O.B. Informacionnyj monitoring: teoretiko - metodolog. osnovy [Tekst]: Ucheb. posobie. Moscow: MGUKI, 2001. 65 p.
5. Tairova T.M. Metodolohichni zasady monitorynhu vyrobnychoho travmatyzmu. Kyiv: «Osnova». 2014. 201 p.
6. Tkachuk K.N., Kalinchyk V.V. Mekhanizmy pobudovy systemy monitorynhu nebezpechnykh ta shkidlyvykh faktoriv vyrobnychych ob'ektiv. Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia. 2014. no 1. Pp. 85-89.
7. Basovskij L. E., Protas'ev V. B. Upravlenie kachestvom [Tekst]. Moscow: INFRA-M, 2001. 212 p.
8. Tkachuk K.N., Kalinchik V.V. Opredelenie shaga diskretizacii pri kontrole parametrov ehlektrooborudovanija. Problemy okhoroni praci, promislivoi ta civil'noi bezpeki: Zbirnik materialiv S'omoї naukovy-metodichnoi konferencii (z uchastju studentiv), Kiiv, 13-14 listopada 2012. Kyiv: Osнова, 2012. Pp. 156-162.
9. Tkachuk K.N., Kalinchyk V.V. Monitoryng nebezpechnykh faktoriv vyrobnychoyi systemy. Enerhetyka: ekonomika, texnologiya, ekologiya. 2013. no 2. Pp. 66-70.
10. Kalinchyk V.V. Modeli ta metody prognosuvannya parametrov systemy upravlinnya oxoronoyu praci. NTUU „KPI” N.-d. in-t avtomatyky ta enerhetyky „Energiya”. Kyiv, 2011. 22 p. Bibiliogr.: 26 nazv. Ukr. Dep. v DNTB Ukrayiny 19.05.11, no 25. Uk – 2011.
11. Tikhonov Eh.E. Metody prognosirovaniya v uslovijakh rynka: uchebnoe posobie. Nevinnomyssk: Severo-Kavkazskij GTU, 2006. 221 p. ISBN 5895710778
12. Draper N.R., Smith H. Applied Regression Analysis. Wiley-Interscience. Third edition. 1998. 736 p. ISBN 978-0471170822.
13. Linnik Ju. V. Metod naimen'shikh kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoy teorii obrabotki nabljudenij. Moscow: FIZMATLIT, 1958. 336 p.
14. Magnus Ja.R., Katyshev P.K., Pereseckij A.A. Ehkonometrika. Nachal'nyj kurs: Ucheb. 8-e izd., ispr. Moscow: Delo, 2007. 504 p.
15. Brown R.G., Little A.D. Exponential Smoothing for Predicting Demand. Cambridge. Massachusetts: Arthur D. Little Inc., 1956. 15 p.
16. Lukashin Ju. P. Adaptivnye metody kratkosrochnogo prognosirovaniya vremennykh rjadov. Moscow: Finansy i statistika, 2003. 415 p. ISBN 5-279-02740-5.
17. Holt C.C. Forecasting seasonals and trends by exponentially weighted moving averages. Carnegie Institut of Technology, Pittsburg, Pennsylvania. 1957. 412 p.
18. Winters P.R. Forecasting sales by exponentially weighted moving averages. Management Science. 1960. Vol. 6. No 3.

- 19 Chuev Ju.V., Mikhajlov Ju.B., Kuz'min V.I. Prognozirovanie kolichestvennykh kharakteristik i processov. Moscow: Sov. radio, 1975. 400 p.
- 20 Tkachuk K.N., Kalinchy`k V.V. Prognozuvannya yak skladova funkciya systemy monitoryngu nebezpechnykh ta shkidlyvykh faktoriv vyrobnychogo seredovy`shha. Zbirnyk naukovykh prac`. *Materialy III Mizhnarodnoyi naukovo-prakty`chnoyi internet-konferenciyi «Problemy` ta perspektyvy` rozvytku suchasnoyi nauky` v krayinax Yevropy` ta Aziyi»* Pereyaslav-Xmelnyczkyj. 2018. Pp. 25-27.
- 21 Kruglov V.V., Borisov V.V. Iskusstvennye neyronnye seti. Teorija i praktika. 2-e izd., stereotip. Moscow: Gorjachaja linija. Telekom, 2002. 382 p.
- 22 Kalman R.E., Bucy R.S. New results in linear filtering and predication theory. *J. Of Basic Eng. Trans. ASME*. 1960. No 60. Pp. 51-91.
- 23 Ivakhnenko A.G., Ivakhnenko G.A. Obzor zadach, reshaemykh po algoritmam Metoda Gruppovogo Ucheta Argumentov (MGUA) [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.gmdh.net/articles/rus/obzorad.pdf>

Поступила (received) 16.10.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Калінчик Василь Прокопович (Калинчик Василий Прокофьевич, Kalinchyk Vasil Prokopovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України КПІ ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри електропостачання; м. Київ; тел.: (067) 209-87-26.

