

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

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**

№ 2 (6) 2021

No 2 (6) 2021

Збірник наукових праць

Collection of Scientific papers

Видання засноване у 1961 р.

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2021

Kharkiv
NTU «KhPI», 2021

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика = Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Проблемы усовершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Problems of electrical machines and apparatus perfection. Theory and practice : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2021. – № 2 (6). – 66 с. – ISSN 2079-3944.

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

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

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

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

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

Мова статей – українська, російська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ» Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика включено до категорії Б за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка «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., канд. техн. наук, НТУ «ХПІ», Україна
Члени редколегії:
Баранов М. І., д-р техн. наук, с.н.с., НДПКІ "Молнія" НТУ
"ХПІ", Харків, Україна;
Кропачек О. Ю., д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПІ", Харків,
Україна;
Плюгін В. С., д-р техн. наук, проф., ХНУМГ, Харків,
Україна;
Середа О. Г., д-р 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 № 11 від 26.11.2021 р.

Founder
National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"
Editorial staff
Editor-in-chief:
Baida E. I., dr. tech. sc., Ph. D. (Eng.), NTU "KhPI", Ukraine
Executive secretary:
Varshamova I. S., Ph. D. (Eng.), 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., dr. tech. sc., 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.

Л. Б. ЖОРНЯК, О. І. АФАНАСЬЄВ, В. М. ЩУСЬ, О. Ю. МОРОЗОВ, Ю. В. РУДЕНКО

ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ ЗОВНІШНЬОЇ ПОЛІМЕРНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ГАЗОНАПОВНЕНИХ ВІМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

В статті авторами запропонована методика оцінки параметрів електричного навантаження для розрахунку показників експлуатаційної надійності твердої ізолюючої структури газонаповнених високовольтних апаратів, що являє собою опорну та ізолюючу покривку для вимірювальних високовольтних трансформаторів, заповнених електричним маслом в якості внутрішнього ізолюючого середовища. Ця методика дозволяє оцінити параметри електричного навантаження (напругу та напруженість поля) в залежності від конструктивних особливостей апарату та системи екранування, що використовується для вирівнювання електричного поля. Розроблена методика дозволяє отримати значення показників експлуатаційної надійності газонаповненого високовольтного обладнання (вимірювальні трансформатори, розрядники, обмежувачі перенапруги та ін.) шляхом визначення параметрів теоретичних законів розподілу, або даних експериментальних досліджень чи статистичну інформацію, яка отримана в результаті моніторингу роботи ізоляційних конструкцій з урахуванням реальних умов експлуатації та дії зовнішніх чинників. Реалізація цієї методики дає можливість врахувати вплив зовнішніх факторів і експлуатаційних характеристик, властивих вимірювальним трансформаторам як струму, так і напруги. У запропонованій методиці в якості прикладу розглядається опорна ізоляційна покривка, що знаходиться під час експлуатації в найбільш несприятливих умовах, таких як зовнішнє забруднення, зволоження та їх комбінація, перенапруги різного походження та ін. Теоретичні висновки підтверджуються результатами розрахунків та ймовірного моделювання на прикладі найбільш масової конструкції газонаповненого трансформатора струму серії ТОГ-362. Більш точне визначення ефективності запропонованої методики прогнозування параметрів теоретичних законів розподілу та показників надійності можна досягти за рахунок проведення додаткової серії розрахунків та експериментальних випробувань конкретних ізоляційних конструкцій. Таким чином, був зроблений висновок про можливість використання отриманих результатів для оцінки показників експлуатаційної надійності зовнішньої ізоляції як газонаповнених вимірювальних трансформаторів, так і аналогічного високовольтного обладнання розподільних пристроїв та трансформаторних підстанцій.

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

Л.Б. ЖОРНЯК, А.И. АФАНАСЬЄВ, А.Ю. МОРОЗОВ, В.Н. ЩУСЬ, Ю.В. РУДЕНКО

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ВНЕШНЕЙ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В статье авторами предложена методика оценки параметров электрической нагрузки для расчёта показателей эксплуатационной надёжности твердой изолирующей структуры газонаполненных высоковольтных аппаратов, что представляет собою опорно-изоляционную покрывку для измерительных высоковольтных трансформаторов, заполненных маслом в качестве внутренней изолирующей среды. Эта методика позволяет оценить параметры электрической нагрузки (напряжение и напряженность поля) в зависимости от конструктивных особенностей аппарата и системы экранирования, которая используется для выравнивания электрического поля. Разработанная методика позволяет получить значения показателей эксплуатационной надёжности газонаполненного высоковольтного оборудования (измерительные трансформаторы, разрядники, ограничители перенапряжений и др.) путем определения параметров теоретических законов распределения, или данных экспериментальных исследований, или статистическую информацию, которая получена в результате мониторинга изоляционных конструкций с учетом реальных условий эксплуатации и воздействия внешних факторов. Реализация этой методики дает возможность учесть влияние внешних факторов и эксплуатационных характеристик, присущих измерительным трансформаторам как тока, так и напряжения. В предложенной методике в качестве примера рассматривается опорная изоляционная покрывка, которая находится во время эксплуатации в наиболее неблагоприятных условиях, таких как внешнее загрязнение, увлажнение и их комбинация, перенапряжения различного происхождения и пр. Теоретические выводы подтверждаются результатами расчетов и вероятностного моделирования на примере наиболее массовой конструкции газонаполненного трансформатора тока серии ТОГ-362. Более точное определение эффективности предложенной методики прогнозирования параметров теоретических законов распределения и показателей надёжности можно достигнуть за счет проведения дополнительной серии расчетов и экспериментальных исследований конкретных изоляционных конструкций. Таким образом, был сделан вывод про возможность применения полученных результатов для оценки показателей эксплуатационной надёжности внешней изоляции как газонаполненных измерительных трансформаторов, так и аналогичного высоковольтного оборудования распределительных устройств и трансформаторных подстанций.

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

L. B. ZHORNIAK, A. I. AFANASIEV, A. Ю. МОРОЗОВ, V. M. SCHUS, J. V. RUDENKO

ESTIMATION PECULIARITIES OF EXTERNAL POLYMER INSULATION RELIABILITY OF GAS-FILLED INSTRUMENT TRANSFORMERS

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: gas-filled current transformer, overlap voltage, field strength, insulating cover, theoretical distribution law, mathematical expectation, dispersion, distribution density, time to failure, coefficient of variation.

Вступ. В умовах промислової експлуатації для апаратів високої напруги взагалі, а також для газонаповнених вимірювальних трансформаторів конкретно, найважливішою властивістю, що забезпечує високу ефективність їх використання в умовах розподільних пристроїв, є такий показник, як надійність. У загальному випадку надійність визначається як властивість електричного апарату зберігати за часом у завданих межах значення всіх параметрів, що визначають здатність виконувати потрібні функції в завданих режимах та умовах використання, ремонтів, збереження та транспортування [1, 11]. Надійність вимірювального трансформатора як системи визначається надійністю його окремих функціональних блоків, що формують цю систему. Аналіз статистичних даних [2, 11] показує, що більшу частку відмов в процесі експлуатації створює такий функціональний блок, як ізоляційна конструкція (ІК), яка в свою чергу поділяється на внутрішню та зовнішню, причому головним джерелом відмов є остання.

Для ізоляційних конструкцій (ІК) у загальному випадку надійність зазвичай розглядається як властивість виробу виконувати певні завдані їм функції [1, 2]. При цьому ІК має зберігати власні експлуатаційні показники та параметри у встановлених межах впродовж завданого проміжку часу. Особливими параметрами та характеристиками ІК є пробивна або розрядна напруга, робоча напруженість поля, інтенсивність та потужність часткових розрядів, напруга виникнення коронних розрядів та ін. Для окремої ІК, наприклад, прохідного або опорного ізолятора, опорної ізоляційної покришки газонаповненого вимірювального трансформатора та інше, надійність характеризується такими показниками, як напрацювання до відмови, інтенсивність відмов, ймовірність безвідмовної праці, термін служби та ін. В свою чергу, ці показники, насамперед, залежать від якості ізоляційного матеріалу, товщі ізоляції, електричного, теплового, механічного навантаження, параметрів зовнішнього середовища, тощо [3, 4, 5].

Яким чином та наскільки перераховані вище чинники впливають на термін служби ізоляційної конструкції визначити майже неможливо через технічні та конструктивні особливості кожного високовольного пристрою. Але ж можна зробити приблизне оцінювання, що, в свою чергу, має тій або інший рівень ймовірності. За таких умов найбільш зручним критерієм оцінювання надійності можуть бути такі характеристики, як ймовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмов та густина ймовірності виникнення відмов. Всі ці характеристики надійності між собою пов'язані простими математичними співвідношеннями. Вони визначені для обраного теоретичного закону розподілу випадкової величини, який характеризує співвідношення між значенням випадкової величини та ймовірністю її виникнення. В якості такої випадкової

вої величини можливо обрати, наприклад, напрацювання до відмови або напругу перебиття.

Великий комплекс досліджень розрядних напруг різного роду ізоляторів проведено в [3, 6] для різноманітного обладнання розподільних пристроїв високої напруги, а також в [4, 5] для опорних та підвісних ізоляторів, що були забруднені у природних умовах. Ці результати довели, що розкид цих напруг найбільш повно можливо описати нормальним або одним з його різновидів, наприклад усіченим нормальним законом розподілу. Можливість усічення зліва графіка функції густини розподілу для теоретичних законів розподілу ймовірностей перебиття у нормальному експлуатаційному режимі дозволила використовувати як усічений нормальний, так і логарифмічно-нормальний закони розподілу для теоретичної оцінки показників надійності ІК газонаповнених апаратів взагалі та вимірювальних трансформаторів в якості конкретного випадку [7].

Мета роботи. З урахуванням вище сказаного, метою цієї роботи є розробка методики прогнозування параметрів надійності задля визначення показників експлуатаційної надійності зовнішньої ізоляції газонаповнених вимірювальних трансформаторів. Реалізація такої методики здійснюється з урахуванням даних попередніх досліджень та статистичної інформації, що отримана на основі моніторингу роботи ізоляційних конструкцій в реальних умовах їх експлуатації.

В якості об'єктів дослідження розглянемо опорні ізоляційні покришки газонаповнених вимірювальних трансформаторів струму серії ТОГ та трансформаторів напруги серії НОГ. Автори робіт [3, 4, 8, 9] стверджують, що навіть за нормальних робочих умов опорні ізоляційні покришки працюють в середовищі різко неоднорідних електричних полів. Така структура електричного поля утворює найбільш важкий режим праці та найбільшу швидкість старіння ізоляції. Ця швидкість додатково підсилюється за рахунок складної структури самої ізоляційної покришки. Її основу являє собою скло-епоксидний циліндр, що забезпечує механічну стійкість, на якому розміщуються ребра з кремнійорганічної гуми, що забезпечують необхідну електричну міцність зовнішньої ізоляції. Загальний вид ізоляційної покришки трансформатора струму серії ТОГ показано на рис. 1 [10, 15].

Як було встановлено раніше, в процесі експлуатації ізоляційної покришки можливо виникнення двох видів відмов. По-перше, це пробій твердого ізоляційного матеріалу, оскільки в середині покришки проходять елементи струмопровідного контуру з високим потенціалом (фазна напруга).

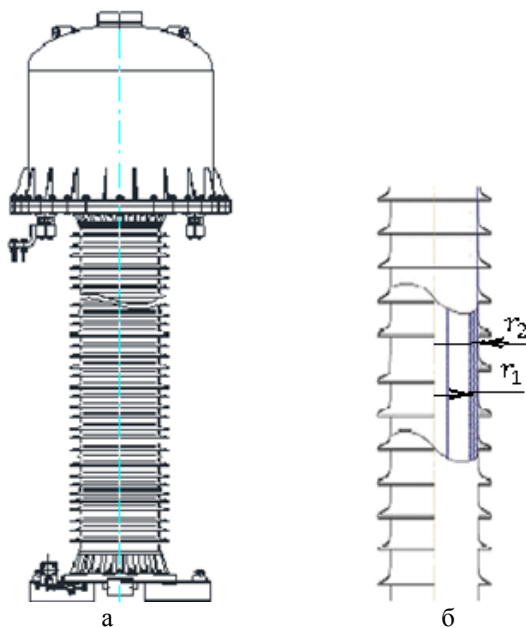


Рис. 1. Загальний вид трансформатора (а) та опорно-ізоляційної покривки (б) вимірального трансформатора струму серії ТОГ-362

Оскільки внутрішня газова ізоляція розрахована на фазну напругу і працює в найбільш спритних умовах, то даний вид пробою мало ймовірний. По-друге, це перекриття ізоляційної покривки по її поверхні внаслідок дії несприятливих зовнішніх чинників та електричного навантаження. Оскільки перекриття по поверхні твердого матеріалу ізоляційної покривки може мати місце як по зовнішній, так і по внутрішній поверхні, то для спрощення аналізу приймаємо наступне припущення. Оскільки умови роботи внутрішньої ізоляції значно легші внаслідок відсутності негативного впливу зовнішнього середовища, то вважатимемо, що відмови типу перекриття матимуть місце тільки в елементах зовнішньої ізоляції.

Через появу будь-якої відмови може виникнути відмова трансформатора в цілому, то в цьому випадку ймовірність безвідмовної роботи покривки з урахуванням прийнятого припущення визначається за наступною умовою [1, 2]:

$$P(t) = P_{\text{пр}}(t) \cdot P_{\text{пер}}(t) = P_{\text{пер}}(t),$$

де $P_{\text{пр}}(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи при пробі твердого ізоляційного матеріалу;

$P_{\text{пер}}(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи при перекритті по зовнішній поверхні покривки.

Як показують статистичні дані [2, 12] відмови внаслідок пробою крізь товщу твердої ізоляції покривки мало ймовірні внаслідок того, що внутрішня елегазова ізоляція розраховується на повний клас прикладеної напруги. Тому на першому етапі досліджень розглянемо, яким чином впливає електричне навантаження на величину $P_{\text{пер}}(t)$.

Ймовірність безвідмовної роботи при перекритті ізоляції може бути визначена за умовою:

$$P_{\text{пер}}(t) = 1 - Q_{\text{пер}}(t),$$

де t – випадкова величина (визначальний параметр), під дією якої відбувається процес перекриття ізоляції. В якості цієї величини можливо обирати напругу пе-

рекриття $U_{\text{пер}}$, або величину напруженості електричного поля $E_{\text{р.п}}$ уздовж опорно-ізоляційної покривки. Методику оцінки цих параметрів у загальному виді приведено у [8, 9];

$Q_{\text{пер}}(t)$ – ймовірність перекриття ізоляції під дією визначального параметру.

Для визначення показників надійності в якості початкових даних необхідно знати вид теоретичного закону розподілу випадкової величини та параметри цього закону. Якщо за визначальний параметр обрати $U_{\text{пер}}$, то її значення можливо встановити за методикою, що викладено в [7, 8, 9] наступним чином.

Значення середньоквадратичного відхилення σ_H та математичного очікування m_U розподілу напруг перекриття за умови застосування нормального закону розподілу можливо визначити за наступними співвідношеннями:

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

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

K_B – коефіцієнт варіації, найбільші значення якого відповідають ізоляції з підвищеним рівнем забруднення зовнішній поверхні та електричного навантаження;

$E_{\text{ср.д}}$ – значення середньої напруженості поля уздовж шляху витoku при перекритті ізолятора під дощем; в залежності від типу забруднення та категорії розміщення обладнання вона може мати значення в межах від 25 кВ/м до 60 кВ/м [3, 8, 9];

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

Для визначення коефіцієнта навантаження в якості критичного значення напруги перекриття можливо використовувати напругу виникнення поверхневих часткових розрядів $U_{\text{п}}$ у вигляді появи ковзкого розряду. Її значення визначається за наступною умовою [12, 13]:

$$U_{\text{п}} = \frac{7,8}{C_{\text{п}}^{0,44}},$$

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

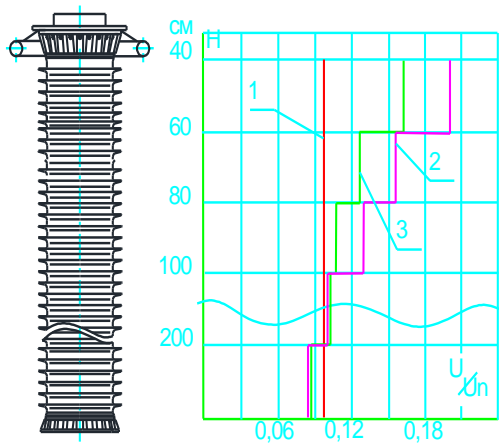
$$C_{\text{п}} = \frac{\epsilon_d \cdot \epsilon_0}{r_2 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}},$$

де ϵ_d – відносна діелектрична проникність ізоляційного матеріалу, з якого виготовлено покривку;

ϵ_0 – постійна величина, що дорівнює $8,85 \cdot 10^{-12} \text{Ф/м}$;

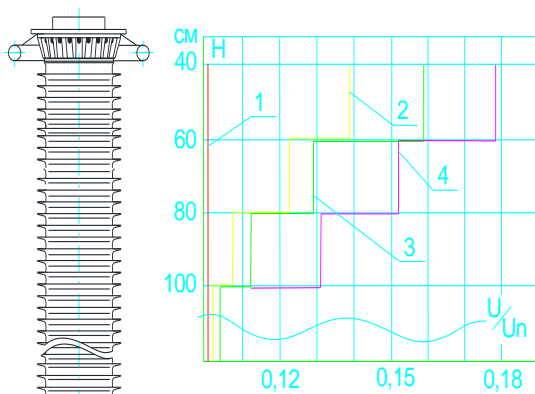
r_1, r_2 – відповідно внутрішній та зовнішній радіуси циліндричного твердого діелектрика покривки.

Для конструкції ізоляційної покривки, що розглядається, за вище зазначеною методикою проведений розрахунок розподілу напруги перекриття вздовж зовнішньої поверхні, яке показано на рис. 2, для різних значень коефіцієнту варіації (рис. 2, а) та середньої напруженості поля $E_{\text{ср.д}}$ (рис. 2, б).



а

1 – теоретичний рівномірний; 2 – відповідно з мінімальною та максимальною системою екранування;



б

1 – теоретичний рівномірний; 2, 3, 4 – відповідно з мінімальним та максимальним значенням $E_{ср.д.}$.

Рис. 2. Розподіл електричного навантаження (напряга перекриття) уздовж ізоляційної покриття трансформатора струму серії НОГ-362

Якщо за визначальний параметр обрати напруженість поля $E_{р.п.}$, то її розподіл уздовж поверхні ізоляційної покриття можливо визначити за наступними методиками, що у загальному випадку викладено в [3, 8, 9, 14]. З урахуванням конкретних особливостей газонаповнених апаратів це можливо зробити наступним чином. На класи номінальної напруги 330 кВ та вище ІК працює в умовах різко неоднорідного поля, що приводить до суттєво нерівномірного розподілу напруженості уздовж поверхні ізоляційної покриття. При цьому, максимальне значення напруженості має місце біля електроду з високим потенціалом. Як один із засобів для найбільш ефективного вирівнювання розподілу напруженості використовують зовнішні екрани. У випадку, коли конструкція апарату має осьову симетрію, як це має місце у конструкціях вимірювальних трансформаторів, екрани мають кільцеву форму (тороїдальні екрани). Наприклад, у конструкції ТОГ-362 функції екрану виконує нижній фланець бака трансформатора (див. рис. 1), у конструкції НОГ – це тороїдальний екран, що розташований біля верхнього електроду вводу високої напруги (див. рис. 2).

Для визначення картини розподілу напруженості поля уздовж ізоляційної покриття будується графічно-розрахункова модель, яку показано на рис. 3 [3].

Причому, верхній електрод (фланцеве з'єднання або бак трансформатора) апроксимується еквівалентною кулею радіусом R_1 .

Значення напруженості поля у будь-якій точці поверхні покриття що відраховується від поверхні еквівалентної кулі в напрямку заземленого фланцю, визначається за умовою:

$$E_{zi} = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 z^2} + \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{z - (H_2 - H_1)}{\left[(z - H_2 + H_1)^2 + R_0^2 \right]^{3/2}} + \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0} \times \frac{R_1}{\sqrt{(H_2 - H_1)^2 + R_0^2}} \left\{ \frac{1}{z^2} \cdot \frac{z - A}{\left[(z - A)^2 + B^2 \right]^{3/2}} \right\} \quad (2)$$

Заряди на екрані q_1 та еквівалентній кулі q_2 , що апроксимує верхній електрод, які входять як початкові параметри в рівняння (2), можливо визначити на основі рішення системи потенціальних рівнянь [3, 11]:

$$U = \alpha_{11} \cdot q_1 + \alpha_{12} \cdot q_2,$$

$$U = \alpha_{12} \cdot q_1 + \alpha_{22} \cdot q_2,$$

$$q_1 = \frac{U_{w.p.}}{\alpha_{11}\sqrt{3}} \cdot \frac{1 - \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{22}}}{1 - \frac{\alpha_{12}^2}{\alpha_{12} \cdot \alpha_{11}}} \quad (3)$$

$$q_2 = \frac{U_{w.p.}}{\alpha_{22}\sqrt{3}} \cdot \frac{1 - \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{11}}}{1 - \frac{\alpha_{12}^2}{\alpha_{11} \cdot \alpha_{22}}} \quad (4)$$

Власні та взаємні коефіцієнти α_i для вище позначених рівнянь можуть бути визначені за наступними формулами. Власний коефіцієнт для еквівалентної сфери радіусом R_1 при висоті центру еквівалентної кулі над землею H_2 визначається за умовою:

$$\alpha_{11} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 R_0} \left(1 - \frac{R_1}{2H_2} \right) \quad (5)$$

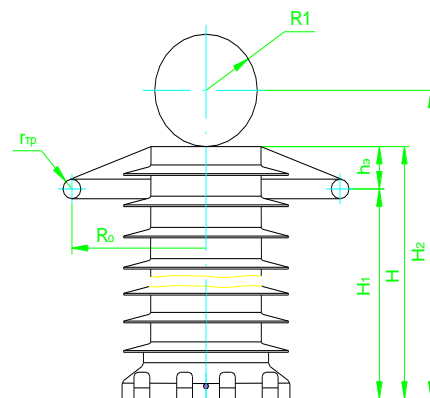


Рис. 3. Графічна розрахункова модель для розрахунку розподілу напруженості уздовж ізоляційної покриття вимірювальних трансформаторів

Для тороїдального екрану, який має радіус труби $r_{тр}$ і радіус осьової лінії R_0 при висоті центру симетрії над землею H_1 , власний коефіцієнт визначається за умови:

$$\alpha_{22} = \frac{1}{4\pi^2 \epsilon_0 R_0} \left(1 + \frac{r_{тр}}{2R_0} \right) \left[\ln \frac{9R_0}{r_{тр}} \left(1 + \frac{r_{тр}}{2R_0} \right) - \frac{\pi \cdot R_0}{2H_1} \right] \quad (6)$$

Визначається взаємний коефіцієнт для сфери (апроксимуюча куля) та тороїда (екран) за умови:

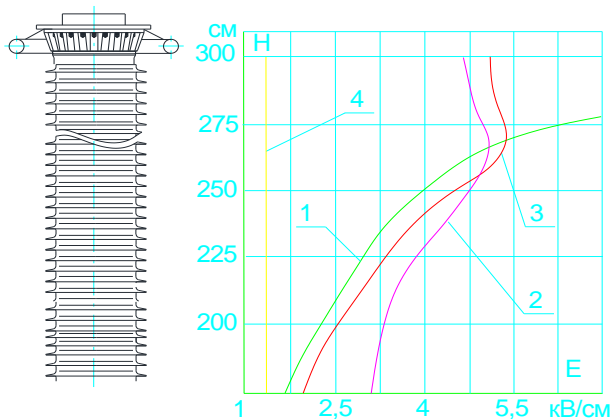
$$\alpha_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{\sqrt{(H_2 - H_1)^2 + R_0^2}} - \frac{1}{\sqrt{(H_2 + H_1)^2 + R_0^2}} \right) \quad (7)$$

Коефіцієнти А та В, які враховують комплексний вплив другого екрану полюса (при наявності), екранів інших фаз, шинування та відображення всієї системи електродів від землі, визначаються наступним чином:

$$A = \frac{R_1^2(H_2 - H_1)}{(H_2 - H_1)^2 + R_0^2},$$

$$B = \frac{R_0 R_1^2}{(H_2 - H_1)^2 + R_0^2}.$$

Як приклад, результати розрахунку розподілу напруженості поля вздовж ізоляційної покривки вимірювального трансформатора на основі раніше наведеної методики показані на рис. 4. З наведених даних можна щодо розподілу електричного навантаження (див. рис. 2 та рис. 4) максимальне навантаження має верхню частину ізоляційної покривки в межах (0 – 0,75) м відстані від верхнього фланцю з високим потенціалом. Шляхом змінювання параметрів системи екранування можливо досягнути зменшення кидків напруженості поля і, відповідно, коефіцієнтів електричного навантаження на ізоляцію, причому як зовнішню, так і внутрішню.