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

Побігало Віталій Анатолійович (Побигайло Виталий Анатольевич, Pobigaylo Vitaliy Anatolievich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України КПІ ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри електропостачання; м. Київ; тел.: (097) 308-88-95.

ЗМІСТ

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

<i>Байда Е.И.</i> Влияние геометрии материала катушки на параметры электромагнитной силы индукционно-динамического механизма	3
<i>Жорняк Л.Б., Афанасьев О.И., Поляков В.О., Кулік Ж.О., Кот Р.В., Кравець І.О.</i> Особливості обрання теоретичного закону розподілу при оцінці надійності зовнішньої ізоляції газонаповнених вимірювальних трансформаторів	10
<i>Зорін Є.Ю., Чепелюк О.О., Гришук Ю.С.</i> Класифікація однофазних реле контролю напруги побутових споживачів з огляду на тенденції їх розвитку	15
<i>Лелюк М.А., Литвиненко В.В., Позняк А.А.</i> Аналіз роботи привідних механізмів вакуумних вимикачів середньої напруги	22
<i>Пантелеят М.Г., Гришук Ю.С., Чепелюк О.О., Єлоєв А.К.</i> Розрахунок і проектування магнітопроводу індукційних кухонних плит	27

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

<i>Гончаров Є.В., Марков В.С., Поляков І.В.</i> Анализ опыта проведения лабораторных занятий по электротехнике	32
<i>Грінченко В.С.</i> Оцінка довжини системи контурного екранування при зменшенні магнітного поля кабельних ліній	36

СИЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ ТА МАГНІТНІ ПОЛЯ

<i>Борцов А.В.</i> Генератор импульсных напряжений для поверки высоковольтных делителей напряжения	40
<i>Kostiukov I.O.</i> The influence of stray inductance of storage capacitor and load capacitance on transients in high voltage facilities with pulse transformers	43

ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЙ

<i>Мохнач Р.Э., Андриенко П.Д.</i> Медные и сталемедные композиционные материалы с высокими электротехническими свойствами	47
<i>Калінчик В.П., Калінчик В.В., Побігайло В.А.</i> Методологія комплексного підходу до вибору структури системи моніторингу небезпечних та шкідливих факторів	53

CONTENT

ELECTRIC APPARATUS

<i>Baida E.I.</i> Influence of coil material geometry on the parameters of the electromagnetic force of the induction-dynamic mechanism	3
<i>L.B. Zhorniak, A.I. Afanasiev, V. Poliakov, Z.O. Kulik, R.V. Kot, I.O. Kravets</i> Peculiarity of theoretical distrsbution law selection by gas-insulated transformers external isolation calculation	10
<i>Y.Y. Zorin, O.O. Chepelyuk, Yu.S. Hryshchuk</i> Classification of single-phase voltage control relays for household consumers taking into account the tendencies of their evolution	15
<i>M.A. Leliuk, V.V. Lytvynenko, A.A. Poznyak</i> Analysis of the operation of the drive mechanisms of medium voltage vacuum circuit breakers	22
<i>M.G. Pantelyat, Yu.S. Hryshchuk, O.O. Chepeliuk, A.K. Yeloiev</i> Calculation and design of magnetic cores of household induction cookers	27

THEORETICAL ELECTRICAL ENGINEERING

<i>YE.V. Honcharov, V.S. Markov, I.V. Polyakov</i> Analysis of experience in conducting laboratory classes in electrical engineering	32
<i>V.S. Grinchenko</i> Length estimation for loop shielding system when decreasing cable line magnetic field	36

STRONG ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS

<i>A.V. Bortsov</i> Pulsed voltage generator for verification high voltage dividers	40
<i>Kostiukov I.O.</i> The influence of stray inductance of storage capacitor and load capacitance on transients in high voltage facilities with pulse transformers	43

USE OF ELECTRICAL TECHNOLOGIES

<i>R.E. Mokhnach, P.D. Andrienko</i> Copper and steel-copper composite materials with high electrical properties	47
<i>V.P. Kalinchyk, V.V. Kalinchyk, V.A. Pobigaylo</i> Methodology of comprehensive approach to the choice of system structure monitoring of dangerous and harmful factors	53

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

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

Збірник наукових праць

№ 1'2020

Головний редактор Є.І. Байда, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна
Відповідальний секретар: І. С. Варшамова, НТУ «ХПІ», Україна

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

Підп. до друку 20.10.2020 р. Формат 60×90 1/8. Папір офсетний.
Друк лазерний. Умов. друк. арк. 9,25.
Тираж 300 пр. Зам. № . Ціна договірна.

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