1 – без тороїдального екрану; 2, 3 – відповідно з максимальними та мінімальними розмірами тороїдального екрану; 4 – теоретичний рівномірний

Рис. 4. Розподіл напруженості поля уздовж поверхні ізоляційної покривки

В умовах зрівняльного аналізу у спрощеному варіанті електричне навантаження можливо визначити за допомогою критичної напруженості поля за наступною методикою. Визначається критична напруга корони U_k на одиночному кільцевому екрані, який встановлено на опорній ізоляційній покривці трансформатора за умовою [3, 6]:

$$U_k = \frac{E_k r_{TP}}{A_2 \left(1 - \frac{A}{N}\right) + \frac{r_{TP}}{N \cdot R_0}},$$

де E_k – критична напруженість корони, кВ, яка визна-

чається за умовою:

$$E_k = 16,5 \cdot K_{ш} \cdot \gamma \left(1 + \frac{0,62}{\gamma^{0,3} \cdot r_{TP}} \right), \quad (8)$$

де $K_{ш}$ – коефіцієнт шорсткості поверхні екрану, з урахуванням кліматичних умов експлуатації та агресивного впливу оточуючого середовища обирається у межах (0,75 – 0,8);

γ – відносна густина оточуючого повітря;

r_{TP} – радіус труби екрану, см.

A, A_2, N – емпіричні коефіцієнти, які враховують вплив конструктивних чинників, наприклад другого екрану, сусідніх полюсів тощо, і визначаються за умовами:

$$A = \ln \frac{2H}{R_0} - \ln \left[0,5 + 0,5 \sqrt{1 + \left(\frac{2H}{H_{II}} \right)^2} \right],$$

$$A_2 = 1 + \frac{r_{TP}}{R_0} \ln \frac{8R_0}{r_{TP}},$$

$$N = \ln \frac{2H}{R_e},$$

$$R_e = \sqrt[m]{m \cdot q \cdot v^{m-1}},$$

де H – висота ізоляційної покривки, см;

H_{II} – відстань між сусідніми полюсами, см;

R_0 – радіус тороїдального екрану, см;

m – кількість дротів ошиновки (при використанні розчіпленого проводу);

q – радіус одного дроту, см;

v – радіус кола розташування дротів в елементі їх сумісного кріплення.

Отримані після розрахунку значення параметрів електричного навантаження ізоляційної покривки в подальшому будуть початковими даними для визначення коефіцієнтів навантаження для її окремих частин.

Для обраного в якості теоретичного нормального закону розподілу для подальших досліджень в якості основних характеристик надійності обираються густина розподілу відмов $f(U, E)$ та ймовірність безвідмовної роботи $P(U, E)$. Значення цих характеристик для нормального закону розподілу можливо оцінити за такими умовами [1, 2]:

$$f_H(U) = \frac{1}{\sigma_U \sqrt{2\pi}} \exp \left[-0,5 \left(\frac{U - m_U}{2\sigma_U} \right)^2 \right], \quad (9)$$

$$P_H(U) = 0,5 - \Phi \left(\frac{U - m_U}{\sigma_U} \right), \quad (10)$$

де m_U, σ_U – параметри нормального закону розподілу;

Φ – нормована функція Лапласа.

Параметри нормального закону розподілу можливо визначити за умовою (1) наступним чином:

$$\sigma_{U_H} = K_B \cdot U_{пер.д}; \quad m_{U_H} = 1,1 \cdot U_{пер.д} \quad (11)$$

де $U_{пер.д}$ – напруга перекриття ізоляційної покривки під дощем, кВ [6, 13].

Задля перевірки адекватності наведених вище методик було проведено розрахунки головних показників надійності для опорно-ізоляційної покривки трансформатора струму серії ТОГ-362 при початкових

даних, що були отримані на основі досліджень, наведених в [7]. Результати показані в табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри нормального закону розподілу для опорно-ізоляційної покриття вимірювального трансформатора

$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	$U_{\text{пер}}, \text{кВ}$	K_B	σ_{U_n}
330	398	0,06	24

На основі отриманих значень параметрів нормального закону розподілу можуть бути визначені функція густини розподілу $f(U, E)$, ймовірність безвідмовної роботи $P(U, E)$ та інші показники надійності. В якості прикладу на рис. 5 та рис. 6 приведено характерні залежності $P(U)$ та $P(t)$ для ізоляційної покриття трансформатора струму серії ТОГ-362.

На рис. 5 було використані наступні позначення: 1, 2 – функції надійності відповідно для нормального та усіченого нормального законів розподілу; а також 3, 4 – функції розподілу ймовірності безвідмовної роботи для коефіцієнтів варіації 0,04 та 0,06 відповідно.

На рис. 6 показано залежність функції надійності в залежності від виду розрахункових параметрів та системи екранування. При цьому використані наступні позначення: 1, 2 – функції надійності, що розраховані з використанням критичних напруги та напруженості поля, відповідно; 3, 4 – функції надійності при використанні оптимальної та мінімальної систем екранування, відповідно.

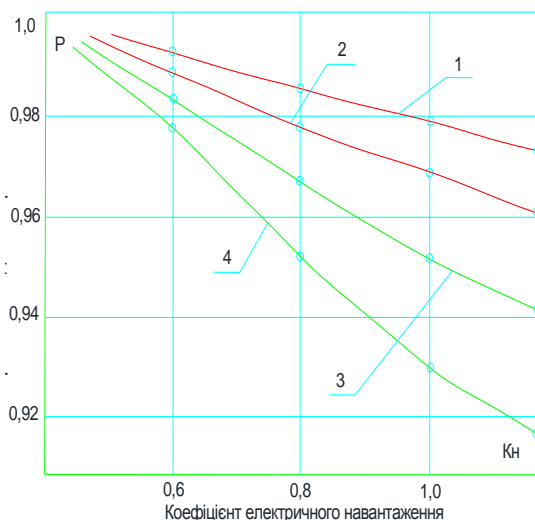


Рис. 5. Функції ймовірності безвідмовної роботи в залежності від електричного навантаження

Висновки. Аналіз отриманих графічних залежностей (див. рис. 2 та рис. 4) дозволяє зробити наступні висновки. Максимальне електричне навантаження на ізоляційну покриття припадає на проміжку від 0 м до 0,7 м від верхнього фланцю з високим потенціалом. А отже, як показують розрахунки, ця відстань збільшується несуттєво при зростанні номінальної напруги. В такому випадку експлуатаційна надійність покриття буде визначатися переважно параметрами навантаження на цій верхній ділянці ізоляційної конструкції. Покращити умови роботи трансформаторів при тих чи інших ізоляційних конструкціях в зоні максимального електричного навантаження можливо за рахунок

вдосконалення систем екранування, ефективність яких, в свою чергу, можливо визначити за допомогою використання вище наведеної методики на етапі їх конструювання. Крім того, застосування цієї методики дає можливість враховувати вплив окремих чинників, які характеризують особливості конструкції, а також умови експлуатації ІК.

Функції ймовірності безвідмовної роботи, що отримані розрахунком за різними методиками, що показані в роботі, мають приблизно однакові результати і можуть бути рекомендовані для використання для порівняльних розрахунків.

Розроблена та запропонована методика дозволяє здійснити визначення показників експлуатаційної надійності елементів ізоляційної конструкції високовольтного обладнання схожого конструктивного виконання, наприклад розрядників, обмежувачів перенапруг, опорних ізоляційних конструкцій тощо. Для уточнення отриманих результатів необхідно використати додаткову інформацію, що враховує параметри теоретичного закону розподілу, або їх комбінації, вплив рівню забруднення поверхні покриття, інтенсивність випадання дощів та ін.

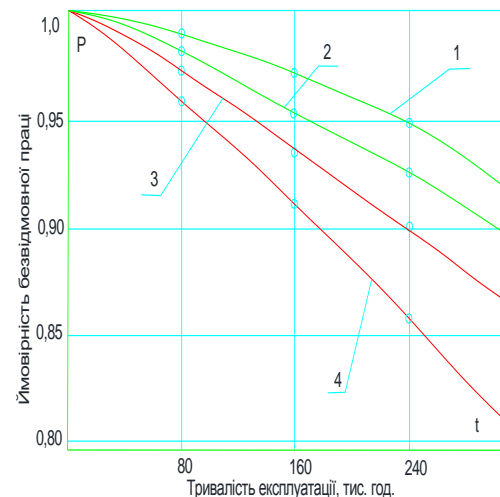


Рис. 6. Функція надійності зовнішньої ізоляції

Для забезпечення максимальної достовірності розрахункових даних необхідно порівняти отримані результати з даними експериментальних досліджень або статистичної інформації, що формуються на основі моніторингу роботи конкретних ізоляційних конструкцій в реальних умовах експлуатації.

Список літератури

1. Дружинин Г.В. *Теория надежности радиоэлектронных систем в примерах и задачах* / ред. Г.В. Дружинина. Москва: Энергия, 1976. 448 с.
2. Гук Ю.Б. *Теория надежности в электроэнергетике*. Ленинград: Энергоатомиздат, 1990. 208 с.
3. Александров Г. Н., Иванов В. Л. *Изоляция электрических аппаратов высокого напряжения*. Ленинград: Энергоатомиздат, 1984. 208 с.
4. Мархелев С.Д., Соломоник Е.А. *Выбор и эксплуатация изоляции в районах с загрязненной атмосферой*. Энергоатомиздат, 1983. 120 с.
5. Мархелев С.Д., Соломоник Е.А. *Изоляция линий и подстанций в районах с загрязненной атмосферой*. Ленинград: Энергия, 1873. 248 с.
6. Ушаков В.Я. *Изоляция установок высокого напряжения*.

- Москва: Энергоатомиздат, 1994. 496 с.
7. Жорняк Л.Б., Афанасьев О. И., Поляков В. О. та ін. Особливості обрання теоретичного закону розподілу при оцінці надійності зовнішньої ізоляції газонаповнених вимірювальних трансформаторів. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика.* Харків: НТУ "ХПІ", 2020. № 1. С. 10–14.
 8. Жорняк Л.Б., Афанасьев А.И., Леонов Р.С., Карпук А.В. Возможности компенсации напряженности электрического поля внешней изоляции высоковольтных газонаполненных трансформаторов тока. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів.* Харків: НТУ "ХПІ", 2017. № 34 (1256). С. 14–18.
 9. Жорняк Л.Б., Афанасьев О.И., Щусь В.М. Особенности регулирования напряженности электрического поля вдоль внешней изоляции газонаполненных трансформаторов напруги. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів.* Харків: НТУ "ХПІ", 2019. № 2. С. 13–17.
 10. КО «Запорожский завод высоковольтной аппаратуры» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.zva.zp.ua>.
 11. Александров Г. Н., Борисов В. В., Каплан Г.С. и др. Проектирование электрических аппаратов: учебник для вузов. / ред. Г. Н. Александрова. Ленинград: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1985. 448 с.
 12. Дмитриевский В. С. *Расчет и конструирование электрической изоляции.* Москва: Энергоиздат, 1981. 392 с.
 13. Александров Г. Н., Афанасьев А.И., Борисов В.В. *Электрические аппараты высокого напряжения* / ред. Г.Н. Александрова. 2-е изд., доп. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГТУ, 2000. 503 с.
 14. Жорняк Л.Б., Волкова О. Г., Макогон М. А. К вопросу об улучшении качества внутренней изоляции высоковольтных измерительных трансформаторов. *Вісник Національного технічного університету ХПІ*, 2017, № 34(1256) С.19-25.

References (transliterated)

1. Druzhynin H.V. *Teoriya nadiynosti radioelektronnykh system v prykladakh i zadachakh* [Reliability theory of radio electronic systems in examples and problems]. Moscow, Enerhiya, 1976. 448 p.
2. Huk Yu.B. *Teoriya nadiynosti v elektroenerhetysi* [Reliability theory in the electric power industry]. Leningrad, Vyscha shkola, 1990. 208 p.
3. Aleksandrov H. N., Ivanov V. L. *Izolyatsiya elektrychnykh aparativ vysokoyi napruhy*. [Insulation of high voltage electrical apparatus]. - Leningrad, Vyscha shkola, 1984. 208 p.
4. Markhelev S.D., Solomonyk E.A. *Vybir i ekspluatatsiya izolyatsiyi v rayonakh iz zabrudnenoju atmosferoyu* [Selection and operation of insulation in areas with a polluted atmosphere]. Vyscha shkola, 1983. 120 p.
5. Markhelev S.D., Solomonyk E.A. *Izolyatsiya liniy i pidstantsiy v rayonakh iz zabrudnenoju atmosferoyu* [Insulation of lines and substations in areas with a polluted atmosphere]. Leningrad, Enerhiya, 1873. 248 p.
6. Ushakov V.Ya. *Izolyatsiya ustanovok vysokoyi napruhy* [Insulation of high voltage installations]. Moscow, Vyscha shkola, 1994. 496 p.
7. Zhornyak L.B., Afanas'yev A. I., Polyakov V. A., Kulik Z.O., Kot R.V., Kravets I.O. *Osoblivosti izbraniya teoreticheskogo zakona raspredeleniya pri otsenke nadezhnosti vneshney izolyatsii gazonapolnennykh izmeritel'nykh transformatorov* [Peculiarity of theoretical distrbution law selection by gas-insulated transformers external isolation calculation] *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta "KHPI". Seriya: Problemy sovershenstvovaniya elektricheskikh mashin i apparatov. Teoriya i praktika* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice]. Kharkiv, NTU "KHPI" Publ., 2020, no 1, pp. 10-14.
8. Zhornyak L.B., Afanas'yev A.I., Leonov R.S., Karpuk A.V. *Mozhlyvosti kompensatsiyi napruzenosti elektrychnoho polya zovnishn'oyi izolyatsiyi vysokovol'tnykh hazonapovnenykh transformatoriv strumu* [The possibilities of compensating the electric field strength of external insulation of high-voltage gas-filled current transformers]. *Visnyk natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KHPI". Seriya: Problemy udoskonalennya elektrychnykh mashyn y aparativ* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice]. Kharkiv, NTU "KHPI" Publ., 2017, no 34 (1256). pp. 14-18.
9. Zhornyak L.B., Afanas'yev A.I., Shchus' V.M. *Osobnosti regulirovaniya napryazhenosti elektricheskogo polya vdol' vneshney izolyatsii gazonapolnennykh transformatorov napryazheniya* [Features of regulation of electric field along external isolation of high-voltage gas-insulated voltage transformers]. *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta "KHPI". Seriya: Problemy sovershenstvovaniya elektricheskikh mashin i apparatov. Teoriya i praktika* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice]. Kharkiv, NTU "KHPI" Publ., 2019, no 2, pp. 13-17.
10. КО «Запорізький завод високовольтної апаратури» [Elektronnyy resurs] - Rezhym dostupu: <http://www.zva.zp.ua>.
11. Aleksandrov H. M., Borysov V. V., Kaplan H.S. i in. *Proektuvannya elektrychnykh aparativ* [Electrical Apparatus Design]. Leningrad, Vyscha shkola, Lenynhr. otd-nya, 1985. 448 p.
12. Dmytriv's'ka V. S. *Rozrakhunok ta konstruyuvannya elektrychnoyi izolyatsiyi* [Calculation and design of electrical insulation]. Moscow, Enerhoizdat, 1981. 392 p.
13. Aleksandrov H. N., Afanas'yev A.I., Borysov V.V. *Elektrychni aparaty vysokoyi napruhy* [High voltage electrical apparatus], 2 ed, St. Petersburg, SPbHTU Publ., 2000. 503 p.
14. Zhornyak L.B., Volkova O. H., Makohon M. A. *Do pytamnya pro polipshennya yakosti vnutrishn'oyi izolyatsiyi vysokovol'tnykh vymiryval'nykh transformatoriv* [To the question of improving the quality of internal insulation of high-voltage measurement transformers]. *Visnyk natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KHPI". Seriya: Problemy udoskonalennya elektrychnykh mashyn y aparativ* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice]. Kharkiv, NTU "KHPI" Publ., 2017, no 34 (1256). pp.19-25.

Надійшла (received) 09.10.2021

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 (Афанасьєв 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

Щусь Віталій Миколайович (Щусь Виталий Николаевич, Schus Vitaliy Miolaievich) – головний конструктор ТОВ «ЕЛІЗ» Запорізький трансформаторний завод, м. Запоріжжя, Україна; e-mail: cliz.zp.ua

Морозов Олексій Юрьєвич (Морозов Алексей Юрьевич, Morozov Olexij Jurijovich) – студент кафедри електричних та електронних апаратів, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; e-mail: aneon100@gmail.com

Руденко Олія Володимирівна (Руденко Юлия Владимировна, Rudenko Julia Volodimirivna) – студентка кафедри електричних та електронних апаратів, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; e-mail: zodapani@gmail.com

В.В. ЛИТВИНЕНКО, О.Г. СЕРЕДА, І.С. ВАРШАМОВА, О.Г. КОРОЛЬ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФЕРОМАГНІТНОГО ОСЕРДЯ НА ШВИДКОДІЮ ІНДУКЦІЙНО-ДИНАМІЧНОГО РОЗЧІПЛЮВАЧА З ЯКОРЕМ ПОРОТНОГО ТИПУ

Автоматичні вимикачі струмового захисту напівпровідникових перетворювачів обмежують тривалість та амплітуду надструму на такому рівні, щоб його теплова дія не перевищила максимально допустимий тепловий захисний показник напівпровідникового приладу, що захищається. Обмеження теплової дії струму короткого замикання досягнуто зменшенням власного часу спрацьовування автоматичного вимикача. Конструкція вимикача змінена таким чином, що замість базового електромагнітного розчіплювача використаний індукційно-динамічний, який, в свою чергу, складається з індуктора з феромагнітним осердям і якоря поворотного типу у вигляді мідного диску. Електродинамічне зусилля, що розвиває індукційно-динамічний розчіплювач для швидкого спрацьовування, визначається коефіцієнтом взаємної індуктивності котушки індуктора і якоря. Застосування феромагнітного осердя спричинило збільшення коефіцієнта взаємної індуктивності котушки та якоря, а отже збільшення електродинамічного зусилля, що розвиває розчіплювач, і зменшення власного часу спрацьовування вимикача. На макетному зразку проведено експериментальне дослідження власного часу спрацьовування розчіплювача за різних значень електричних параметрів конденсаторної батареї живлення індуктора, обмоткових даних котушки індуктора та габаритних розмірів диску. Результати досліджень довели як зменшення часу спрацьовування автоматичного вимикача при збереженні енергії конденсаторної батареї живлення індуктора, так і зменшення потрібної енергії конденсаторної батареї живлення індуктора при збереженні мінімального часу спрацьовування вимикача. Зменшення енергії конденсаторної батареї живлення індуктора дозволило зменшити ємність та напругу конденсаторної батареї живлення розчіплювача, а отже її габарити.

Ключові слова: автоматичний вимикач, індукційно-динамічний розчіплювач, інтеграл Джоуля, напівпровідниковий перетворювач.

В.В. ЛИТВИНЕНКО, А.Г. СЕРЕДА, И.С. ВАРШАМОВА, Е.Г. КОРОЛЬ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФЕРОМАГНИТНОЙ СЕРДЕЧНИКА НА БЫСТРОДЕЙСТВИЕ ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО РАСЦЕПИТЕЛЯ С ЯКОРЕМ ПОРОТНОГО ТИПА

Автоматические выключатели токовой защиты полупроводниковых преобразователей ограничивают длительность и амплитуду сверхтока на таком уровне, чтобы его тепловое действие не превысило максимально допустимый тепловой защитный показатель защищаемого полупроводникового прибора. Ограничение теплового действия тока короткого замыкания достигнуто уменьшением времени срабатывания автоматического выключателя. Конструкция выключателя изменена таким образом, что вместо базового электромагнитного расцепителя использован индукционно-динамический, который, в свою очередь, состоит из индуктора с ферромагнитным сердечником и якоря поворотного типа в виде медного диска. Электродинамическое усилие, развиваемое индукционно-динамическим расцепителем для быстрого срабатывания, определяется коэффициентом взаимной индуктивности катушки индуктора и якоря. Применение ферромагнитного сердечника повлекло за собой увеличение коэффициента взаимной индуктивности катушки и якоря, следовательно, увеличение электродинамического усилия, развиваемого расцепителем, и уменьшение собственного времени срабатывания выключателя. На макетном образце проведено экспериментальное исследование собственного времени срабатывания расцепителя при различных значениях электрических параметров конденсаторной батареи питания индуктора, обмоточных данных катушки индуктора и габаритных размеров диска. Результаты исследований доказали как уменьшение времени срабатывания автоматического выключателя при сохранении энергии конденсаторной батареи индуктора, так и уменьшение необходимой энергии конденсаторной батареи питания индуктора при сохранении минимального времени срабатывания выключателя. Уменьшение энергии конденсаторной батареи индуктора позволило уменьшить емкость и напряжение конденсаторной батареи питания расцепителя, а, следовательно, ее габариты.

Ключевые слова: автоматический выключатель, индукционно-динамический расцепитель, интеграл Джоуля, полупроводниковый преобразователь.

V.V. LYTVYENKO, O.H. SEREDA, I.S. VARSHAMOVA, O.H. KOROL'

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE INFLUENCE OF A FERROMAGNETIC CORE ON THE SPEED OF AN INDUCTION-DYNAMIC RELEASE WITH TURNING ANCHOR TYPE

Circuit breakers for overcurrent protection of semiconductor converters limit the duration and amplitude of the overcurrent at such a level that its thermal effect does not exceed the maximum allowable thermal protection index of the protected semiconductor device. The limitation of the thermal action of the short-circuit current is achieved by reducing the operation time of the circuit breaker. The design of the circuit breaker is changed in such a way that instead of the basic electromagnetic release is used an induction-dynamic release, which consists of an inductor with a ferromagnetic core and a rotary armature in the form of a copper disk. The electrodynamic force producing by the induction-dynamic release for quick operation is determined by the coefficient of mutual inductance of the inductor coil and the armature. Using of a ferromagnetic core entailed an increase in the coefficient of mutual inductance of the coil and armature, therefore, an increase in the electrodynamic force producing by the release, and a decrease in own tripping time of the circuit breaker. On a prototype, an experimental study of the proper operation time of the release was carried out at various values of the electrical parameters of the capacitor bank of the inductor power supply, the winding parameters of the inductor coil and the disk dimensions. The research results have proved both a decrease in the tripping time of the circuit breaker while conserving the energy of the capacitor bank of the inductor, and a decrease in the required energy of the capacitor bank to power the inductor while maintaining the minimum tripping time of the circuit breaker. Reducing the energy of the capacitor bank of the inductor made it possible to reduce the capacity and voltage of the capacitor bank of the supply of the release, and, consequently, its dimensions.

Keywords: circuit breaker, induction-dynamic release, Joule integral, semiconductor converter.

Вступ. Напівпровідникові пристрої, зокрема тиристорні перетворювачі, що є невід'ємною складовою електротехнічних комплексів та систем, надзвичайно

чутливі до теплової дії надструмів при перевантаженнях та коротких замиканнях, а також короточасних кидках струму. Мала теплоємність напівпровідникового приладу не дозволяє тривалого перевантаження і

© В.В. Литвиненко, О.Г. Середя, І.С. Варшамова, О.Г. Король, 2021

може спричинити неприпустиме перегрівання й вихід приладу з ладу. Аналіз аварійних перехідних процесів свідчить про те, що проблема вдосконалення пристроїв та апаратів струмового захисту наразі залишається надзвичайно актуальною. Захисні пристрої, зокрема автоматичні вимикачі, повинні обмежувати тривалість та амплітуду аварійного струму на рівні, щоб його тепловий еквівалент не перевищував максимально допустимий для напівпровідникового приладу. Обмеження амплітуди аварійного струму знижує теплову дію струму на обладнання, що захищається. Час відключення аварійного струму автоматичним вимикачем складається з часу спрацьовування розчіплювача, часу відключення механізму вільного розчеплення та часу горіння електричної дуги в міжконтактному проміжку. Зазвичай це 20-40 мс залежно від величини струму короткого замикання. За такий значний час надструм досягає свого амплітудного значення та спричиняє вихід з ладу непошкоджених вентилів напівпровідникових перетворювачів. Отже встановлення автоматичних вимикачів на вході напівпровідникових перетворювачів через великі власні часи спрацьовування не дозволяє їх захистити без додаткових заходів. Обмеження теплової дії надструму досягається зменшенням власного часу спрацьовування розчіплювача автоматичного вимикача, а також зменшенням амплітуди струму короткого замикання шляхом встановлення на стороні живлення перетворювача мережевих реакторів. В реальних умовах тепловий захист тиристорних перетворювачів при внутрішніх коротких замиканнях випрямляча досягається спільною установкою на його вході мережевих реакторів в комплексі з автоматичним вимикачем.

Мета роботи – експериментальне дослідження впливу наявності феромагнітного осердя на власний час спрацьовування індукційно-динамічного розчіплювача з якорем поротного типу у вигляді мідного диску.

Постановка задач експериментального дослідження. В зоні відсікання часо-струмової захисної характеристики в автоматичних вимикачах зменшити час спрацьовування розчіплювача миттєвої дії, яким звичайно є електромагніт, можна шляхом заміни електромагнітного розчіплювача на індукційно-динамічний [1]. Експериментально доведено, що індукційно-динамічні механізми (Thomson drive) можуть застосовуватися в якості швидкодіючих приводів електромеханічних апаратів захисту [2] й суттєво зменшити час спрацьовування автоматичного вимикача. Конструктивно індукційно-динамічний розчіплювач (ІДР) складається з індуктора у вигляді котушки зі струмом, якоря у вигляді мідного диску та блоку керування конденсаторною батареєю живлення індуктора. Величина електродинамічного зусилля, що забезпечує ІДР для швидкого розмикання контактів вимикача, залежить від величини струму в котушці індуктора при розряді на неї конденсатора живлення, а також визначається коефіцієнтом взаємної індуктивності котушки індуктора і якоря. Для ІДР з якорем поворотного типу рівняння електродинамічного моменту [3]:

$$M_{\text{мех}}(\alpha(t), t) = i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{dM}{d\alpha} \cdot r_0, \quad (1)$$

де i_1, i_2 – струми в котушці та якорі відповідно; $\frac{dM}{d\alpha}$ – зміна взаємної індуктивності системи в функції кута повороту рухомої частини ІДР;

Одним з напрямів збільшення коефіцієнта взаємної індуктивності котушки індуктора і якоря задля збільшення сили відкидання диска є введення у конструкцію ІДР феромагнітного осердя. Якісний аналіз впливу феромагнітного осердя на величину електродинамічного зусилля, що розвиває ІДР здійснений в [4]. Доведено, що за рахунок збільшення зусилля шляхом додавання в конструкцію ІДР феромагнітного осердя є можливість зменшити енергію конденсаторної батареї живлення індуктора (ємність та початкову зарядну напругу), а отже суттєво зменшити габарити блоку конденсаторів.

Для експериментальних досліджень був обраний автоматичний вимикач серії ВА3700. Конструктивною особливістю цих вимикачів є застосування в якості дистанційного розчіплювача електромагніту з якорем поворотного типу. Щоб уникнути конструктивних змін базової конструкції автоматичного вимикача, існуючий розчіплювач був замінений на ІДР з феромагнітним осердям і якорем саме поворотного типу.

На рис. 1 наведена кінематична схема розробленої конструкції ІДР. Якір 1 механічно пов'язаний з рейкою 4, що обертається і звільняє важіль 5 механізму вільного розчеплення автоматичного вимикача. Це призводить до розмикання контактів головного кола при виникненні надструму. F_1 – початкова сила пружини, що утримує собачку засувки вимикача.

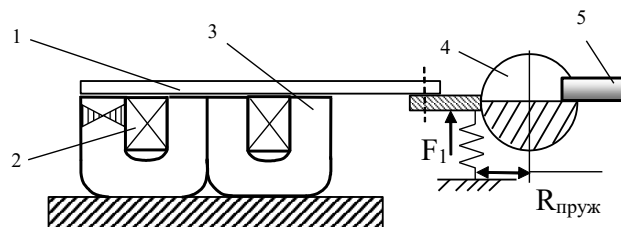


Рис. 1. Кінематична схема індукційно-динамічного розчіплювача з феромагнітним осердям та якорем поворотного типу: 1 – якір; 2 – котушка; 3 – феромагнітне осердя; 4 – рейка засувки вимикача; 5 – важіль

Задачі експериментального дослідження наступні:

1. Дослідити динамічні характеристики макетного зразку ІДР з феромагнітним осердям та якорем поворотного типу.

2. Визначити власний час спрацьовування ІДР за різних значень таких електричних параметрів конденсаторної батареї, як ємність та початкова зарядна напруга на конденсаторі, при різних параметрах котушки індуктора та радіусі диску.

3. Визначити параметри, що мають найбільший вплив на зменшення часу спрацьовування автоматичного вимикача з метою їх подальшої оптимізації.

Відома математична модель ІДР подана системою інтегро-диференціальних рівнянь, що описують електромагнітні перехідні процеси в магнітозв'язаних електричних контурах робочої котушки і рухомого елемента розчіплювача (якоря), рівняння розряду конденса-

торної батареї, рівняння для зусилля, що діє на рухомий елемент у напрямку руху [3]. Зважаючи на складність перехідних процесів у ІДР, вирішення цих рівнянь можливе лише з використанням чисельних методів.

У [5] математична модель ІДР з магнітною системою також містить рівняння електричного кола та зусилля, що діє на рухомий елемент, але вона доповнена рівняннями магнітного кола з урахуванням кінцевих величин магнітних провідностей ділянок магнітної системи:

$$\begin{cases} u_c(t) = R_1 \cdot i_1(t) + w_1^2 \cdot G_{11} \cdot \frac{di_1(t)}{dt} + w_1^2 \cdot i_1(t) \cdot \frac{dG_{11}}{dt} - \\ \quad - w_1 \cdot w_2 \cdot G_{12} \cdot \frac{di_2(t)}{dt} - w_1 \cdot w_2 \cdot i_2(t) \cdot \frac{dG_{12}}{dt}; \\ 0 = R_2 \cdot i_2(t) - w_2^2 \cdot G_{22} \cdot \frac{di_2(t)}{dt} - w_2^2 \cdot i_2(t) \cdot \frac{dG_{22}}{dt} + \\ \quad + w_1 \cdot w_2 \cdot G_{12} \cdot \frac{di_1(t)}{dt} + w_1 \cdot w_2 \cdot i_1(t) \cdot \frac{dG_{12}}{dt}; \\ u_c(t) = U_{C0} - \frac{1}{C} \int_0^t i_1(t) \cdot dt; \\ \sum_k \left(\frac{\Phi'_k}{G'_k} + \frac{\Phi'_k}{G'_{jk}} \right) = P_1(t) \quad k = (\overline{1, K}); \\ \sum_k \left(\frac{\Phi''_k}{G''_k} + \frac{\Phi''_k}{G''_{jk}} \right) = P_2(t); \\ \sum_j \Phi'_j = 0 \quad j = (\overline{1, J}); \\ \sum_j \Phi''_j = 0; \\ m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = \frac{\Phi_\delta^2(t)}{2\mu_0 S_\delta} - F_c; \\ \mu = \mu(B, H). \end{cases} \quad (2)$$

Запропонована у [5] модель найбільш точно відображає фізику процесів розподілу струмів та магнітних потоків в ІДР при його спрацьовуванні та підвищує точність розрахунків.

Конструкція макетного зразка ІДР. Для проведення експериментальних досліджень та вирішення поставлених задач виготовлено макетний зразок ІДР з магнітною системою та якорем поворотного типу (рис. 2).

Обмотка ІДР намотана мідною стрічкою. ІДР встановлено в правий полюс автоматичного вимикача ВА3792.

При проведенні експериментальних досліджень власного часу спрацьовування ІДР в залежності від електричних параметрів розрядного контуру системи керування використовувалися дві електричні схеми (рис. 3), одна з яких забезпечувала коливальний характер розряду ємності конденсатора на обмотку індуктора ІДР (рис. 3, а), а інша – аперіодичний (рис. 3, б).

Геометричні параметри ІДР:

- висота котушки - 10 мм;
- товщина мідної стрічки котушки – 0,1 мм та 0,05 мм;
- кількість витків котушки – 45 та 60;
- переріз осердя – 12×25 мм
- розмір внутрішнього вікна осердя – 15 мм;
- висота осердя – 20 мм
- товщина якоря – 1 мм.



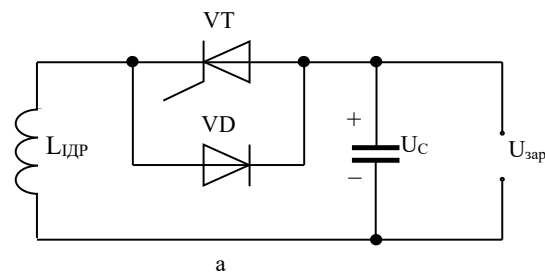
а



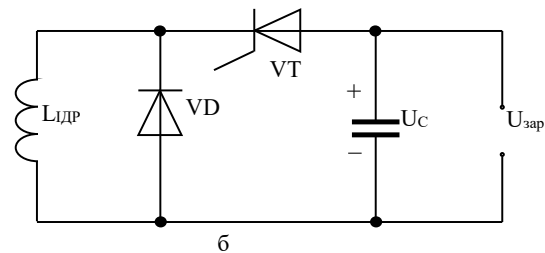
б

Рис. 2. Конструкція ІДР з магнітною системою з якорем поворотного типу:

а) автоматичний вимикач ВА3792 з ІДР; б) ІДР



а



б

Рис. 3. Електричні схеми підключення обмотки ІДР: а) коливальний процес; б) аперіодичний процес

Результати досліджень. Дослідження часу спрацьовування ІДР проводилося при двох величинах напруги на конденсаторі $U_{C1}=200$ В; $U_{C2}=300$ В. На обмотку ІДР подавався імпульс з конденсатору за однією зі схем (рис. 3). При кожній нарузі на конденсаторі досліджувався вплив ємності конденсаторної батареї, яка також мала два значення $C_1=100$ мкФ та $C_2=200$ мкФ. Товщина мідної стрічки, якою намотана обмотка ІДР, 0,05 мм та 0,1 мм, відповідно кількість витків обмотки

60 та 45. Кількість витків обмотки та її ширина обмежена розмірами магнітної системи. Кут спрацьовування ІДР α дорівнює 0,06 рад. Варіювання товщини обмотувальної стрічки здійснювалося з метою визначення залежності часу спрацьовування від параметрів обмотки. Вплив товщини стрічки котушки на власний час спрацьовування ІДР при різних схемах підключення конденсатора приведено на рис. 4.

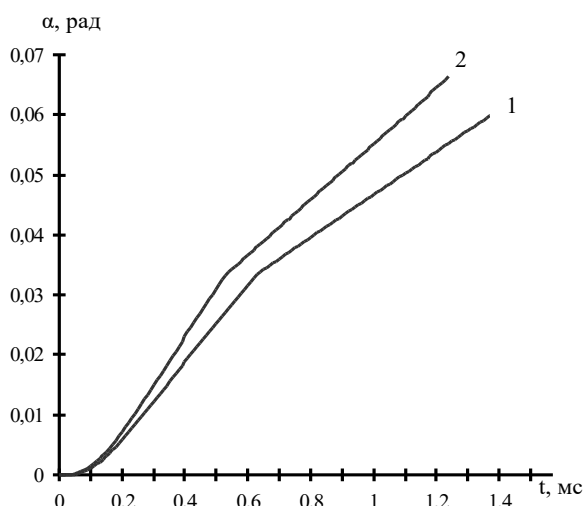


Рис. 4. Вплив схеми підключення конденсатора до обмотки ІДР: товщина стрічки 0,1 мм, витків 45: 1 – аперіодичний процес; 2 – коливальний процес

З отриманих характеристик можна зробити висновок, що час спрацьовування ІДР зменшується при коливальному характері розряду ємності зі зростанням кількості витків і товщини стрічки.

Вплив товщини стрічки та числа витків обмотки на швидкість ІДР при коливальному розряді ємності приведено на рис. 5. Характеристики на (рис. 5, а) отримані для обмоток, намотаних мідною стрічкою 0,1 мм при напрузі на конденсаторі $U_{C1}=200$ В; $C=200$ мкФ. Характеристики на (рис. 5, б) отримані для обмоток, намотаних мідною стрічкою 0,05 мм при напрузі на конденсаторі $U_{C1}=200$ В; $C=100$ мкФ.

Дані експериментальних досліджень власного часу спрацьовування t_{op} макетного зразка ІДР при різних значеннях електричних параметрів розрядного контуру, а саме ємності та початковій зарядній напрузі на конденсаторі, товщині стрічки Δ_s рівній 0,05 мм та 0,1 мм, при різних схемах підключення конденсатора до обмотки розчіплювача, зведені до табл. 1, 2.

Таблиця 1 – Власний час спрацьовування ІДР t_{op} при $U_{C1}=200$ В

U_{C1} , V		200			
C, μ F		100		200	
Δ_s , mm		0,05	0,1	0,05	0,1
t_{op} , ms	аперіодичний	2,51	1,56	2,37	1,38
	коливальний	2,33	1,24	2,15	1,21

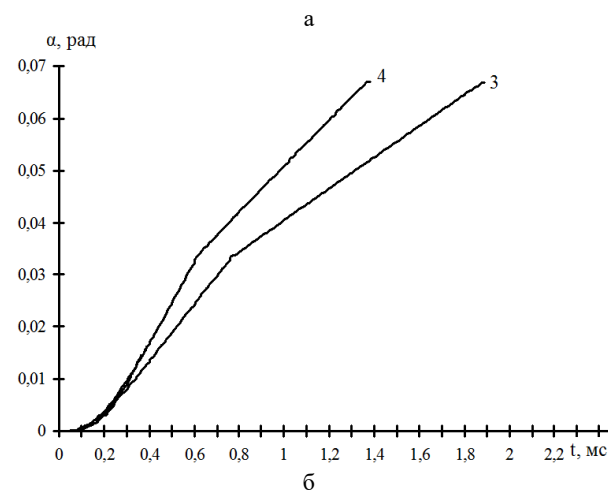
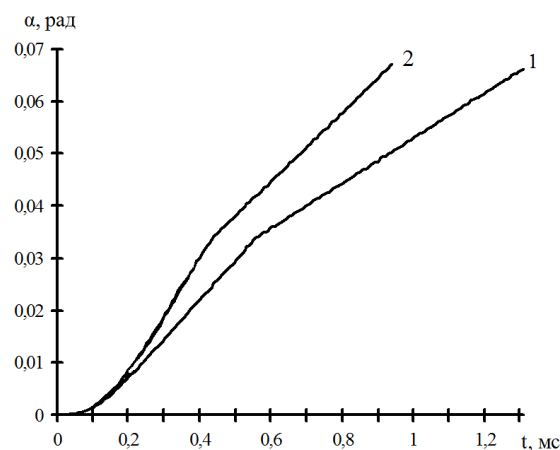


Рис. 5. Вплив товщини стрічки та числа витків обмотки на швидкість ІДР: 1, 3 – 45 витків; 2, 4 – 60 витків; а – напруга $U_{C1}=200$ В; $C=200$ мкФ; б – напруга $U_{C1}=200$ В; $C=100$ мкФ

Таблиця 2 – Власний час спрацьовування ІДР t_{op} при $U_{C2}=300$ В

U_{C2} , V		300			
C, μ F		100		200	
Δ_s , mm		0,05	0,1	0,05	0,1
t_{op} , ms	аперіодичний	1,52	1,17	1,24	0,93
	коливальний	0,97	0,84	0,87	0,72

Зниження індуктивності мережевих реакторів перетворювачів частоти. Індуктивність мережевих реакторів визначається з міркувань зниження теплового впливу струму короткого замикання на напівпровідниковий пристрій за час, необхідний для спрацьовування автоматичного вимикача. При зменшенні часу спрацьовування автоматичного вимикача завдяки заміні електромагнітного розчіплювача на індукційно-динамічний, надається можливість зниження індуктивності мережевих реакторів перетворювачів частоти.

Розглянемо випадок внутрішнього короткого замикання керованого випрямляча. Тиристорний електропривод потужністю 250 кВт ($I_n = 658$ А, $U = 380$ В) підключено до живильного трансформатора 1000 кВА. Усереднені параметри такої мережі: $\omega L_T = 9 \cdot 10^{-3}$ Ом ($L = 28$ мкГн), $R_T = 1,3 \cdot 10^{-3}$ Ом, де ωL_T , R_T – сумарний реактивний та активний опір однієї фази повної схеми заміщення, наведені до вторинної обмотці живильного трансформатора.

При пробі вентилля в одному плечі мосту у момент

комутації вентилів в іншому плечі, утворюється контур двофазного короткого замикання через пробитий вентиль. З погляду величини та тривалості аварійного струму двофазне коротке замикання є найважчим випадком. Завдання захисного апарату полягає в тому, щоб врятувати непошкоджений вентиль в контурі короткого замикання, що утворився.

Для забезпечення надійного захисту напівпровідникового випрямляча автоматичним вимикачем повинна виконуватись умова:

$$\int_0^t i^2 \cdot dt < (i^2 \cdot t)_{\text{доп}}, \quad (3)$$

де t – час дії аварійного струму; i – миттєве значення аварійного струму; $(i^2 \cdot t)_{\text{доп}}$ – допустима перевантажувальна здатність напівпровідникового пристрою.

Аварійний струм у перетворювачі буде розвиватися за наступним законом [6].

$$i_{к.з} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\phi, \max}}{2 \cdot \sqrt{R_T^2 + (\omega \cdot L_T)^2}} \times \left[\sin(\omega \cdot t) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{R_T}{\omega \cdot L_T}(\omega \cdot t - \alpha)} \right], \quad (4)$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{\omega \cdot L_T}{R_T}\right).$$

де $U_{\phi, \max}$ – амплітудне значення фазної напруги.

В якості прикладу розглянемо керований випрямляч на тиристорних модулях типу МТ-320-14 із паспортним значенням допустимого інтегралу Джоуля $I^2t = 720 \cdot 10^3 \text{ A}^2\text{s}$. Індуктивність мережевих реакторів, яка необхідна для того, щоб повний інтеграл відключення автоматичним вимикачем, розрахований за рівнянням (3) та при підстановці в нього рівняння (4), не перевищив паспортного значення тиристорного модуля МТ-320-14 відповідно: для автоматичного вимикача ВА3792 з електромагнітним дистанційним розчіплювачем $L_{\text{мереж}} = 173.4 \text{ мкГн}$; для автоматичного вимикача ВА3792 з ІДР з феромагнітним осердям $L_{\text{мереж}} = 77.6 \text{ мкГн}$.

Висновки. 1. Застосування феромагнітного осердя в конструкції ІДР автоматичного вимикача ВА 3792 дозволило знизити початкову зарядну напругу на конденсаторі в 1,67 раз у порівнянні з конструкцією без феромагнітного осердя.

2. В результаті застосування ІДР з феромагнітним осердям та якоря поворотного типу у вигляді мідного

диску час спрацьовування автоматичного вимикача зменшився в 1,78 раз.

Список літератури

1. Клименко Б.В., Байда Е.И., Серeda А.Г. Применение автоматических выключателей серии А3700 с индукционно-динамическим расцепителем для защиты полупроводниковых преобразователей // Вісник національного технічного університету "ХПІ". – 2001. - №14. – С. 315-322.
2. Bissal A. On the design of ultra-fast electromechanical Actuators. Licentiate thesis, monograph. Electromagnetic Engineering School of Electrical Engineering, Stockholm, Sweden, 2013. 68 p.
3. Клименко Б.В., Байда Е.И., Серeda А.Г. Математическая модель и динамические характеристики электродинамического расцепителя быстродействующего автоматического выключателя // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. №83. Серия "Новые решения в современных технологиях". Харьков, 2000 г. С.71-73.
4. Литвиненко В.В., Лупиков В.С., Серeda А.Г. Качественный анализ влияния ферромагнитного сердечника на величину силы индукционно-динамического привода // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – Вип. 29. – С. 57-64.
5. Литвиненко В.В., Лупиков В.С., Серeda А.Г. Усовершенствованная математическая модель индукционно-динамического привода автоматического выключателя // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2008. – Вип. 40. – С. 66-83.
6. Глух Е.М., Зеленев В.Е. Защита полупроводниковых преобразователей. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоиздат, 1982. - 152 с.

References (transliterated)

1. Klimentko B.V., Bajda E.I., Sereda A.G. Primenenie avtomaticheskikh vyklyuchatelej serii A3700 s indukcionno-dinamicheskim rascepitlem dlya zashchity poluprovodnikovyyh preobrazovatelej. Bulletin NTU "HPI". 2001. No 14. Pp. 315-322.
2. Bissal A. On the design of ultra-fast electromechanical Actuators. Licentiate thesis, monograph. Electromagnetic Engineering School of Electrical Engineering, Stockholm, Sweden, 2013. 68 p.
3. Klimentko B.V., Bajda E.I., Sereda A.G. Matematicheskaya model' i dinamicheskie harakteristiki elektrodinamicheskogo rascepitya bystrodeystvuyushchego avtomaticheskogo vyklyuchatelya. Vestnik Har'kovskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. №83. Seriya "Novye resheniya v sovremennyh tekhnologiyah". Har'kov, 2000 g. Pp.71-73.
4. Litvinenko V.V., Lupikov V.S., Sereda A.G. Kachestvennyj analiz vliyaniya ferromagnitnogo serdechnika na velichinu sily indukcionno-dinamicheskogo privoda. Bulletin NTU "HPI". Kharkiv: NTU "HPI". 2010. Vol. 29. – Pp. 57-64.
5. Litvinenko V.V., Lupikov V.S., Sereda A.G. Usovershenstvovannaya matematicheskaya model' indukcionno-dinamicheskogo privoda avtomaticheskogo vyklyuchatelya. Bulletin NTU "HPI". – Kharkiv: NTU "HPI". 2008. Vol 40. Pp. 66-83.
6. Gluh E.M., Zelenov V.E. Zashchita poluprovodnikovyyh preobrazovatelej. 2-e izd., pererab. i dop. Moscow: Energoizdat, 1982. 152 p.

Надійшла (received) 12.10.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Литвиненко Вікторія Володимирівна (Литвиненко Виктория Владимировна, Lytvunenko Viktoriia Vladimirovna) – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", старший викладач кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; e-mail: yikalitv21082@gmail.com

Серeda Олександр Григорійович (Серeda Александр Григорьевич, Sereda Alexander Grigorievich) – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професор кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; e-mail: o.g.sereda@gmail.com

Варшимова Ірина Сергіївна (Варшимова Ирина Сергеевна, Varshamova Iryna Serhiivna) – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; e-mail: varshamova.i.s@gmail.com

Король Олена Геннадіївна (Король Елена Геннадьевна, Korol' Olena Hennadiivna) – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; e-mail: korolelgn@gmail.com

М.Г. ПАНТЕЛЯТ, А.О. КУЗЬМІН

МУЛЬТИФИЗИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСІВ У ЕЛЕКТРОМАГНІТАХ І АКТУАТОРАХ ВАКУУМНИХ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ З УРАХУВАННЯМ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

У статті запропонована удосконалена методика мультифізичного комп'ютерного моделювання зв'язаних процесів у конструктивних елементах вакуумних комутаційних апаратів середньої та високої напруги з урахуванням контактних явищ. У конструкціях сучасних вакуумних автоматичних вимикачів і контакторів спостерігається значне використання електромагнітних актуаторів на основі висококоерцитивних магнітотвердих рідкоземельних композиційних матеріалів NdFeB і SmCo. Найбільш перспективними для використання в якості приводів автоматичних вимикачів і контакторів є поляризовані електромагніти на основі використання зазначених висококоерцитивних постійних магнітів. Однак існуючі серійні конструкції електромагнітів і актуаторів необхідно суттєво вдосконалити з метою підвищення надійності і терміну експлуатації, зниження масогабаритних і вартісних показників, подальшого зниження енергоспоживання, вдосконалення технологічності процесу масового виробництва. Комп'ютерне моделювання запропоновано виконувати методом скінченних елементів у двовимірній постановці з використанням комерційних програмних продуктів і (або) програмного забезпечення, створеного безпосередньо для проведення зазначених досліджень. Одним із пріоритетних напрямків удосконалення математичних моделей і алгоритмів комп'ютерного моделювання процесів у механічному колі вакуумних комутаційних апаратів середньої та високої напруги є врахування контактної взаємодії конструктивних елементів апаратів, що розглядаються. Наступним кроком, завдяки використанню вдосконаленої математичної моделі, є виконання комплексу розрахункових досліджень і на основі отриманих чисельних результатів розробка рекомендацій, спрямованих на створення конструкцій електромагнітів і актуаторів, які б відповідали світовим стандартам і були конкурентоспроможними на світовому ринку.

Ключові слова: Вакуумний автоматичний вимикач, вакуумний контактор, електромагнітний актуатор, математична модель, контактна взаємодія, розрахунок.

М.Г. ПАНТЕЛЯТ, А.А. КУЗЬМИН

МУЛЬТИФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТАХ И АКТУАТОРАХ ВАКУУМНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ КОНТАКТНОГО ВЗАЕМОДЕЙСТВИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В статье предложена усовершенствованная методика мультифизического компьютерного моделирования связанных процессов в конструктивных элементах вакуумных коммутационных аппаратов среднего и высокого напряжения с учетом контактных явлений. В конструкциях современных вакуумных выключателей и контакторов наблюдается значительное использование электромагнитных актуаторов на основе высококоэрцитивных магнитотвердых редкоземельных композиционных материалов NdFeB и SmCo. Наиболее перспективными для использования в качестве приводов автоматических выключателей и контакторов являются поляризованные электромагниты на основе использования указанных высококоэрцитивных постоянных магнитов. Однако существующие серийные конструкции электромагнитов и актуаторов необходимо существенно усовершенствовать с целью повышения надежности и срока эксплуатации, снижения массогабаритных и стоимостных показателей, дальнейшего снижения энергопотребления, совершенствования технологичности процесса массового производства. Компьютерное моделирование предложено выполнять методом конечных элементов в двухмерной постановке с использованием коммерческих программных продуктов и (или) программного обеспечения, созданного непосредственно для проведения указанных исследований. Одним из приоритетных направлений совершенствования математических моделей и алгоритмов компьютерного моделирования процессов в механической цепи вакуумных коммутационных аппаратов среднего и высокого напряжения является учет контактного взаимодействия конструктивных элементов рассматриваемых аппаратов. Следующим шагом, благодаря использованию усовершенствованной математической модели, является выполнение комплекса расчетных исследований и на основе полученных численных результатов разработка рекомендаций, направленных на создание конструкций электромагнитов и актуаторов, соответствующих мировым стандартам конкурентоспособных на мировом рынке.

Ключевые слова: вакуумный автоматический выключатель, вакуумный контактор, электромагнитный актуатор, математическая модель, контактное взаимодействие, расчет.

M.G. PANTELYAT, A.O. KUZMIN

A MULTIPHYSICS MODEL OF PROCESSES IN ELECTROMAGNETS AND ACTUATORS OF VACUUM SWITCHING DEVICES TAKING INTO ACCOUNT CONTACT INTERACTION OF STRUCTURAL ELEMENTS

The purpose of the work is to improve mathematical models and algorithms of computer modelling of multiphysics processes in electromagnets and actuators of vacuum switching devices by taking into account the contact interaction of structural elements when changing their stress-strain state. In the design of modern vacuum circuit breakers and contactors there is a significant use of electromagnetic actuators based on high-coercive hard magnetic rare earth composite materials NdFeB and SmCo. The most promising for use as drives of circuit breakers and contactors are polarized electromagnets based on the use of these high-coercive permanent magnets. However, the existing serial designs of electromagnets and actuators need to be significantly improved in order to increase reliability and service life, reduce weight and cost, further reduce energy consumption, improve the manufacturability of the mass production process. Computer simulation is proposed to be performed by the Finite Element Method in 2D formulation using commercial software products and/or software created directly for these investigations. One of the priority areas for improving mathematical models and algorithms for computer modelling of processes in the mechanical circuit of vacuum switching devices of medium and high voltage is to take into account the contact interaction of the structural elements of the devices under consideration. The next step, thanks to the use of an advanced mathematical model, is to perform a set of computational research and based on the obtained numerical results to develop recommendations aimed at creating designs of electromagnets and actuators that would meet world standards and be competitive in the world market.

Keywords: vacuum circuit breaker, vacuum contactor, electromagnetic actuator, mathematical model, contact interaction, calculation.

Вступ. Вакуумні автоматичні вимикачі для мереж середньої та високої напруги займають домінуючі позиції у відповідному сегменті ринку комутаційних апаратів, а в сегменті ринку контакторів середніх напруг частка вакуумних апаратів перевищує 90% [1-3]. Такий перерозподіл ринку обумовлено унікальними ізоляційними і дугогасними властивостями вакууму, а також успіхами в розвитку вакуумної комутаційної техніки останнім часом.

В конструкціях сучасних вакуумних автоматичних вимикачів і контакторів знайшли широке застосування електромагнітні актуатори на основі висококоерцитивних магнітотвердих рідкоземельних композиційних матеріалів NdFeB і SmCo. Аналіз різноманітних конструктивних рішень актуаторів [1, 2, 4] свідчить про те, що найбільш перспективними в якості приводів автоматичних вимикачів і контакторів є поляризовані електромагніти на основі використання зазначених висококоерцитивних постійних магнітів. У поєднанні з мікропроцесорними системами управління та електролітичними конденсаторами це дозволяє створити вакуумні комутаційні апарати з електромагнітними приводами, які можуть забезпечувати необхідні силові характеристики, практично не споживаючи при цьому енергію від зовнішніх джерел після виконання операцій вмикання і вимикання.

У той же час, як показує виконаний аналіз [1, 2, 4], існуючі серійні конструкції електромагнітів і актуаторів потребують суттєвого вдосконалення, спрямованого на підвищення надійності і терміну експлуатації, зниження масогабаритних і вартісних показників, подальше зниження енергоспоживання, вдосконалення технологічності процесу масового виробництва.

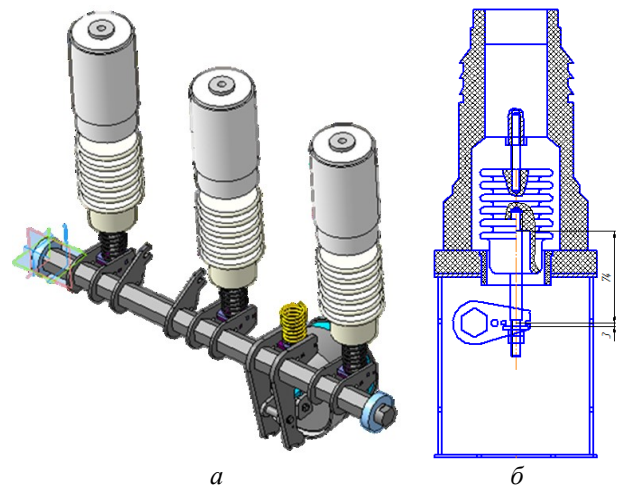
Для досягнення цієї мети потрібно вдосконалити розроблені раніше [1, 2, 4] математичні моделі мультифізичних процесів, що мають місце в електромагнітах і актуаторах з висококоерцитивними постійними магнітами, на базі рівнянь електромагнітного поля, рівнянь руху та теорії пружності з урахуванням нелінійних процесів в електричному і механічному колах вакуумних комутаційних апаратів середньої та високої напруги. Далі, з використанням вдосконаленої моделі потрібно виконати комплекс розрахункових досліджень і на основі отриманих чисельних результатів розробити рекомендації, спрямовані на створення конструкцій електромагнітів і актуаторів, які б відповідали світовим стандартам і були конкурентоспроможними на світовому ринку.

Одним із доцільних напрямків удосконалення математичних моделей і алгоритмів комп'ютерного моделювання процесів у механічному колі вакуумних комутаційних апаратів середньої та високої напруги є врахування контактної взаємодії конструктивних елементів апаратів, що розглядаються. З цією метою, розроблені та апробовані [1, 2, 4] математичні моделі мультифізичних процесів, що мають місце в електромагнітах і актуаторах з висококоерцитивними постійними магнітами, на базі рівнянь електромагнітного поля, рівнянь руху та теорії пружності, потрібно доповнити сучасними підходами до чисельного розв'язання контактних задач з використанням методу скінченних елементів [5-7].

Таким чином, **мета роботи** – удосконалення мате-

матичних моделей і алгоритмів комп'ютерного моделювання мультифізичних процесів у електромагнітах і актуаторах вакуумних комутаційних апаратів шляхом урахування контактної взаємодії конструктивних елементів при зміні їх напружено-деформованого стану.

Деякі приклади конструктивних елементів вакуумних комутаційних апаратів, що розглядаються, наведені на рис. 1 [2].



a – 3D модель з'єднання вакуумних переривників контактора з механічною системою та моностабільним поляризованим електромагнітом; *б* – креслення положення тяги контактної пружини у вимкненому та ввмкненому стані вакуумного контактора

Рис. 1. Приклади конструктивних елементів комутаційних апаратів, що розглядаються [2]

Математична модель електромагнітних процесів. Розподіл нестационарного електромагнітного поля у просторі та часі у загальному випадку описується системою рівнянь Максвелла у диференційній формі [1, 8, 9]. Оскільки у вакуумних комутаційних апаратах струми зсуву відсутні, потрібно розв'язувати наступну підсистему рівнянь Максвелла з урахуванням лише струмів провідності [1, 8, 9]:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \mathbf{J}; \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; \\ \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

де \mathbf{H} – вектор напруженості магнітного поля; \mathbf{B} – вектор індукції магнітного поля; \mathbf{E} – вектор напруженості електричного поля; \mathbf{J} – вектор щільності струмів провідності.

Система рівнянь (1) доповнюється так званими матеріальними рівняннями, які визначають електрофізичні властивості матеріалів [1, 8, 9]:

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H}; \\ \mathbf{J} &= \gamma \mathbf{E}, \end{aligned} \quad (2)$$

де μ – магнітна проникність матеріалу; γ – питома електрична провідність матеріалу.

У [1] наведена система рівнянь, отримана з (1), (2) з урахуванням наступних особливостей конструкцій електромагнітів і актуаторів вакуумних комутаційних апаратів:

– наявність постійних магнітів у конструкціях, що розглядаються;

– рух середовища, в якому розраховується електромагнітне поле.

Комп'ютерне моделювання розподілу електромагнітного поля конструктивних елементів вакуумних комутаційних апаратів доцільно розпочати у циліндричній системі координат у двовимірній вісьосиметричній постановці (значно більш складна тривимірна постановка та відповідне програмне забезпечення можуть бути використані пізніше для уточнення отриманих результатів). Розрахунок електромагнітного поля доцільно виконувати з використанням векторного магнітного потенціалу A , який визначається виразом [1, 8, 9]

$$\mathbf{B} = \text{rot } A \quad (3)$$

та на відміну від векторів \mathbf{H} і \mathbf{B} має лише одну (а не дві) просторову компоненту $A(r, z, t) = A_\varphi(r, z, t)$. При цьому робиться припущення, що вектор щільності струмів провідності \mathbf{J} також має лише одну відповідну компоненту.

Відповідні рівняння, що описують розподіл $A(r, z, t) = A_\varphi(r, z, t)$ у просторі та у часі, розв'язуються чисельно методом скінченних елементів з відповідними початковими та граничними умовами [1].

Розрахунок напружено-деформівного стану конструктивних елементів. Розрахунок пружного напружено-деформівного стану виконується шляхом розв'язання рівнянь теорії пружності у вигляді рівнянь Ляме [10]

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \cdot \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} + \mu \cdot \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F} - K \cdot \nabla \cdot T, \quad (4)$$

де ρ – щільність матеріалу; \mathbf{u} – вектор переміщень; λ , μ – коефіцієнти Ляме; \mathbf{F} – вектор об'ємних сил (у тому числі, електромагнітні сили, що прикладені до елемента конструкції та змінюються у часі);

$K = \frac{\alpha \cdot E}{1 - 2 \cdot \nu}$ – коефіцієнт, що враховує зміну об'ємних сил у випадку нагрівання; ν – коефіцієнт Пуассона; E – модуль пружності; α – коефіцієнт об'ємного розширення матеріалу.

Рівняння (4) в загальному випадку описує хвильові механічні процеси в твердих тілах. Оскільки процес пружного деформування конструкцій, що розглядаються в статті, є квазістатичним, рівняння (4) розв'язується у спрощеній формі, наведеній у [1, 10].

Можливий також альтернативний запис математичної моделі напружено-деформівного стану з використанням рівнянь у тензорній формі [6, 10]

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,i} + f_j &= 0, \\ \varepsilon_{ij} &= \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1 + \nu} (\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1 - 2\nu} \delta_{ij} e),$$

де σ_{ij} – тензор механічних напруг; ε_{ij} – тензор механічних деформацій; \mathbf{u} – вектор переміщень; \mathbf{f}_i – вектор об'ємних сил; ν – коефіцієнт Пуассона; E – модуль пружності; δ_{ij} – дельта-функція Кронеккера; $e = \varepsilon_{kk}$.

Більш детальний опис зазначеного варіанта математичної моделі напружено-деформівного стану наведено в [6, 10].

Комп'ютерне моделювання контактної взаємодії конструктивних елементів. Урахування контактної взаємодії конструктивних елементів при зміні їх напружено-деформівного стану пропонується виконати шляхом використання відповідних математичних моделей та чисельних алгоритмів на основі метода скінченних елементів, реалізованих у [7] або детально описаних у [5, 6]. Важливо підкреслити, що зазначені методи орієнтовані також на розв'язання термоконтактних задач, тобто дозволяють комп'ютерне моделювання процесів нестационарного теплообміну в зонах механічного контакту [1, 5, 6].

Особливістю підходу, запропонованого в [5], є використання для розв'язання двовимірних задач спеціального одновимірного скінченного елемента, який не має товщини. Відмінною рисою та перевагою цього скінченного елемента є те, що він при наявності тертя "відстежує" історію навантаження, тобто момент (крок за часом) вступу точки, що розглядається, в контакт, і напрямок її прослизання. На рис. 2, 3 наведена графічна інформація [5, 6], що дає загальне уявлення стосовно особливостей та складності методики.

Вибір метода врахування контактної взаємодії конструктивних елементів буде зроблено в процесі безпосереднього проведення чисельних розрахунків.

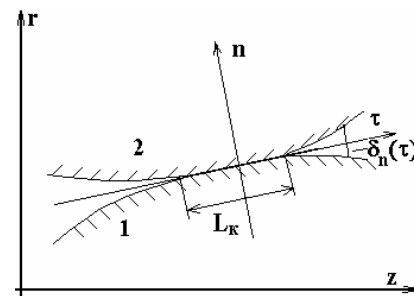


Рис. 2. Довжина контакту L_k і зазор δ_n між тілами 1 і 2, що контактують [5]

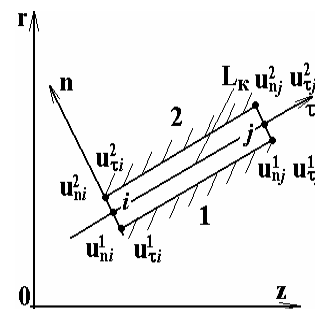


Рис. 3. Вузлові переміщення контактної поверхні [5]

Мультифізичне комп'ютерне моделювання зв'язаних процесів у конструктивних елементах комутаційних апаратів пропонується виконувати методом скінченних елементів на основі алгоритмів, розроблених і детально викладених у [1, 11], із доданням чисельного аналізу контактних явищ. Слідуючи [1, 11], доцільним може бути також розв'язання рівнянь теплопровідності та моделювання процесів у відповідних електричних ланцюгах і електронних схемах керування.

Висновки. Запропонована удосконалена методика мультифізичного комп'ютерного моделювання зв'язаних процесів у конструктивних елементах ваку-

умних комутаційних апаратів середньої та високої напруги з урахуванням контактних явищ. Чисельні розрахунки доцільно виконувати методом скінченних елементів у двовимірній постановці з використанням комерційних програмних продуктів і (або) програмного забезпечення, створеного безпосередньо для проведення зазначених досліджень.

Список літератури:

1. Байда Є.І. *Мультифізичні моделі високовольтних вакуумних вимикачів з бістабільними поляризованими актуаторами в динамічних режимах: дис... докт. техн. наук: 05.09.01.* Харків, 2018. 376 с.
2. Лелюк М.А. *Удосконалення вакуумних контакторів з мого стабільними поляризованими електромагнітами: дис... канд. техн. наук: 05.09.01.* Харків, 2019. 229 с.
3. <https://new.siemens.com>
4. Baida E.I., Klymenko B.V., Vyrovets S.V., Pantelyat M.G., Clemens M. Investigations of the dynamics of a bistable electromagnet with improved characteristics for medium voltage vacuum circuit breakers // *Electrical engineering & electromechanics*. 2020. № 3. С. 3-8. doi: 10.20998/2074-272X.2020.3.01.
5. Гармаш Н.Г. *Двумерный конечноэлементный анализ контактных задач с учетом теплообмена: дис... канд. техн. наук: 01.02.04.* Харьков, 1999. 163 с.
6. Pantelyat M.G., Doležel I. Finite element technique for solution of thermo-contact problems and its application in numerical analysis of devices working with induction heating // *Electrical engineering & electromechanics*. 2016. № 4. С. 22-27. doi: 10.20998/2074-272X.2016.4.03.
7. <https://www.comsol.ru/video/mechanical-and-thermal-contacts-in-comsol-multiphysics-webinar-ru>.
8. Демирчян К.С. Моделирование магнитных полей. Ленинград: Энергия, 1974. 288 с.
9. Bíró O., Preis K. On the use of the magnetic vector potential in the finite element analysis of three-dimensional eddy currents // *IEEE Transactions on Magnetism*. 1989, v. 25, No. 4. pp. 3145–3159. doi: 10.1109/20.34338.
10. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. Москва: Наука, 1979. 560 с.
11. Abba F., Rachek M. Time-stepping FEM-based multi-level coupling of magnetic field-electric circuit and mechanical structural deformation models dedicated to the analysis of electromagnetic actuators // *Actuators*. 2019, v. 8, No. 22. pp. 1-28. doi:10.3390/act8010022.

References (transliterated):

1. Baida E.I. *Multyfizychni modeli vysokovoltnykh vakuumnykh vynykachiv z bistabilnyimi poliaryzovanyimi aktuatoramy v dynamichnykh rezhymakh: dis. ... d-ra tekhn. nauk 05.09.01* [Multiphysical models of high-voltage vacuum circuit breakers with stable polarized actuators in dynamic modes. Dr. eng. sci. diss.]. Kharkiv, 2018. 376 p.
2. Leliuk M.A. *Udoskonaennia vakuumnykh kontaktoriv z moho stabilnyimi poliaryzovanyimi elektromagnitamy: dis. ... kand. tekhn. nauk 05.09.01* [Improving vacuum contactors with monostable polarized electromagnets. Candidate eng. sci. diss. (Ph. D.)]. Kharkiv, 2019. 229 p.
3. <https://new.siemens.com>
4. Baida E.I., Klymenko B.V., Vyrovets S.V., Pantelyat M.G., Clemens M. Investigations of the dynamics of a bistable electromagnet with improved characteristics for medium voltage vacuum circuit breakers. *Electrical engineering & electromechanics*. 2020, no. 3, pp. 3-8. doi: 10.20998/2074-272X.2020.3.01.
5. Garmash N.G. *Dvumernyy konechnoelementnyy analiz kontaktnykh zadach s uchetom teploobmena: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Two-dimensional finite element analysis of contact problems taking into account heat transfer. Candidate eng. sci. diss. (Ph. D.)]. Kharkiv, 1999. 163 p.
6. Pantelyat M.G., Doležel I. Finite element technique for solution of thermo-contact problems and its application in numerical analysis of devices working with induction heating. *Electrical engineering & electromechanics*. 2016. No. 4. pp. 22-27. doi: 10.20998/2074-272X.2016.4.03.
7. <https://www.comsol.ru/video/mechanical-and-thermal-contacts-in-comsol-multiphysics-webinar-ru>
8. Demirchyan K.S. *Modelirovanie magnitnykh polej* [Modelling of magnetic fields]. Leningrad: Energy, 1974. 288 p.
9. Bíró O., Preis K. On the use of the magnetic vector potential in the finite element analysis of three-dimensional eddy currents. *IEEE Transactions on Magnetism*. 1989, v. 25, No. 4. Pp. 3145–3159. doi: 10.1109/20.34338.
10. Timoshenko S.P., Goodier J. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow: Nauka, 1979. 560 p.
11. Abba F., Rachek M. Time-stepping FEM-based multi-level coupling of magnetic field-electric circuit and mechanical structural deformation models dedicated to the analysis of electromagnetic actuators. *Actuators*. 2019, v. 8, No. 22. pp. 1-28. doi:10.3390/act8010022.

Поступила (received) 15.09.21

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Пантеліят Михайло Гаррїйович (Пантеліят Михаил Гаррїевич, Panteliat Mykhailo Garrijovich) – кандидат фізико-математичних наук, старший дослідник, 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.

Кузьмін Артем Олексійович (Кузьмин Артем Алексеевич, Kuzmin Artem Oleksijovich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант, кафедра електричних апаратів; м. Харків, Україна; e-mail: artyukozmi@gmail.com.

Ю.М. ВАСЬКОВСЬКИЙ, О.А. ГЕРАСКІН, К.М. ТАТАРИНОВ

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ УШКОДЖЕННЯ ДЕМПФЕРНОЇ СИСТЕМИ РОТОРА СИНХРОННИХ МАШИН

Методами математичного моделювання досліджені фізичні процеси в демпферній системі ротора при появі статичного ексцентриситета ротора для двох типів явнополюсних синхронних машин - капсульного гідрогенератора SGK 538/160-70М потужністю 22 МВт і синхронного генератора потужністю 500 кВт. Розроблено польову математичну модель, що враховує спільну дію трьох фізичних полів різної природи: електромагнітного, температурного та поля термомеханічних напружень, і дозволяє оцінити нагрів і тривимірний розподіл термомеханічних напружень в елементах конструкції демпферної системи ротора явнополюсної синхронної машини. Зазначені фізичні процеси викликають поступову руйнацію конструкції демпферної системи ротора. Доведено, що першопричиною процесів деградації і ушкодження демпферної системи ротора явнополюсної синхронної машини є нерівномірність розподілу індукованих струмів в стрижнях на полюсах ротора, яка виникає при роботі машини в асинхронному режимі або при появі статичного ексцентриситета ротора. Найбільші за величиною індуковані струми і нагрів виникають в стрижнях, що розташовані на краях полюсних наконечників, у той час коли центральні стрижні на полюсі нагріваються суттєво менше. Такий несиметричний нагрів демпферної системи ротора призводить до значних термомеханічних напружень в елементах демпферної системи ротора, які суттєво залежать від величини ексцентриситета і ковзання ротора в асинхронному режимі. На величину сумарних термомеханічних напружень в стрижнях впливають не тільки аксіально направлені сили, але й поперечні сили в торцевих короткозамикаючих елементах. При значних ковзаннях і ексцентриситеті виникають неприпустимо великі зламні зусилля, які розривають стрижні і торцеві короткозамикаючі елементи демпферної системи ротора. За результатами аналізу визначено нагрів і термомеханічні напруження елементів конструкції й надано рекомендації щодо її конструктивного удосконалення.

Ключові слова: явнополюсна синхронна машина, демпферна система ротора, статичний ексцентриситет ротора, температура, термомеханічні напруження і деформації.

Ю. Н. ВАСЬКОВСКИЙ, А. А. ГЕРАСКИН, К. М. ТАТАРИНОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОВРЕЖДЕНИЯ ДЕМПФЕРНОЙ СИСТЕМЫ РОТОРА СИНХРОННЫХ МАШИН

Методами математического моделирования исследованы физические процессы в демпферной системе ротора при появлении статического эксцентриситета ротора для двух типов явнополюсных синхронных машин - капсульного гидрогенератора SGK 538/160-70М мощностью 22 МВт и синхронного генератора мощностью 500 кВт. Разработана полевая математическая модель, учитывающая совместное действие трех физических полей различной природы: электромагнитного, температурного и поля термомеханических напряжений, и позволяет оценить нагрев и трехмерное распределение термомеханических напряжений в элементах конструкции демпферной системы ротора явнополюсной синхронной машины. Указанные физические процессы вызывают постепенное разрушение конструкции демпферной системы ротора. Доказано, что первопричиной процессов деградации и повреждения демпферной системы ротора явнополюсной синхронной машины является неравномерность распределения индуцированных токов в стержнях на полюсах ротора, которая возникает при работе машины в асинхронном режиме или при появлении статического эксцентриситета ротора. Наибольшие по величине индуцированные токи и нагрев возникают в стержнях, расположенных на краях полюсных наконечников, в то время как центральные стержни на полюсе нагреваются существенно меньше. Такой несимметричный нагрев демпферной системы ротора приводит к значительным термомеханическим напряжениям в элементах демпферной системы ротора, которые существенно зависят от величины эксцентриситета и скольжения ротора в асинхронном режиме. На величину суммарных термомеханических напряжений в стержнях влияют не только аксиально направлены силы, но и поперечные силы в торцевых короткозамыкающих элементах. При значительных скольжениях и эксцентриситете возникают недопустимо большие слывающие усилия, которые разрывают стержни и торцевые короткозамыкающие элементы демпферной системы ротора. По результатам анализа определены нагрев и термомеханические напряжения элементов конструкции и даны рекомендации по ее конструктивному усовершенствованию.

Ключевые слова: явнополюсная синхронная машина, демпферная система ротора, статический эксцентриситет ротора, температура, термомеханические напряжения и деформации.

Yu. N. VASKOVSKIY, A. A. GERASKIN, K. M. TATARINOV

RESEARCH OF DAMPER SYSTEM DAMAGE PHYSICAL PROCESSES OF SYNCHRONOUS MACHINES ROTOR

The physical processes in the damper system of the rotor with the appearance of a static eccentricity of the rotor for two types of salient-pole synchronous machines - a capsule hydrogenator SGK 538/160-70M with a capacity of 22 MW and a synchronous generator with a capacity of 500 kW were investigated by means of mathematical modeling. A field mathematical model has been developed that takes into account the combined action of three physical fields of different nature: electromagnetic, temperature and field of thermomechanical stresses, and makes it possible to evaluate the heating and three-dimensional distribution of thermomechanical stresses in the structural elements of the rotor damper system of a salient-pole synchronous machine. These physical processes cause gradual destruction of the structure of the rotor damper system. It is proved that the primary cause of degradation and damage of the damping system of the rotor of an open-pole synchronous machine is the uneven distribution of induced currents in the rods at the poles of the rotor, which occurs when the machine works asynchronously or with the appearance of rotor static eccentricity. The largest induced currents and heat occur in the rods located at the edges of the pole pieces, while the central rods at the pole are heated significantly less. This asymmetric heating of the damping system of the rotor leads to significant thermomechanical stresses in the elements of the damping system of the rotor, which significantly depend on the magnitude of the eccentricity and slipperiness of the rotor in asynchronous mode. The magnitude of the total thermomechanical stresses in the rods is influenced not only by axially directed forces, but also by transverse forces in the end short-circuiting elements. At considerable slipperiness and eccentricities there are inadmissibly big breaking forces which break cores and face short-circuiting elements of a damping system of a rotor. According to the results of the analysis, the heating and thermomechanical stresses of the structural elements were determined and recommendations for its structural improvement were given.

© Ю. М. Васьковський, О. А. Гераскін, К. М. Татарінов, 2021

Keywords: salient-pole synchronous machine, rotor damper system, static eccentricity of the rotor, temperature, thermomechanical stress and deformation.

Вступ. Демпферна система ротора (ДСР) явнополюсної синхронної машини (ЯСМ) виконує важливі експлуатаційні функції щодо утримання ротора ЯСМ в синхронному режимі роботи при виникненні раптових зовнішніх збурень. Зокрема, ДСР ефективно гасить коливання швидкості ротора, що виникають внаслідок зовнішніх збурень, а також може забезпечувати короткочасну роботу ЯСМ в асинхронному режимі при випаданні її ротора з синхронізму.

Вважається, що конструкція ДСР є досить простою і при правильному виборі параметрів струменосучих стрижнів характеризується в межах встановлених заводом-виробником гарантійних термінів експлуатації високою надійністю. Але при подальшій експлуатації ЯСМ внаслідок поступової деградації конструкції машини на практиці спостерігається суттєве збільшення кількості випадків ушкоджень і навіть руйнації ДСР, що призводить до раптових аварійних зупинок машини [1]. Особливо це характерно для потужних ЯСМ – гідрогенераторів, автономних потужних синхронних генераторів тощо. З огляду на старіння існуючого парку потужних синхронних машин, які, однак, ще тривалий час будуть знаходитися в експлуатації, зазначена проблема набуває важливого практичного значення, потребує системного дослідження і розробки рекомендацій щодо удосконалення ДСР.

В ряді досліджень [2-4] встановлено, що однією з головних причин ушкоджень ДСР є поява статичного ексцентриситета (СЕ) ротора ЯСМ, при якому відбувається зсув повздожніх вісей статора і ротора і, як наслідок, поява нерівномірності повітряного проміжку між статором і ротором уздовж кола розточки статора. СЕ є небажаною, але характерною для тихохідних ЯСМ деградацією конструкції, оскільки ЯСМ, зазвичай, мають великий діаметр ротора і відносно невелику висоту повітряного проміжку. Очевидно, що необхідно застосовувати методи поточного контролю рівномірності повітряного проміжку, але досвід експлуатації ЯСМ свідчить про складність забезпечення такої рівномірності.

Суть фізичних процесів, які відбуваються в ЯСМ при появі СЕ, полягає у наступному [2]. При обертанні ротора ЯСМ в нерівномірному повітряному проміжку в кожному з полюсів ротора виникають пульсації основного магнітного потоку, які індукують в ДСР струми, оскільки пульсуючий магнітний потік полюса безпосередньо зіплюється з площиною ДСР. Ці струми не пов'язані з асинхронним рухом або коливаннями швидкості ротора, обумовлені лише появою СЕ і під час експлуатації машини протікають постійно, викликаючи нагрів елементів ДСР. Причому розподіл струмів в стрижнях ДСР і їх нагрів є суттєво нерівномірним, що призводить до появи значних несиметричних термомеханічних напружень і деформацій в ДСР. І, хоча ці напруження можуть і не перевищувати меж міцності конструктивних матеріалів, але внаслідок частих пусків і зупинок ЯСМ відбувається поступова втома матеріалів, що призводить до дегра-

дації і подальшої руйнації ДСР. На рис. 1, як приклад, показано ушкодження ДСР капсульного гідрогенератора типу СГК 538/160–70М. На рис. 1 а) зображено вид ушкодженого полюса з боку торцевого короткозамикаючого елемента, який відірвався від стрижнів; на рис 1 б) зображено вид поверхні ушкодженого полюса, який внаслідок появи СЕ при обертанні ротора, торкався поверхні осердя статора.

Таким чином, дослідження фізичних процесів, які призводять до руйнації ДСР ЯСМ, є актуальною проблемою, а результати таких досліджень дозволяють обґрунтовано розробляти технічні рішення щодо удосконалення конструкцій ДСР в умовах експлуатації ЯСМ з наявним СЕ ротора.

Метою роботи є дослідження методами математичного моделювання та узагальнення особливостей термомеханічних процесів в ДСР ЯСМ, яка експлуатується при наявності СЕ ротора.

Об'єкти дослідження. Дослідження проводилися на прикладі двох суттєво різних ЯСМ:

1) капсульного гідрогенератора СГК 538/160–70М, потужністю 22 МВт який має дані: лінійна напруга і фазний струм обмотки статора – 6,3 кВ і 2070 А; $\cos\varphi = 0,974$; ККД = 96,1%; напруга і струм обмотки ротора – 390 В і 1040 А відповідно; кількість полюсів – 70; частота обертання – 85,7 об/хв; на кожному полюсі ротора розташовано 3 мідних стрижня діаметром 17,5 мм; між стрижнями на різних полюсах ротора встановлено міжполюсні електричні з'єднання; довжина ротора 1,6 м; повітряний проміжок під серединою полюса $\delta=6$ мм.

2) синхронного генератора СГ-500 потужністю 500 кВт, який використовується на малих гідроелектростанціях і має наступні номінальні дані: лінійна напруга і фазний струм обмотки статора $U_1=6$ кВ і $I_1=57$ А; $\cos\varphi = 0,9$; ККД $\eta=94$ %; напруга і струм обмотки ротора – 65 В і 320 А відповідно; кількість полюсів – 12; частота обертання – 500 об/хв; повітряний проміжок – 2,7 мм; довжина ротора – 0,35 м.

Математична модель враховує спільну дію фізичних полів різної природи: електромагнітного, температурного і поля термомеханічних напружень.

Електромагнітне поле в сталому режимі роботи в межах поперечного перерізу ЯСМ в декартових координатах відносно комплексної амплітуди осьової складової векторного магнітного потенціалу описується квазістационарним рівнянням:

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu}\operatorname{rot}\dot{A}_z\right)-j\omega_1 s \gamma \dot{A}_z = -\dot{J}_{z\text{cm}}, \quad (1)$$

де $\omega_1 = 2\pi f_1$ – кутова частота струму статора, s – ковзання ротора, μ – магнітна проникність, γ – електропровідність, $J_{z\text{cm}}$ – густина сторонніх струмів (в пазах статора і обмотці збудження). Рівняння (1) доповнюється однорідними граничними умовами першого роду $A_z|_G=0$ на лінії G зовнішньої поверхні яра статора і дозволяє розрахувати поле машини в асинхронному і синхронному режимах роботи.



а



б

Рис. 1. Ушкодження, що мали місце при експлуатації капсульного гідрогенератора типу СГК 538/160–70М

Для чисельного розв'язання рівняння (1) використовується метод багатопозиційних розрахунків. Для обраного інтервалу часу T , на якому аналізується електромагнітний процес, обирається крок по часу Δt і виконується серія розв'язків рівняння (1) поля з урахуванням зміни кутового положення ротора і величин струмів фаз статора, які відбуваються за час Δt . Тобто, при кожному з положень ротора розраховується сталий гармонійний електромагнітний процес. Після розрахунків достатньої кількості окремих задач при різних положеннях ротора і різних значеннях струму статора та їх об'єднання отримують шукані залежності як функції часу. Згідно зазначеного методу розрахунку для кожного поточного моменту часу $t_k = 0 \dots T$ в межах сформованої геометрії розрахункової області рівняння (1) розв'язується при відповідних цьому моменту часу величинах густини струмів фаз статора, які визначаються за формулами:

$$\begin{aligned} \dot{J}_{Acm} &= J_m \cos \alpha_k, \\ \dot{J}_{Bcm} &= J_m \left[\cos(\alpha_k + 2\pi/3) + j \sin(\alpha_k + 2\pi/3) \right], \\ \dot{J}_{Ccm} &= J_m \left[\cos(\alpha_k + 4\pi/3) + j \sin(\alpha_k + 4\pi/3) \right], \end{aligned} \quad (2)$$

де $J_m = I_m u_{\Pi\Pi} / S_{\Pi\Pi}$ – амплітуда густини струму у фазах обмотки статора, $u_{\Pi\Pi}$ – число послідовно з'єднаних провідників у пазу статора; $S_{\Pi\Pi}$ – площа перерізу паза статора; $\alpha_k = \omega_R t_k$, ω_R – кутова швидкість обертання ротора, $t_k = t_{k-1} + \Delta t$, $k = 1, \dots, N$; N – кількість кроків по часу.

Величина μ в кожній точці розрахункової області, де знаходяться феромагнітні матеріали, визначається при чисельному розв'язанні рівняння (1) ітераційним методом за заданими кривими намагнічування. Електропровідність задається тільки в пазах полюсів ротора, в яких розташовані електропровідні стрижні ДСР. Електропровідність в пазах статора приймається рівною нулю, але при цьому в пазах задається стороння густина струмів за формулами (2). Густина струмів в обмотці збудження J_2 задається у відповідності із заданими величиною струму збудження і площею перерізу котушок збудження.

Складові вектора магнітної індукції визначаються за співвідношеннями:

$$\dot{B}_x = \partial \dot{A}_z / \partial y, \quad \dot{B}_y = \partial \dot{A}_z / \partial x, \quad (3)$$

Індукована в електропровідних стрижнях ДСР густина струму визначається так:

$$\dot{J}_z = \left(\partial \dot{B}_y / \partial x - \partial \dot{B}_x / \partial y \right) / \mu. \quad (4)$$

Теплові втрати потужності в стрижнях ДСР визначаються на основі виразу (4) так:

$$Q(x, y) = \left| \dot{J}_z(x, y) \right|^2 / \gamma. \quad (5)$$

Теплові втрати в обмотках статора і ротора знаходяться при відомих активних опорах обмоток і заданих значеннях струмів в обмотках.

Математична модель температурного поля базується на стаціонарному диференціальному рівнянні теплопровідності. В декартових координатах у двовимірній постановці рівняння записується в наступному вигляді:

$$\lambda \left[\frac{\partial^2 \theta(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta(x, y)}{\partial y^2} \right] = -Q(x, y), \quad (6)$$

де $\theta(x, y)$ – невідома функція розподілу температури; λ – коефіцієнт теплопровідності; $Q(x, y)$ – об'ємні питомі джерела теплового поля, Вт/м³, якими є втрати потужності в обмотках ЯСМ при роботі в номінальному синхронному режимі, а також в стрижнях ДСР в асинхронному режимі і при СЕ.

На границі, що є зовнішньою поверхнею ротора і на внутрішній поверхні розточки статора, задаються граничні умови третього роду:

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} = -\alpha(\theta - \theta_C), \quad (7)$$

де θ_C – температура охолоджуючого повітря ($\theta_C = 40$ °С), α – коефіцієнт тепловіддачі з поверхонь статора і ротора в охолоджуюче повітря.

Модель напружено-деформованого стану базується на системі диференціальних рівнянь в часткових похідних, яка використовується при розв'язанні стаціонарних задач структурної механіки і в загальному вигляді має наступним вигляд:

$$0 = \nabla \cdot \vec{FS} + \vec{F}, \quad \vec{F} = \nabla u + I, \quad (8)$$

де ∇ – оператор Гамільтона; S – тензор зусилля; F – тензор градієнта деформації; u – X -складова деформації (зміщення); v – Y -складова деформації (зміщення); ∇u – градієнт зміщення; I – момент інерції, ρ – густина матеріалу, \vec{F} – вектор розподіленої масової сили (сила температурної деформації).

Основною розрахунковою величиною для аналізу напружено-деформованого стану є тензор механічного напруження за фон Мізесом, який характеризує усереднене значення механічних напружень, що виникають в одиниці об'єму матеріалу під впливом спільної дії силових факторів різного просторового напрямку і різної фізичної природи.

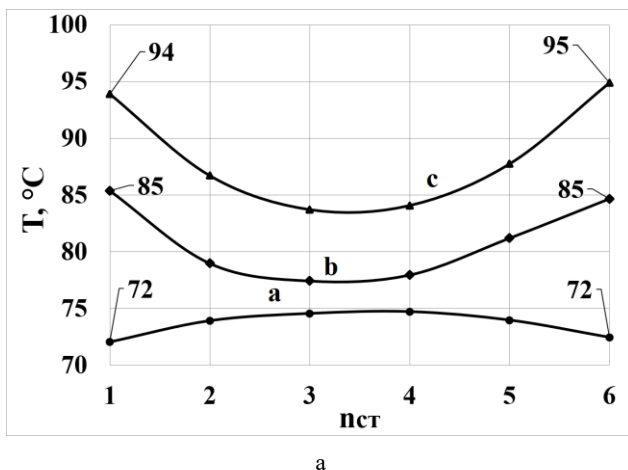
Збільшення лінійних розмірів (довжин) стрижнів на полюсі ротора при їх нагріванні на величину $\Delta\theta_k$ розраховуються за формулою:

$$\Delta L_k = \alpha_L \cdot L \cdot \Delta\theta_k, \quad k = \overline{1, N} \quad (9)$$

де N – число стрижнів на полюсі; α_L – коефіцієнт лінійного розширення міді; L – довжина стрижня.

Результати досліджень. Оскільки розподіл струмів і температури стрижнів ДСР є проміжним результатом, потрібним для визначення розподілу термомеханічних напружень (ТМН), то основна увага далі приділяється аналізу саме ТМН. Для комплексної оцінки доцільно провести порівняльний аналіз нагріву і ТМН при роботі ЯСМ в синхронному і асинхронному режимах при відсутності та наявності СЕ.

Термомеханічні напруження в стрижнях ДСР. На рис. 2, а для СГ-500 в залежності від номера стрижня



на полюсі зображено значення температури стрижнів, а на рис. 2, б – абсолютні значення ТМН стрижнів для наступних розрахункових варіантів: крива а) відповідає синхронному номінальному режиму роботи генератора при відсутності СЕ; крива б) – синхронному номінальному режиму роботи при наявності СЕ $\varepsilon = 0,74$; крива в) – сталому асинхронному режиму при ковзанні $s = -0,01$ і при наявності СЕ $\varepsilon = 0,74$.

З рис. 2 видно, що у порівнянні з номінальним синхронним режимом СГ-500, при якому температура усіх стрижнів майже однакова і знаходиться в межах 72...75 °С, при появі СЕ спостерігається суттєва нерівномірність розподілу зазначених величин, причому спостерігається суттєве збільшення нагріву і ТМН крайніх стрижнів. Ще більша нерівномірність розподілу температури і ТМН виникає при роботі генератора в асинхронному режимі і наявності СЕ. При збільшенні ковзання нерівномірність суттєво зростає. Так, наприклад, при $s = -0,1$ максимальна температура стрижнів зростає до величини 151 °С, а різниця температур окремих стрижнів сягає 24 °С. При цьому різниця аксіальних подовжень стрижнів ДСР доходить до 1 мм, що викликає в стрижнях ДСР повздовжні термомеханічні напруження 100...200 МПа, які близькі до межі плинності міді ($\sigma_{пл} = 280$ МПа). Тому при таких значеннях ковзань, незважаючи на незначну тривалість нагріву, мідні стрижні ДСР (особливо крайні) можуть набувати пластичної залишкової деформації.

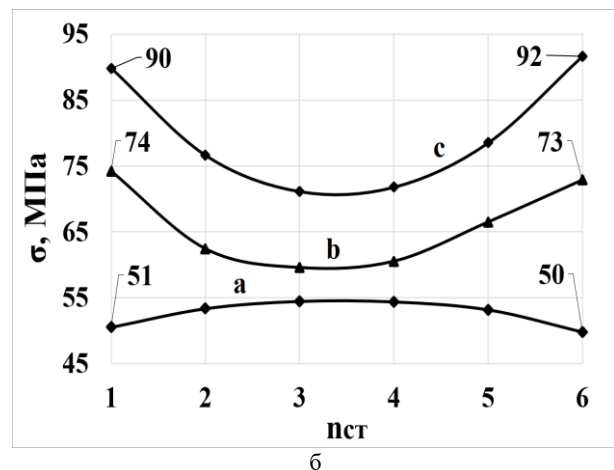


Рис. 2. Розподіл температури і термомеханічних напружень стрижнів ДСР ЯСМ 500 кВт

Термомеханічні напруження в торцевих короткозамикаючих елементах (ТКЕ). За результатами моделювання визначено, що вирішальним фактором щодо відриву стрижня від ТКЕ є утворення зламних зусиль, що виникають внаслідок сумарного подовження усіх стрижнів одного полюса. Механічний момент прикладається до окремих ТКЕ, які з'єднують між собою різні стрижні полюса.

На рис. 3 в градієнті сірого кольору (на рисунку надана шкала відтінків з позначками відповідних значень термомеханічних напружень в МПа) показано термомеханічні напруження для варіанту $\varepsilon = 0,74$, $s = 0$. Також показано термомеханічні деформації ТКЕ, які

для наочності гіперболізовані в 500 разів і відображають форму і вигин ТКЕ в результаті деформування. З рис. 3 видно, що найбільші термомеханічні напруження виникають зі сторін крайніх стрижнів ДСР, які подовжуються в більшій мірі ніж центральні стрижні і тому найбільше виступають з пазів полюсного наконечника. З боку ТКЕ на крайні стрижні діють сили стискання, а в точках зварювання стрижнів в середині полюса діють сили на розрив, що є більш небезпечним і може привести до розриву стрижнів. Тобто ушкоджуються не тільки крайні, а й центральні стрижні в полюсі ротора. Термомеханічні напруження в крайніх стрижнях для даного режиму сягають вели-

чини 223 МПа. Після зупинки ЯСМ зазначені зламні зусилля зникають, але надалі циклічно повторюються при кожному включенні машини. Навіть якщо ці напруження не перевищують критичних значень, то в процесі експлуатації поступово накопичуються втомні деформації матеріалу і відбувається руйнація ДСР.



Рис. 3. Деформація елементів ДСР СГ-500

На рис. 4 показано розподіли ТМН в стрижнях і ТКЕ для гідрогенератора СГК 538/160–70М, за наявності СЕ ротора величиною $\epsilon = 0,83$ (при $s = 0$). На рисунку для наочності показані збільшення в 200 разів деформації, які відображають просторову форму і вигин ТКЕ в результаті деформування.

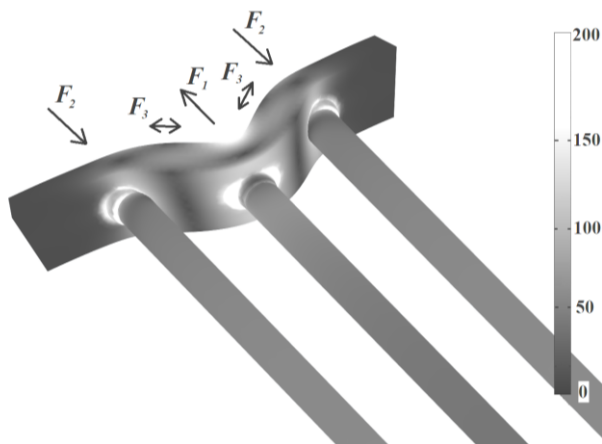


Рис. 4. Деформація елементів ДСР СГК 538/160–70М

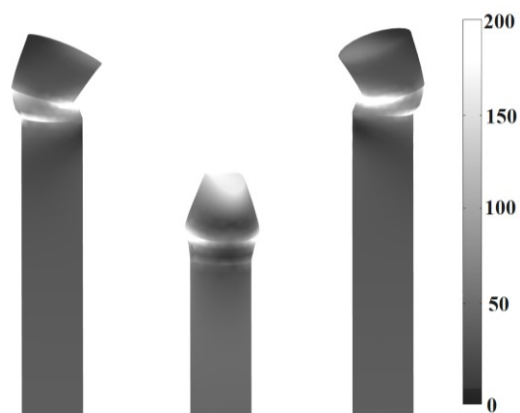


Рис. 5. Деформація стрижнів ДСР СГК 538/160–70М

На рис. 5 в збільшеному масштабі показано загальний вигляд деформованих стрижнів ДСР гідрогенератора СГК 538/160–70М, а також розподіл в них термомеханічних напружень.

З рис. 4 і рис. 5 видно суттєву відмінність довжин крайніх і середнього стрижнів внаслідок їх різного нагріву. Зазвичай стрижні і ТКЕ з'єднуються між собою зварюванням і термомеханічні зусилля в значній мірі впливають на зварний шов. На величину сумарних ТМН в стрижнях впливають не тільки аксіально направлені сили, але й поперечні сили в ТКЕ. Всі термомеханічні сили, можна розділити на 3 складові:

1) аксіальна сила, що діє на відрив центрального стрижня від ТКЕ (сила F_1 , яка показана на рис. 4). Ця сила створює складову ТМН величиною до 151 МПа при СЕ $\epsilon = 0,83$, причому механічні напруження в межах поперечного перерізу центрального стрижня розподілені відносно рівномірно. Повна сила на розрив, що діє на центральний стрижень, у даному випадку складає 2,07 тони.

2) аксіальна сила стискування, що прикладена до крайніх стрижнів (сила F_2 на рис. 4). Ця сила при $\epsilon = 0,83$ в кожному з крайніх стрижнів створює локальні ТМН величиною до 297 МПа, які майже в 2 рази перевищують ТМН в центральному стрижні, але розподілені по перерізу крайніх стрижнів нерівномірно (на рис. 4 і рис. 5 ділянки з великим значенням ТМН зафарбовані в білі кольори). Хоча повна сила на кожен крайній стрижень є приблизно в 2 рази меншою, ніж сила, прикладена до центрального стрижня, але саме завдяки більшій величині ТМН на локальних зазначених ділянках крайніх стрижнів руйнація матеріалу може починатися саме з них. Про це свідчать результати обстежень ушкоджених стрижнів ДСР СГК 538/160–70М.

3) сила поперечного розтягування ТКЕ внаслідок різного подовження усіх стрижнів полюса, яка діє в напрямку дуги сектора ТКЕ (сила F_3 на рис. 4) і призводить до вигину ТКЕ, привареного до кінців усіх стрижнів. Ця сила розриває ТКЕ і також впливає на руйнацію ДСР.

При появі великих значень СЕ (від $\epsilon = 0,50$ до $\epsilon = 0,83$) спостерігаються значні величини термомеханічних напружень в ТКЕ полюса (від 218 до 603 МПа), найбільші значення яких перевищують межі плинності і міцності міді.

Причиною таких ушкоджень є, з одного боку, поява СЕ ротора внаслідок тривалої експлуатації машини, а з іншого боку – невдала конструкція ДСР СГК 538/160–70М, оскільки саме наявність непарної (три) кількості стрижнів на полюсі в зазначеній конструкції призводить до виникнення умов прискореної руйнації ДСР. З цієї точки зору інша конструкція ДСР в СГ-500, яка має парну (шість) кількість стрижнів на полюсі, є більш стійкою до негативного впливу дії СЕ.

Таким чином, не зважаючи на відмінності конструкції ДСР різних ЯСМ, закономірності фізичних процесів, причини і механізм ушкодження ДСР при виникненні СЕ мають загальний характер і потребують розробки багато в чому однотипних технічних рішень для зменшення їх негативного впливу. До таких технічних рішень можна віднести: виконання

парної кількості стрижнів на полюсі, зменшення нерівномірності розподілу струмів і нагріву стрижнів за рахунок виконання крайніх стрижнів з більшою площею перерізу, компактне відносно повздовжньої осі розташування стрижнів на полюсі тощо.

Висновки. Збільшення випадків uszkodження демпферної системи ротора потужних ЯСМ потребує системного дослідження і розробки рекомендацій щодо удосконалення конструкції ДСР.

Тривимірне математичне моделювання розподілу індукованих струмів, температури і термомеханічних напружень в елементах ДСР дозволило докладно дослідити причини і механізм uszkodження ДСР при появі статичного ексцентриситету ротора або при виникненні тривалого асинхронного режиму роботи. Тривимірна модель дозволяє виявити ділянки з найбільшими значеннями ТМН.

Доведено, що першопричиною процесів деградації і uszkodження ДСР ЯСМ є нерівномірність розподілу індукованих струмів в стрижнях на полюсах ротора, яка виникає при появі СЕ ротора або при роботі машини в асинхронному режимі. Найбільші за величиною індуковані струми і нагрів виникають в стрижнях, що розташовані на краях полюсних наконечників, у той час коли центральні стрижні на полюсі нагріваються суттєво менше. Такий несиметричний нагрів ДСР призводить до поздовжньо-поперечної деформації ДСР і появи значних термомеханічних напружень в елементах ДСР. Ці напруження суттєво залежать від наявної величини ексцентриситета ротора і поточного ковзання ротора в асинхронному режимі. При значних ковзаннях і ексцентриситеті виникають неприпустимо великі зламні зусилля, які розривають стрижні і ТКЕ ДСР.

Важливим є також подальша розробка і удосконалення методів та засобів точного контролю величини статичного ексцентриситета, який є однією з голов-

них причин uszkodження ДСР, а також техніко-конструктивних заходів щодо термінового усунення СЕ.

Список літератури

- 1 Артюх С.Ф., Урманов О.Б. *Статистический анализ отказов электрооборудования на гидроэлектростанциях каскада киевских ГАЭС-ГАЭС. Вісник ХПИ, 2011. № 41. С. 3-7.*
- 2 Васковський Ю.М., Цивінський С.С., Титко О.І. *Електромагнітні процеси у демпферній системі роторів гідрогенераторів при нерівномірності повітряного проміжку.* Технічна електродинаміка. 2015, № 1. С. 65-71.
- 3 Васковський Ю.М., Гераскін О.А. *Вплив ексцентриситету ротора на демпферну обмотку капсульного гідрогенератора потужністю 23 МВА.* Гідроенергетика України. – 2020. – № 1-2. – С. 59-64.
- 4 Yong Liao, Zhen Nan Fan, Li Han, Li Dan Xie. *Analysis of the Loss and Heat on Damper Bars in Large Tubular Hydro-Generator base on the 3D Electromagnetic-Temperature field Calculation.* Przegląd Elektrotechniki (Electrical Review), R. 88, № 5b, 2012, pp. 97-100.

References (transliterated)

- 1 Artyuh S.F., Urmanov O.B. *Statisticheskiy analiz otkazov elektrooborudovaniya na gidroelektrostantsiyah kaskada kievskikh GES-GAES* [Statistical analysis of electrical equipment failures at hydro-power plants of the Kiev HPP-PSPP cascade]. Visnik HPI, 2011. 41. pp. 3-7.
- 2 Vaskovskiy Yu.M., Tsivinskiy S.S., Titko O.I. *Elektromagnitni protsesi u dempferniy sistemii rotoriv gidrogeneratoriv pri nerivnomirnosti povitryanogo promizhku* [Electromagnet processes in damper systems of rotors in hydrogenerators in case of uneven power supply]. Tehnichna elektrodinamika, 2015. 1. pp. 65-71.
- 3 Vaskovskiy Yu.M., Geraskin O.A. *Vpliv ekscentrisitetu rotora na dempfernu obmotku kapsulnogo gidrogeneratora potuzhnistyu 23 MVA* [Injection of the eccentricity of the rotor to the damper winding of the capsule hydrogenerator with a pressure of 23 MVA] Gldroenergetika UkraYini. – 2020. – 1-2. – pp. 59-64.
- 4 Yong Liao, Zhen Nan Fan, Li Han, Li Dan Xie. *Analysis of the Loss and Heat on Damper Bars in Large Tubular Hydro-Generator base on the 3D Electromagnetic-Temperature field Calculation.* Przegląd Elektrotechniki (Electrical Review), R. 88, 5b, 2012, pp. 97-100.

Надійшла (received) 27.09.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах /About the Authors

Васковський Юрій Миколайович (Васковський Юрій Николаевич, Vaskovskiy Yuriy Nikolaevich) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електромеханіки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1262-0939>; e-mail: vun157@gmail.com.

Гераскін Олександр Анатолійович (Гераскін Александр Анатольевич, Geraskin Alexandr Anatolievich) – кандидат технічних наук, доцент кафедри електромеханіки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4651-4579>; e-mail: nirbikalpasamadhi@ukr.net.

Татарінов Костянтин Михайлович (Татарінов Константин Михайлович, Tatarinov Konstantin Mikhailovich) – аспірант кафедри електромеханіки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; e-mail: tarantino@gmail.com.

В.І. КОРТУНОВ, А.М. МАСЛЕННИКОВ, А.В. ЄГОРОВ, О.О. ДУНЄВ

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ БЕЗЩІТКОВОГО ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПРИ ПІДВИЩЕНІЙ ЧАСТОТІ ОБЕРТАННЯ

У статті розглядається конструкція безщіткового двигуна постійного струму, що серійно випускається, з прямим приводом в генераторному режимі роботи при частоті обертання вище номінальної. У проведених експериментах підвищення частоти обертання виконувалося за допомогою трифазного асинхронного двигуна номінальною потужністю 5,5 кВт та частотою обертання 2920 об/хв, яка надалі збільшувалася за рахунок пасового двоступінчастого редуктора зі зміною коефіцієнта редукції від 0,16-1,6. Однак, зі зростанням частоти обертання зростають і магнітні втрати, які в свою чергу, збільшують необхідне значення механічної потужності, що підводиться, і призводять до теплового навантаження безщіткової машини постійного струму. Збільшення частоти обертання генератора призводить до зростання ЕРС і при тому ж значенні струму статора призводить до зростання потужності, що віддається до навантаження. В ході експерименту напруга випрямлялась за допомогою трифазного діодного мосту і згладжувалась конденсатором, після чого підключався реостат навантаження. Подані розрахунки магнітних втрат потужності для різних марок електротехнічної сталі наочно показують нелінійну залежність між частотою магнітного поля та їх величиною. Експериментальні дослідження проводились при різних частотах обертання безщіткової машини постійного струму в широкому діапазоні від 140 об/хв до 5228 об/хв, при цьому були отримані значення вихідної потужності в залежності від частоти обертання. Встановлено, що під час роботи машини у генераторному режимі необхідно враховувати особливості експлуатації генераторів у вітроелектроустановках, автономних джерелах живлення чи гібридних силових установках. В одному випадку, варто обмежувати частоту обертання від приводного механізму, а в іншому, режим роботи при підвищеній частоті обертання може бути необхідний для часткового форсування і віддачі більшої потужності при короткочасному використанні.

Ключові слова: безщітковий двигун постійного струму, постійні магніти, підвищена частота обертання, генераторний режим.

В.И. КОРТУНОВ, А.М. МАСЛЕННИКОВ, А.В. ЕГОРОВ, А.А. ДУНЕВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ БЕСЩЕТОЧНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЕ ВРАЩЕНИЯ

В статье рассматривается серийно выпускаемая конструкция бесщеточного двигателя постоянного тока с прямым приводом в генераторном режиме работы при частоте вращения выше номинальной. В проведенных экспериментах повышение частоты вращения производилось с помощью трехфазного асинхронного двигателя номинальной мощностью 5,5 кВт и частотой вращения 2920 об/мин, которая в дальнейшем увеличивалась за счет ременного двухступенчатого редуктора с изменением коэффициента редукции от 0,16-1,6. Однако, с ростом частоты вращения возрастают и магнитные потери, которые в свою очередь, увеличивают необходимое значение подводимой механической мощности и приводят к тепловой перегрузке бесщеточной машины постоянного тока. Увеличение частоты вращения генератора приводит к росту ЭДС и при том же значении тока статора приводит к росту мощности, отдаваемой в нагрузку. В ходе эксперимента напряжение выпрямлялось с помощью трехфазного диодного моста и сглаживалось конденсатором, после чего подключался нагрузочный реостат. Представленные расчеты магнитных потерь мощности для разных марок электротехнической стали наглядно показывают нелинейную зависимость между частотой магнитного поля и их величиной. Экспериментальные исследования проводились при разных частотах вращения бесщеточной машины постоянного тока в достаточно широком диапазоне от 140 об/мин до 5228 об/мин, при этом были получены значения выходной мощности в зависимости от частоты вращения. Установлено, что при работе машины в генераторном режиме необходимо учитывать особенность эксплуатации генераторов в ветроэлектроустановках, автономных источниках питания или гибридных силовых установках. В одном случае, стоит ограничивать частоту вращения от приводного механизма, а в другом, режим работы при повышенной частоте вращения может быть необходим для частичного форсирования и отдачи большей мощности при кратковременном использовании.

Ключевые слова: бесщеточный двигатель постоянного тока, постоянные магниты, повышенная частота вращения, генераторный режим.

V.I. KORTUNOV, A.M. MASLIENNIKOV, A.V. YEHOROV, O.O. DUNIEV

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE GENERATOR MODE FOR A BRUSHLESS DC MOTOR AT AN INCREASED ROTATIONAL SPEED

This article deals with a commercially available direct drive brushless DC motor that was investigated in the generator mode at an increased speed above the rated one. During the conducted experiments the increase of the generator rotational speed was carried out due to a three-phase asynchronous motor with 5.5 kW rated power and 2920 rpm rated speed, which was further increased by a two-stage belt gearbox with a reduction ratio from 0.16 to 1.6. However, with an increase in the rotational speed, the magnetic losses also increase, which in turn increase the required value of the input mechanical power and lead to thermal overload of the brushless DC machine. An increase the generator rotational speed leads to an increase of the EMF value and, at the same value, of the stator current, leads to an increase the generated power. Throughout the experiment, the voltage was rectified using a diode bridge and bulk capacitor, after that it was connected to a load resistance. The presented calculations of the magnetic power losses for different electrical steel grades clearly demonstrate the nonlinear dependence between the magnetic field frequency and its magnitude. Experimental studies were carried out at different speeds of rotation of a brushless DC machine in a very wide range from 140 rpm to 5228 rpm, moreover, the values of the output power were obtained depending on the rotational speed. It is concluded, that in the generator mode of the brushless DC machine, it is necessary to take into account the feature of the operation at wind power plants, autonomous power supply such as hybrid power plants. In the first case, it is worth limiting the rotational speed from the driven mechanism, and in the second case, this mode of operation may be necessary for partial boosting of output power for short-term use.

Key words: brushless DC motor, permanent magnets, overspeed, generator mode

Актуальність. Безщіткові електричні машини постійного струму мають досить просту конструкцію та велику надійність, що обумовлює їх широке використання у електротранспорті, а саме: електромобілях,

© В.І. Кортунов, А.М. Масленніков, А.В. Єгоров, О.О. Дунєв, 2021

електромотоциклах, електроскутерах, електровелосипедах, електросамокатах тощо.

На всі ці транспортні засоби встановлюють безщіткові двигуни постійного струму (БДПС) з різною потужністю та контролер керування. Завдяки контролеру керування та режиму рекуперації енергії електричний транспортний засіб має змогу направити електричну потужність до акумуляторної батареї. Принцип зворотності електричних машин дозволяє використовувати їх як у режимі двигуна, так і у режимі генератора, інформація про який – обмежена.

Постановка задачі. Для транспортних засобів відомі максимальні швидкості та відповідні частоти обертання двигуна, потужність в режимі рекуперації та інші данні, але саме завдяки наявності цього типу електродвигуна у вільному обігу його починають використовувати все більше у генераторному режимі для автономних систем живлення, вітроелектроустановок (ВЕУ) з роботою на автономне навантаження при різних частотах обертання, що перевищують номінальні значення. Проведення експериментального дослідження БДПС у генераторному режимі при різних частотах обертання дозволить визначити прийнятний діапазон частот обертання з відповідними зовнішніми характеристиками, а також вплив частоти обертання на вихідну потужність й магнітних втрат потужності.

Аналіз. Відомо, що електричні машини з постійними магнітами мають більший ККД, ніж електричні машини з класичним електромагнітним збудженням. Це пояснюється відсутністю втрат потужності в обмотці збудження, але при цьому ускладнюється можливість регулювання і стабілізації величини вихідної напруги. Не дивлячись на ці недоліки їх активно застосовують для бортових систем електрозабезпечення, виконують та досліджують режими роботи цих генераторів у складі ВЕУ [1]. Конструкція БДПС, що досліджується, приведена на рис. 1.



Рис. 1. БДПС у розібраному стані

Номінальна потужність БДПС, що досліджується, становить 500 Вт, номінальний струм 10 А, номінальна напруга 48-54 В. На його роторі розташовано 46 постійних магнітів з почерговою полярністю і намагніченістю в радіальному напрямку з розмірами по висоті – 3 мм, по ширині – 14 мм, по осьовій довжині – 25 мм (рис. 2). Статор виконаний з електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм з зосередженими обмотками, кількість яких становить 51 шт., схема з'єднання обмотки статора – "зірка".

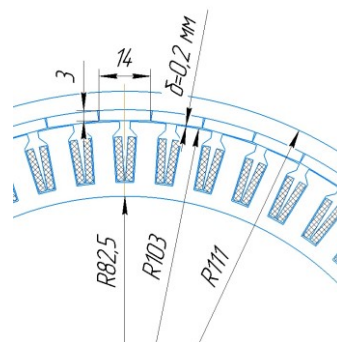


Рис. 2. Розміри магнітної системи БДПС

Завдяки зміні полярності постійних магнітів і розподілу котушкових груп фази в просторі, отримують синусоїдальну форму ЕРС. При цьому її частота прямо пропорційна частоті обертання (табл.1) і визначається за відомою формулою:

$$f_1 = \frac{n \cdot p}{60},$$

де n – частота обертання ротора, об/хв;

f_1 – частота напруги, Гц;

p – число пар полюсів.

Таблиця 1 – Залежність між частотою напруги і частотою обертання ротора у БДПС

f_1 , Гц	192	383	575	767	958	1917
n , об/хв	500	1000	1500	2000	2500	5000

При збільшенні частоти обертання також буде зростати і ЕРС генератора, індуктивний опір обмотки статора та величина магнітних втрат. Магнітні втрати потужності будуть призводити до перевантаження привідного механізму та суттєво підвищуватимуть температуру генератора. Магнітні втрати потужності можна розрахувати знаючи марку сталі та деякі її паспортні данні.

Електротехнічну сталь поділяють за вмістом кремнію: низьколеговану (0,5-1,8% Si), середньолеговану (1,8-2,8% Si), леговану (2,8-3,8% Si) і високолеговану (3,8-4,8% Si). Кремній підвищує електричний опір сталі, зменшує питомі втрати енергії (на гістерезис і вихрові струми), знижує індукцію насичення і пластичність. Магнітні властивості електротехнічної сталі покращують створенням кубічної текстури і рафінуванням від супутніх домішок. Низько- і середньолегована сталь товщиною 0,5-1,0 мм застосовують для виготовлення роторів і статорів електричних машин. До легованих і високолегованих належить трансформаторна сталь. Розрізняють гарячекатану (переважно листову) і холоднокатану сталь (довгі стрічки, переважно змотані в рулони) [2].

Виходячи з того, що досліджується конструкція БДПС, що виготовляється серійно, тому невідомо яка марка сталі була використана для виготовлення осердя статора. Для отримання кількісних показників проведемо розрахунок магнітних втрат для найбільш ймовірних марок сталей: 2411, 2013, 2312 товщиною 0,5 мм і для порівняння – 3425 товщиною 0,05 мм.

Магнітні втрати в окремих елементах ($P_{\text{маг}}$) осер-

дя статора (зубця і спинці) визначаються на основі загального виразу, Вт [3]:

$$P_{mage} = K_{mag} p_{1/50} \left(\frac{f_s}{50} \right)^{\beta_f} B_e^2 m_{Fee},$$

де K_{mag} – поправочний коефіцієнт, що враховує збільшення магнітних втрат через різні технологічні пошкодження сталевих листів в процесі виготовлення осердя, для машин змінного струму приймається $K_{mag} = 1,7$;

$p_{1/50}$ – питомі магнітні втрати, які визначені експериментально при частоті 50 Гц і магнітній індукції 1 Тл;

β_f – емпіричний показник ступеню;

B_e, m_{Fee} – магнітна індукція і маса сталі конкретного елемента осердя.

Для сталі 2411 $p_{1/50} = 1,6$ Вт/кг і $\beta_f = 1,3$;

для сталі 2013 $p_{1/50} = 2,6$ Вт/кг і $\beta_f = 1,5$;

для сталі 2312 $p_{1/50} = 1,75$ Вт/кг і $\beta_f = 1,4$.

Данні для сталі 3425 (ГОСТ 21427.4-78) товщиною 0,05 мм взяті по результатам роботи [4]:

$p_{1/50} = 2,5$ Вт/кг;

$p_{1/200} = 8$ Вт/кг;

$p_{1/400} = 18$ Вт/кг і $\beta_f = 1,4$.

Маса зубців та спинки була визначена за відомими розмірами БДПС і становить 1,04 кг та 0,373 кг, відповідно. Результати розрахунку зведено до табл. 2.

Таблиця 2 – Залежність магнітних втрат від частоти для різних марок сталі

f_1 , Гц	192	383	575	767	958	1917	
Магнітні втрати потужності для сталі марки 2411, Вт							
K_{mag}	1,7	71	174	295	429	573	1413
	2	83	205	347	505	675	1663
	3	125	307	521	758	1012	2494
Магнітні втрати потужності для сталі марки 2013, Вт							
K_{mag}	1,7	161	454	836	1288	1798	5090
	2	189	534	983	1515	2115	5989
	3	284	802	1475	2273	3173	8983
Магнітні втрати потужності для сталі марки 2312, Вт							
K_{mag}	1,7	79	208	368	551	752	1986
	2	93	245	433	648	885	2336
	3	140	367	649	972	1327	3505
Магнітні втрати потужності для сталі марки 3425, Вт							
K_{mag}	1,7	59	133	221	331	451	1192
	2	69	156	260	389	531	1402
	3	104	234	390	586	797	2104

Розрахунок магнітних втрат потужностей для кожної марки сталі проводився після чисельного розрахунку магнітного поля, з аналізу якого визначені середні значення магнітної індукції у зубці та спинці осердя статора. Таким чином було враховано різну ступінь насичення магнітної системи БДПС.

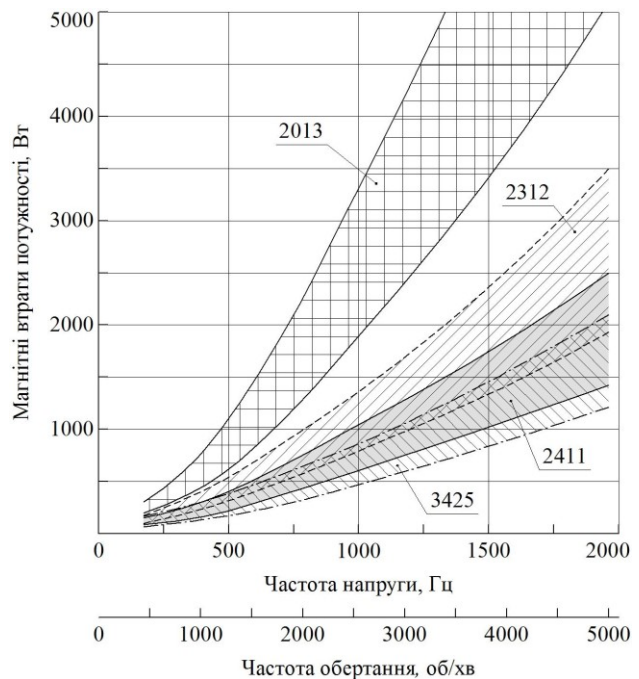


Рис. 3. Магнітні втрати потужності в осерді статора БДПС для різних марок сталі

За результатами розрахунку видно, що при виготовленні осердя статора БДПС з електротехнічної сталі марки 2411 найбільші значення магнітних втрат будуть знаходитися в діапазоні 1,4-2,5 кВт, для 2013 – 5,1-8,9 кВт, для 2312 – 1,9-3,5 кВт, для 3425 – 1,2-2,1 кВт. Тобто при виборі приводного двигуна треба мати це на увазі та обирати його з запасом потужності, яка буде витрачена на цей вид втрат окрім власних.

Випробувальний стенд наведено на рис. 4 і до його складу входять: 1) вимірювальний комплект К540; 2) асинхронний двигун потужністю 5,5 кВт з номінальною частотою обертання 2920 об/хв; 3) зразок БДПС, що досліджується; 4) пасовий двоступеневий редуктор з регулюванням коефіцієнту редукції від 0,16-1,6; 5) випрямляч з діодами ДЧ1115-80 $U = 900$ В; $I = 80$ А, 6) реостати з опором від 0,6 Ом до 180 Ом; 7) осцилограф RIGOL SDS 1022DL.

Схема випробувальної установки наведена на рис. 5.

Експериментальні дослідження проводились при різних частотах обертання БДПС у досить широкому діапазоні: від 140 об/хв до 5228 об/хв. При цьому були отримані значення напруги в обмотці статора від 13,7 В до 630 В, а її частота збільшувалася з 50 Гц до 1,98 кГц. Максимальне значення струму обмежувалось його номінальним значенням 10 А, що дозволило зберегти електричні втрати потужності на одному рівні під час проведення всіх експериментів.

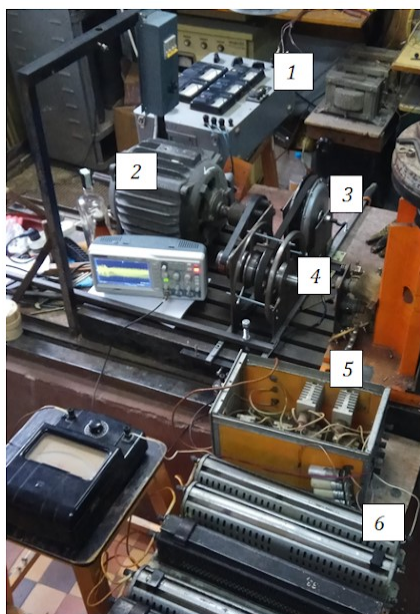


Рис. 4. Випробувальний стенд

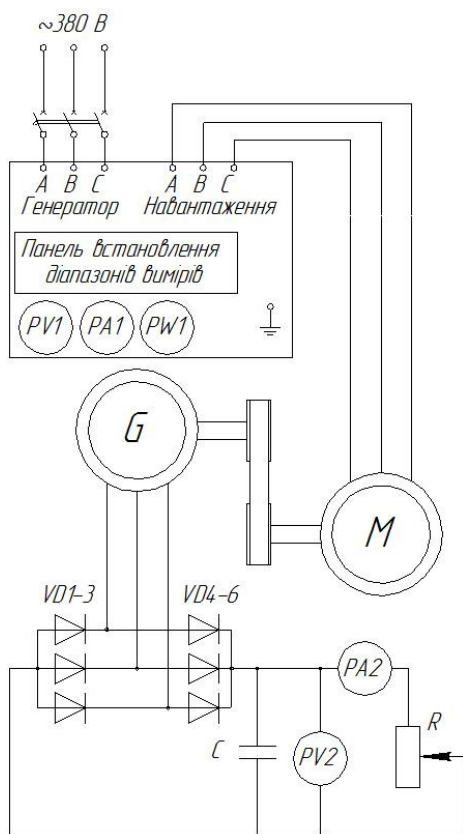


Рис. 5. Схема випробувальної установки

Форма кривої напруги БДПС знятої за допомогою осцилографа RIGOL SDS 1022DL для частоти обертання 5000 об/хв показана на рис. 6.

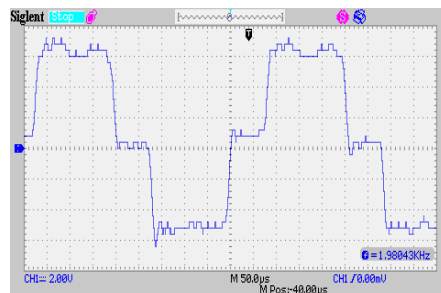
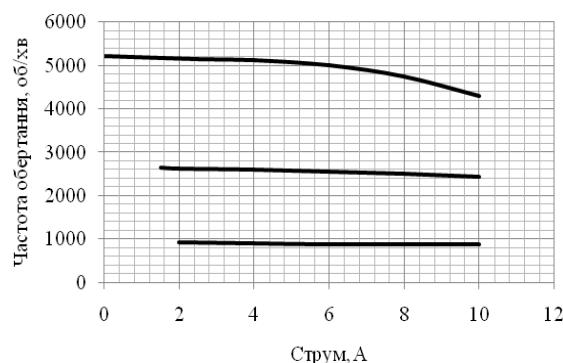
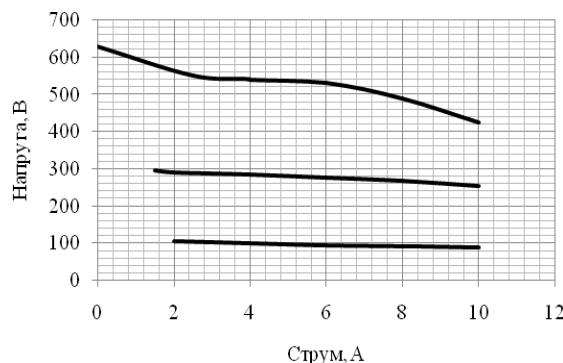


Рис. 6. Осцилограма фазної напруги БДПС у генераторному режимі

Дослідження показали, що при збільшенні частоти обертання збільшується потужність, що віддає БДПС до навантаження з 13,7 Вт до 4,25 кВт, але при цьому різко зростають магнітні втрати потужності, що залежать від магнітної індукції та її частоти в ступені, що призводить до перегріву БДПС та підвищеного споживання енергії приводного асинхронного двигуна. При роботі БДПС на частоті обертання 5000 об/хв корисна потужність, що віддається до навантаження, складала 4,2 кВт, магнітні та механічні втрати потужності – 4,6 кВт. Експериментальні характеристики БДПС у генераторному режимі наведено на рис. 7, а у таблиці 3 – максимальні значення потужності для відповідних частот обертання при номінальному струмі.



а



б

Рис. 7. Характеристики БДПС у генераторному режимі: а – електромеханічні; б – зовнішні.

Таблиця 3 – Залежність потужності від частоти обертання

n , об/хв	882	2432	4300
P_{load} , Вт	880	2530	4250

Висновки. Отримані результати експериментів показують, що потенційно в конструкції БДПС можна отримати корисну потужність 4,2 кВт при вазі 6 кг. Їхнє співвідношення дає питому потужність на рівні 0,7 кВт/кг при цьому генератори класичної конструкції з електромагнітним збудженням мають цей показник на рівні 0,25-0,3 кВт/кг. Однак при цій потужності частота напруги складає 1,9 кГц, що призводить до високого зростання магнітних втрат та до перегріву БДПС, а також змушує споживати більше потужності приводним двигуном (близько 8,8 кВт), що призводить до невисокого ККД всієї установки на рівні 50%. З метою зменшення магнітних втрат і підвищення ККД генератора в цілому, необхідно використовувати сталі з меншою товщиною листа і вмістом кобальту, наприклад, енергоефективні, окисовані Fe-Co сталі, товщиною листа 0,2 мм. Вони мають менші магнітні втрати та масогабаритні показники, найбільші індукцію насичення та магнітну проникність [5].

Список літератури

- 1 Andreea Laczko, Stephane Brisset, Mircea Radulescu. Design of a brushless DC permanent-magnet generator for use in micro-wind turbine applications. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, IOS Press, 2018, 56, pp. 3-15.

- 2 АЗОВПРОМСТАЛЬ. Электротехническая сталь: веб-сайт. URL: <https://www.azovpromstal.com/article/one/id/4600> (дата звернення: 08.11.2021 р.).
- 3 Мілих В. І. *Проектування трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненою обмоткою ротора*: навч. посіб. Харків: 2009. 42 с.
- 4 Насыпаная Е. П. *Моделирование и проектный синтез энергоэффективных трансформаторов с целендрическими слоевыми обмотками*: дис. канд. тех. наук: 05.09.01. Одесса, 2015.
- 5 Шевченко В.В., Шайда В.П., Зубань Е.С. Особенности выбора материалов магнитных систем электродвигателей для авиации. *Научно-технический журнал «Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України»*, 2017, № 2 (27), С. 59-64.

References (transliterated)

- 1 Andreea Laczko, Stephane Brisset, Mircea Radulescu. Design of a brushless DC permanent-magnet generator for use in micro-wind turbine applications. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2018, 56, pp. 3-15.
- 2 AZOVPROMSTAL. Elektrotehnicheskaia stal: veb-sait. URL: <https://www.azovpromstal.com/article/one/id/4600>
- 3 Milykh V. I. *Proektuvannia tryfaznykh asynkhronnykh dvyhuniv z korotkozamknenoiu obmotkoiu rotora* [Design of three-phase asynchronous motors with short-circuited rotor winding]. Kharkiv. 2009. 42 p.
- 4 Nasipanaia E. P. *Modelirovaniye y proektniiy sintez enerhoefektivnykh transformatorov s tselendricheskymy sloevyymi obmotkami*: dis. kand. tekhn. nauk.: 05.09.01 [Modeling and design synthesis of energy efficient transformers with celendric layer windings. Candidate eng. sci. diss. (Ph.D.)]. Odessa, 2015.
- 5 Shevchenko V.V., Shayda V.P., Zuban E.S. Osobennosti vyibora materialov magnitnykh sistem elektrodvigateley dlya aviatsii. *Naukovo-tehnichnyi zhurnal «Nauka i tehnika Povitryanykh Sil Zbroinykh Sil Ukraini»*, 2017, no 2 (27), pp. 59-64.

Поступила (received) 08.11.21

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кортунов Вячеслав Іванович (Кортунов Вячеслав Иванович, Kortunov Vyacheslav Ivanovich) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професор кафедри комп'ютерного моделювання процесів і систем; м. Харків; тел.: (050) 935-23-95.

Масленников Андрій Михайлович (Масленников Андрей Михайлович, Masliennikov Andrii Mykhailovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри електричних машин; м. Харків; тел.: (066) 780-97-83.

Єгоров Андрій Володимирович (Егоров Андрей Владимирович, Yehorov Andrii Volodymyrovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри електричних машин; м. Харків; тел.: (098) 851-84-94.

Дунев Олексій Олександрович (Дунев Алексей Александрович, Duniev Oleksii Oleksandrovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних машин, тел.: (096) 909-11-04.

***В.В. ЗОЛОТАРЬОВ, О.В. ГОЛИК, Є.С. МОСКВІТІН, М.Б. ЗИКОВ, А.А. ШУРУПОВА, Л.А. ЩЕБЕНЮК,
О.В. ВАСИЛЬЄВА***

МОДЕЛЬ ДИНАМІКИ РОЗВИТКУ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ МЕХАНІЧНИХ ВИПРОБУВАННЯХ НАПОВНЕНИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ В УМОВАХ КАБЕЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

При впровадженні у виробництво високо наповнених безгалогенних пластмас, механічна міцність яких в експлуатації безпосередньо залежить від вмісту антипірену і технології накладання, актуальним стає контроль механічних характеристик оболонки кабелю у пожегобезпечному виконанні. Полімерні матеріали і їх композиції є в'язкопружними матеріалами, для яких механічні характеристики залежать від часу дії напруження. Представлено результати оцінки швидкості деформації видовження зразків від часу одноосного розтягування при різних швидкостях розведення затискачів в процесі процедури визначення механічних характеристик для безгалогенних кабельних пластмас при нормативних випробуваннях в умовах виробництва. Показано, що внутрішній і зовнішній шари оболонки кабелю з наповненої безгалогенної пластмаси мають суттєво різні значення нормативного параметру пластичності: свідчення відмінностей в структурі полімеру у внутрішніх і зовнішніх шарах оболонки в наслідок технологічного процесу примусового деформування при екструзії, яка є вимушеною (примусовою) орієнтацією полімерної структури. Наведені експериментальні залежності відносної деформації видовження $\delta L(t)$ зразків від часу одноосного розтягування при різних швидкостях розведення затискачів як суми миттєво-пружної, в'язко-пружної і миттєво-пластичної (незворотної): $de/dt = \lambda_{np} \exp(-t/\lambda_{np}) + \{ \lambda_1 \exp(-t/\lambda_1) \exp[-(t-\tau)/\lambda_2] d\tau \} / \Delta t$. Наведені відповідні оцінки параметрів названих складових деформування зразків, одержані при апроксимації експериментальних даних запропонованою моделлю. Запропонована модель, по-перше, дає пояснення наявності характерного максимуму ($t = t_m$) відносної деформації як суперпозиції двох взаємозалежних процесів деформування з різним часом післядії λ . По-друге, дозволяє уточнювати вимоги до проведення випробувань: із збільшенням швидкості розведення затискачів час максимуму t_m значно зменшується, відповідно чим більша швидкість розведення затискачів, тим меншим має бути відрізок часу Δt між послідовними вимірюваннями довжини контрольної ділянки зразка. Цей висновок експериментально підтверджено для конкретного матеріалу при швидкості 250 мм/хв.

Ключові слова: безгалогенні кабельні полімерні композиції, деформація, час, одноосне розтягування

***В.В. ЗОЛОТАРЕВ, О.В. ГОЛИК, Е.С. МОСКВИТИН, М.Б. ЗЫКОВ, А. А. ШУРУПОВА,
Л.А. ЩЕБЕНИУК, О.В. ВАСИЛЬЄВА***

МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ КАБЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

При внедрении в производство высоко наполненных безгалогенных пластмасс, механическая прочность которых в эксплуатации непосредственно зависит от относительного количества антипирена и технологии наложения, актуальным становится контроль механических характеристик оболочки кабеля в пожаробезопасном исполнении. Полимерные материалы и их композиции являются вязкоупругими материалами, для которых механические характеристики зависят от времени действия напряжения. Представлены результаты оценки скорости удлинения образцов от времени одноосного растяжения при различных скоростях разведения зажимов в процессе нормативной процедуры определения механических характеристик для безгалогенных кабельных пластмасс при испытаниях в условиях производства. Показано, что внутренний и внешний слой оболочки кабеля из наполненной безгалогенной пластмассы существенно различаются по значениям нормативного параметра пластичности: свидетельство отличий в структуре полимера во внутренних и внешних слоях оболочки вследствие технологического процесса принудительного деформирования при экструзии, которая является принудительной ориентацией полимерной структуры. Приведены экспериментальные зависимости относительной деформации удлинения $\delta L(t)$ образцов от времени одноосного растяжения при различных скоростях разведения зажимов. Эти зависимости иллюстрируют подтвержденную большим массивом данных воспроизводимость формы зависимостей $\delta L(t)$ для различных по структуре подобных наполненных безгалогенных полимеров. Предложена модель зависимости скорости удлинения от времени растяжения как суммы скоростей мгновенно-упругой, вязко-упругой и мгновенно-пластичной (остаточной): $de/dt = \lambda_{np} \exp(-t/\lambda_{np}) + \{ \lambda_1 \exp(-t/\lambda_1) \exp[-(t-\tau)/\lambda_2] d\tau \} / \Delta t$. Приведены оценки параметров соответствующих составляющих деформирования образцов, полученные при аппроксимации экспериментальных данных с помощью предложенной модели, которая, во-первых, объясняет наличие характерного максимума ($t = t_m$) относительной деформации как суперпозиции двух взаимозависимых процессов деформирования с различным временем последствия λ . Во-вторых, позволяет уточнить требования к проведению испытаний: при увеличении скорости разведения зажимов время соответствующее максимуму скорости деформации t_m уменьшается, соответственно чем большая скорость разведения зажимов, тем меньшим должен быть промежуток времени Δt между последовательными измерениями длины контрольного участка образца. Этот вывод экспериментально подтвержден для конкретного материала при скорости разведения зажимов 250 мм/хв.

Ключевые слова: безгалогенные кабельные полимерные материалы, деформация, время, одноосное растягивание

***V.V. ZOLOTAREV, O.V. GOLIK, E.S. MOSKVITIN, M.B. ZYKOV, A.A. SHURUPOVA, L.A. SHCHEBENIUK,
O.V. VASILIEVA***

MODEL OF DEFORMATION GROWTH DYNAMICS DURING FILLED POLYMER MATERIALS MECHANICAL TESTS UNDER CABLE PRODUCTION CONDITIONS

With the introduction into highly filled halogen-free plastics production, the mechanical strength of which in operation directly depends on the flame retardant content and application technology, it becomes important to control the cable sheath mechanical characteristics in a fireproof design. Polymeric materials and their compositions are viscoelastic materials for which the mechanical properties depend on the stress time. The results of estimating the deformation samples rate elongation from the uniaxial stretching time at different dilution rates of the clamps in the mechanical characteristics determining process for halogen-free cable plastics in regulatory tests under production conditions are presented. It is shown that the inner and outer layers of the halogen-free plastic cable sheath have significantly different values of the plasticity normative parameter: differences

© В.В. Золотарьов, О.В. Голик, Є.С. Москвітін, М.Б. Зиков, А.А. Шурупова, Л.А. Щебенюк, О.В. Васильєва, 2021

evidence in the polymer structure in the inner and outer layers of the sheath due to the forced deformation process during extrusion, which is forced polymer structure orientation. Elongation relative deformation experimental dependences $\delta L(t)$ of the samples on the uniaxial stretching time at different clamps dilution speeds are given, which illustrate confirmed by a large data array the dependencies shape reproducibility $\delta L(t)$ for different in structure similar filled halogen-free polymers. The strain rate dependence model on tensile time as the sum of instantaneous-elastic, viscoelastic and instantaneous-plastic (irreversible) is proposed: $d\varepsilon/dt = \lambda_{np} \exp(-t/\lambda_{np}) + \int \lambda_1 \exp(-\tau/\lambda_1) \exp[-(t-\tau)/\lambda_2] d\tau / \Delta t$. The appropriate parameter estimates of the named samples deformation components obtained by approximating the experimental data by the proposed model are given. The proposed model, firstly, explains the presence characteristic relative deformation maximum ($t = t_m$) as a two interdependent deformation processes superposition with different aftermath λ . Secondly, it allows to specify the requirements for testing: with increasing the clamps dilution speed, the maximum time t_m decreases significantly, respectively, the higher the clamps dilution speed, the smaller interval time Δt between a successive sample control section length measurements. This conclusion was experimentally confirmed for a specific material at a speed of 250 mm/min.

Keywords: halogen-free cable polymer compositions, deformation, time, uniaxial stretching

Актуальність роботи зумовлена тим, що пожежна безпека кабелів – одна з основних задач кабельного виробництва при впровадженні інноваційних безгалогених пластмас. Механічна міцність безгалогених пластмас в експлуатації безпосередньо залежить і від вмісту антипірену, і від технології накладання пластмаси в умовах виробництва. Тому організація технологічного контролю забезпечення механічної міцності елементів конструкції, виготовлених з безгалогених пластмас в умовах конкретного виробництва – актуальна задача організації виробництва пожегобезпечних кабелів.

Проблема полягає в тому, що нормативна процедура визначення механічних характеристик кабельних пластмас в умовах виробництва [1] визначає такі характеристики, які не включають час:

- максимальне розтягувальне зусилля P_m (maximum tensile force)
- максимальне розтягувальне зусилля P_m (maximum tensile force);
- міцність під час розтягування $\sigma_m = P_m/F$ (tensile strength);

- відносне видовження при розриві $\delta = (l - l_0) \cdot 100/l_0$, % (elongation at break),

де F – площа поперечного перерізу зразка до випробування, l_0 – контрольна довжина нерозтягнутого зразка, l – контрольна довжина зразка при розриванні.

Важливо те, що стійкість полімерів до механічних навантажень впродовж терміну їх експлуатації тісно пов'язана з явищем релаксації – процесом поступової зміни внутрішніх напружень в попередньо деформованому полімерному матеріалі, а технологія накладання такого матеріалу в умовах виробництва і є процесом його деформування, яке по суті своїй є вимушеною (примусовою) орієнтацією. Динаміка деформування і релаксації орієнтованих полімерів значною мірою залежить від технології їх накладання.

Без урахування динаміки (зміни в часі) залежності між деформацією і механічним напруженням впродовж процесів навантаження і релаксації, які тісно пов'язані, практично неможливо порівнювати механічні властивості в'язкопружних матеріалів [2] з точки зору їх експлуатаційних властивостей.

Аналіз літератури. Найбільш загальною теорією вирішення задач визначення механічної міцності полімерних матеріалів є теорія в'язкопружності [2], згідно з якою саме полімерні матеріали і їх композиції є в'язкопружними, для яких залежність між напруженням і деформацією включає час. В [3] основними виділено чотири види деформації полімерних матеріалів:

- 1) Миттєво-пружна ε_{np} , що розповсюджується в матеріалі зі швидкістю звуку і пов'язана зі зміною

валентних зв'язків або кутів, тобто з малою зміною міжмолекулярних та міжатомних відстаней.

- 2) Вискоеластична (в'язко-пружна або затримана) $\varepsilon_{вп}$, яка є результатом конформаційних змін молекул під дією напружень і яка за абсолютною величиною може значно (в багато разів) перевищувати миттєво-пружну. Внаслідок високої в'язкості механічно міцних полімерів процеси деформування і релаксації відбуваються відносно повільно.

- 3) Миттєво-пластична (незворотна) $\varepsilon_{пл}$, яка виникає одночасно з миттєво-пружною.

- 4) Незворотна в'язка (типу течії) ε_t , яка має місце при значних напруженнях і тривалих навантаженнях.

Переважання тієї чи іншої деформації залежить від умов (температури, величини та виду навантаження, часу, швидкості деформування) та стану матеріалу (ступінь кристалічності, молекулярна орієнтація, термообробка, старіння та ін.). Деформація в'язкопружного тіла при дії напруження, що змінюється безперервно, в момент часу t визначається напруженням в цей момент $\sigma(t)$ плюс вплив деформацій, що виникли в попередній період часу від 0 до t , і вплив їх на поточну деформацію тим менший, чим більша різниця $t - s$ [2, 3]:

$$\varepsilon(t) = \sigma(t)/E + E^{-1} \int K(t-s) \sigma(s) ds, \quad (1)$$

де E – модуль пружності; $K(t)$ – функція впливу напружень $\sigma(s)$ в момент часу s на деформацію в момент часу t , $K(t)$ пропорційна швидкості деформування при напруженнях, менших за ті, які викликають помітну остаточну деформацію.

Ретроспектива досліджень деформування твердих полімерних матеріалів є послідовністю пошуку моделі, яка б давала «більш точний опис експериментальних кривих повзучості [3]»: від узагальненої моделі Максвелла для набору пружних та в'язких елементів із різним часом релаксації для останніх, через варіанти моделі Кельвіна-Фойгта (не описують незворотні деформації) та комбіновані моделі з послідовним та паралельним з'єднанням в'язких та пружних елементів (приклад модель Бюргерса), до теорії спадкової в'язко-пружності Больцмана (див. формулу (1)).

Для практичних застосувань у кабельній техніці важливо те, що для аналізу динаміки деформування безгалогених кабельних пластмас в умовах виробництва необхідна модель залежності між деформацією і часом при нормативних випробуваннях на розтягування, за якою можуть бути оцінені параметри деформування, обмеженого пружною та в'язкопружною деформаціями.

Ретроспектива досліджень деформування твердих полімерних матеріалів є послідовністю пошуку моделі, яка б давала «більш точний опис експериментальних кривих повзучості [3]»: від узагальненої моделі

Максвелла для набору пружних та в'язких елементів із різним часом релаксації для останніх, через віранти моделі Кельвіна-Фойгта (не описують незворотні деформації) та комбіновані моделі з послідовним та паралельним з'єднанням в'язких та пружних елементів (приклад модель Бюргерса), до теорії спадкової в'язко-пружності Больцмана (див. формулу (1)).

Для практичних застосувань у кабельній техніці важливо те, що для аналізу динаміки деформування безгалогенних кабельних пластмас в умовах виробництва необхідна модель залежності між деформацією і часом при нормативних випробуваннях на розтягування, за якою можуть бути оцінені параметри деформування, обмеженого пружною та в'язкопружною деформаціями.

Мета роботи. Експериментальне дослідження динаміки деформування безгалогенних кабельних пластмас за нормативної процедури визначення їх механічних характеристик залежно від рецептури (вміст антипіренів) і від технології накладання пластмаси в умовах виробництва. Розроблення моделі кількісної характеристики динаміки розвитку деформації наповнених безгалогенних пластмас для порівняння впливу технології накладання пластмаси на механічні властивості в'язкопружних матеріалів.

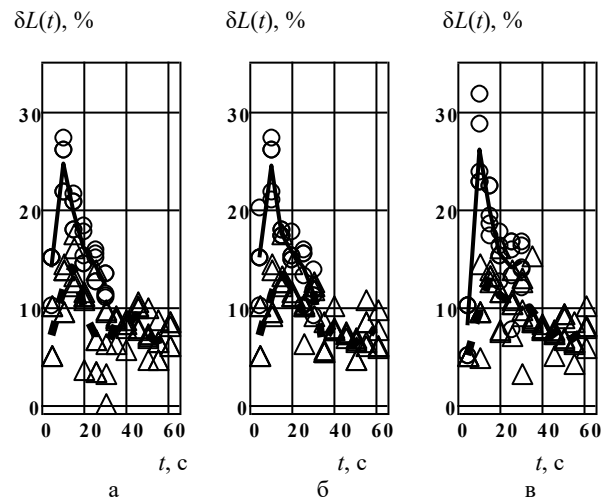
Основні результати. Виконано дослідження залежності деформації видовження зразків від часу одноосного розтягування при постійній швидкості розведення затискачів в процесі нормативної процедури визначення механічних характеристик для безгалогенних кабельних пластмас.

Експериментальну роботу проведено на базі центральної заводської лабораторії ПАТ «ЗАВОД ПВДЕНКАБЕЛЬ» за участі студентів з кафедри «Електроізоляційна і кабельна техніка» НТУ «ХП». Досліджено безгалогенні компаунди фірми Condor Compaunds GmbH.

На рис. 1 представлено характерні залежності відносної деформації видовження зразків від часу одноосного розтягування при різних швидкостях розведення затискачів в процесі нормативної процедури визначення механічних характеристик для безгалогенних кабельних пластмас.

При цьому всі зразки однакові за рецептурою, за параметрами технологічного процесу накладання оболонки в умовах виробництва, за умовами випробування. Різниця між зразками на рис. 1а, 1б, 1с лише в структурі полімеру, яка утворилась в наслідок технологічного процесу накладання оболонки в різних її шарах: внутрішнього чи зовнішнього.

Контроль технологічного процесу накладання полімеру має включати контроль динаміки деформування зразка. На наш погляд саме оцінка відносної деформації видовження зразків по відношенню до поточної довжини зразка $\delta L = \Delta L / L(t)$ (рис. 1) відповідає поставленій меті, оскільки в кожен момент часу t швидкість деформування de/dt залежить від попередніх деформацій.



а – зразки вирізані з внутрішнього шару оболонки середня товщина 1,55 мм; відносне видовження при розриві середнє 60 %; середня міцність при розтягуванні 13,7 МПа;
б – зразки вирізані з зовнішнього шару оболонки середня товщина 1,61 мм; відносне видовження при розриві середнє 48 %; середня міцність при розтягуванні 14,9 МПа;
в – зразки оболонки середня товщина 2,4 мм; відносне видовження при розриві середнє 49 %; середня міцність при розтягуванні 12,1 МПа

Рис. 1. Характерні залежності відносної деформації $\delta L(t) = \Delta L(t)/L(t)$ від часу t одноосного розтягування зразків безгалогенної кабельної пластмаси при різних швидкостях розтягування $V1(\Delta)$ і $V2 = 2 V1(\circ)$, ломана лінія: середні значення $\delta L(t)$ для 5 зразків

Відтак найбільш інформативним є розроблення моделі для кількісної характеристики складових розвитку деформацій для аналізу впливу технології накладання на механічні властивості безгалогенних кабельних пластмас.

Важливо те, що внутрішній і зовнішній шари оболонки кабелю з безгалогенної пластмаси мають суттєво різні значення нормативного параметру пластичності (рис. 2), але так звана міцність при розриві суттєво не відрізняється. Це свідчить про відмінності в структурі полімеру у внутрішніх і зовнішніх шарах оболонки в наслідок технологічного процесу примусового деформування при екструзії, які впливають саме на параметри деформування.

В тому, що на рис. 2 нормативний параметр пластичності δ (elongation at break) має тенденцію до зростання при збільшенні товщини зразка, опосередковано присутній час розтягування, оскільки в будь-якому разі чим більша товщина зразка, тим більше значення максимального розтягувального зусилля P_m , а це означає збільшення часу деформування до розриву при однакових швидкостях розведення затискачів.

В тому, що на рис. 2 зразки з зовнішнього шару оболонки (\bullet) мають суттєво більше відносне видовження при розриві, ніж зразки з внутрішнього (\blacktriangle) при практично однакових значеннях максимального розтягувального зусилля P_m , є свідчення, що структура, наприклад орієнтованість макромолекул в цих шарах різна. Відомо [2], що попередньо орієнтовані полімери в цілому менш крихкі, тобто більш пластичні.

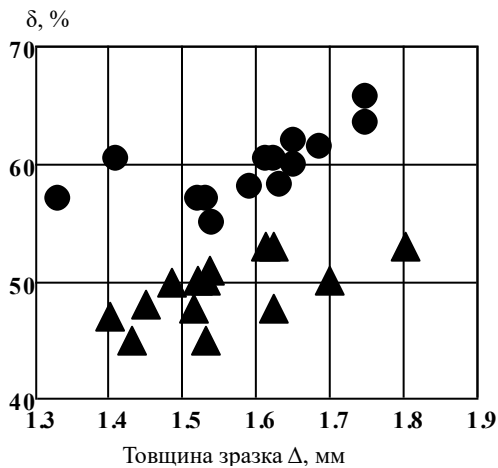


Рис. 2. Залежності відносного видовження при розриві δ від товщини Δ зразка безгалогенної кабельної пластмаси, вирізаного відповідно до напрямку екструзії з внутрішнього (▲) і зовнішнього (●) шарів оболонки, при однакових швидкостях розведення затискачів

Процес деформування в'язкопружних матеріалів є одночасним розвитком пружних, в'язкопружних, пластичних і релаксацийних складових, співвідношення яких впродовж випробування на розтягування змінюються, що ілюструє рис. 1.

Технологічний процес накладання полімеру є примусовим деформуванням (примусовою орієнтацією) при підвищених температурах з подальшим охолодженням в деформованому стані, що ілюструє рис. 2.

Відома модель (1) [2] деформації в'язкопружного тіла при дії напруження, що змінюється безперервно, $t \rightarrow 0$; $d\varepsilon/dt \rightarrow \infty$; $K \rightarrow \infty$, де $K(t)$ – функція впливу пропорційна швидкості повзучості має бути сингулярною, тобто $K(0) \rightarrow \infty$ і швидкість процесів деформування в момент прикладення навантаження має бути нескінченною [3].

Ця умова виключає використання експоненційної функції для моделювання функції впливу [3] і тим самим значно ускладнює застосування моделі в умовах виробництва, не додаючи інформації для аналізу результатів.

Відомі традиційні моделі (Максвелла, Кельвіна-Фойгта та ін.), в яких для моделювання динаміки деформування використовують експоненційні функції. При моделюванні експериментальних результатів, приклад яких наведений на рис. 1, для кількісного опису швидкості деформування зразків при розтягуванні, нами використані саме експоненційні функції, в яких параметр експоненти λ названо відповідно до [3] час пружної післядії деформації $\varepsilon(t)$:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 [1 - \exp(-t/\lambda)]. \quad (2)$$

Диференціювання співвідношення (2) дає можливість визначити функцію впливу в (1) як пропорційну швидкості деформування при заданому значенні напруження σ :

$$K(t) = (E / \sigma) \cdot d\varepsilon/dt [3].$$

Оскільки нормативні випробування на розтягування в умовах виробництва передбачають неперервне зростання напруження, експериментальною кількісною оцінкою швидкості деформування $(d\varepsilon/dt)^*$ в мо-

мент t є відносне видовження зразка впродовж наступного достатньо короткого відрізка часу Δt , зміною напруження σ в якому можна знехтувати:

$$(d\varepsilon/dt)^* = \delta L / \Delta t = [L(t + \Delta t) - L(t)] / L(t) \Delta t, \quad (3)$$

де Δt в принципі може бути як завгодно малим, обмеженим конкретними умовами експерименту; L – довжина контрольної ділянки зразка.

З чотирьох основних названих видів деформації полімерних матеріалів в моделі деформування при короткочасних нормативних випробуваннях на розрив мають бути враховані щонайменше три, а саме: миттєво-пружна, високоеластична (в'язко-пружна або затримана), миттєво-пластична (незворотна).

Миттєво-пружна відповідно до моделі (1) [3] деформації в'язкопружного тіла при $t \rightarrow 0$; $d\varepsilon/dt \rightarrow \infty$, тобто в часі швидкість пружної деформації швидко спадає як і її вплив на подальше деформування експоненційно спадає тобто параметр експоненти $\lambda_{пр}$ (час пружної післядії) малий (умовно кілька секунд при нормативних випробуваннях):

$$d\varepsilon_{пр}/dt = \lambda_{пр} \exp(-t/\lambda_{пр}). \quad (4)$$

В'язко-пружна (затримана) і миттєво-пластична (незворотна) відбуваються одночасно, впливають одна на одну, тому виходячи із принципу суперпозиції, деформацію зразка можна виразити математично як сумарну реакцію в момент часу на елементарні деформації, одна з яких є імпульсною функцією, діючою в момент τ ($0 \leq \tau \leq t$), інша перехідною, а сумарна реакція є інтегралом згортки цих складових [5], що на малому відрізку часу від t до $t + \Delta t$ виражено як відношення:

$$d\varepsilon_{\Sigma}/dt = \{ \int \lambda_1 \exp(-\tau/\lambda_1) \exp[-(t-\tau)/\lambda_2] d\tau \} / \Delta t, \quad (5)$$

де параметри експонент λ_1 і λ_2 відповідно час пружної післядії миттєво-пластичної (незворотної) і в'язко-пружної (затриманої) деформацій, оцінки яких визначено за даними експерименту наступним чином.

Миттєво-пластична незворотня деформація, яка в запропонованій моделі (5) виражена імпульсною функцією, діючою в момент τ ($0 \leq \tau \leq t$), практично непомітна в перші кілька секунд коли основною є миттєво-пружна деформація. В цей період час післядії λ_1 дуже великий, але потім швидко зменшується і коли він стає рівним або меншим Δt , це означає, що у відповідний проміжок часу Δt пластична деформація швидко зростає, а зусилля досягає максимуму в даному конкретному експерименті: ознаки розриву зразка.

Кількісні характеристики розриву: час до розриву, максимальне зусилля перед розривом, відносне видовження при розриві є результатами нормативних випробувань. Відповідно оцінки параметрів складових деформації при розтягуванні можуть бути орієнтовно визначені емпірично за цими результатами.

Параметр миттєво-пружної деформації $\lambda_{пр}$ в перші секунди випробування є визначальним, але швидкість миттєво-пружної деформації (4) експоненційно спадає і вже за кілька секунд проявляється в'язко-пружна (затримана, час післядії λ_2), що зумовлює зростання швидкості деформування розтягуванням (рис. 1). Орієнтовною оцінкою значення $\lambda_{пр}$ прийнято середній

час значення швидкості деформування в перші секунди випробування.

Параметр в'язко-пружної деформації λ_2 оцінений нами лінеаризацією експериментальних даних в період нелінійного спадання відносної деформації $\delta L(t) = \Delta L(t)/L(t)$ від максимального значення швидкості деформування (рис. 1). Параметр миттєво-пластичної (незворотної, час післядії λ_1) (формула (5)) оцінений нами з таких припущень: в момент максимального значення швидкості деформування незворотна пластична деформація практично не впливає на швидкість деформування розтягуванням, але її вплив лінійно зростає з часом так, що становить не більше кількох секунд в момент розриву зразка.

Таким чином, залежність швидкості деформування від часу розтягування як суми миттєво-пружної ($\lambda_{\text{пр}}$ – час післядії, формула (4)) та в'язко-пружної (затриманої, час післядії λ_2) і миттєво-пластичної (незворотної, час післядії λ_1) (формула (5)) виражено сумою:

$$d\epsilon/dt = \lambda_{\text{пр}} \exp(-t/\lambda_{\text{пр}}) + \left\{ \int \lambda_1 \exp(-\tau/\lambda_1) \exp[-(t-\tau)/\lambda_2] d\tau \right\} / \Delta t. \quad (6)$$

Відповідні оцінки названих параметрів, одержані в процесі нормативних випробувань зразків безгалогенної кабельної пластмаси при різних швидкостях розтягування в умовах виробництва наведені в таблиці. Такі оцінки є суто емпіричними, а криві, розраховані за формулою (6) є апроксимацією експериментальних даних, яка дає можливість, по-перше, одержання додаткових кількісних характеристик динаміки розвитку деформації розтягування наповненого полімеру для порівняння впливу рецептурних та технологічних змін в умовах виробництва.

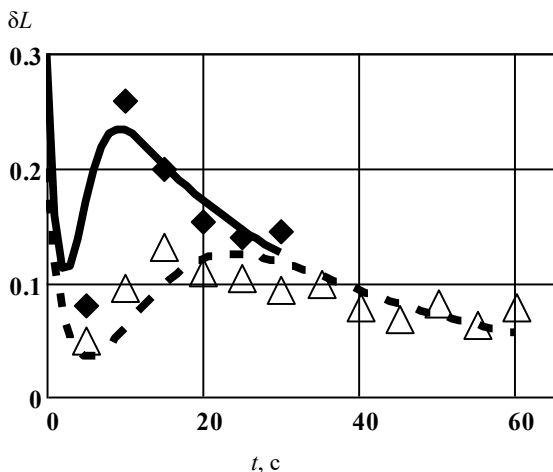


Рис. 3. Залежності середніх значень відносної деформації від часу t одноосного розтягування зразків безгалогенної кабельної пластмаси при різних швидкостях розведення затискачів і результати моделювання відповідних залежностей як суми трьох видів деформування за формулою (6): /хв. ($\delta L_{\text{ср}}$: Δ) і /2 = 100 мм/хв. ($\delta L_{\text{ср}}$: \blacklozenge)

Наприклад, визначення похідних формули (6) дає можливість оцінити вплив швидкості розтягування на час мінімуму і максимуму швидкості деформування, аналізувати внесок складових процесу деформування, тим самим встановлюючи вимоги до

випробування розтягуванням в умовах виробництва і підвищуючи інформаційну цінність цих випробувань.

По-друге, для аналізу впливу технологічних і рецептурних змінних на механічні властивості полімерних матеріалів інформаційний пріоритет має саме аналітична модель динаміки деформування зразка.

На рис. 3 видно, що запропонована модель (6) не тільки пропонує пояснення наявності максимуму відносної деформації як суперпозиції двох взаємозалежних процесів деформування з різним часом післядії λ , але й дозволяє уточнювати вимоги до проведення експерименту: із збільшенням швидкості розведення затискачів час максимуму t_m значно зменшується. В такому разі максимум може бути зафіксований експериментально лише при суттєвому зменшенні відрізка часу від t до $t + \Delta t$ в (5), що експериментально підтверджено для конкретного матеріалу при швидкості 250 мм/хв.

Таблиця – Емпіричні оцінки параметру інтенсивності в'язко-пружної деформації $1/\lambda_2$ (формула 5) безгалогенної кабельної пластмаси при розтягуванні зразків з технологічними відмінностями, характерними для умов виробництва

Швидкість розтягування	Внутрішній шар оболонки $\Delta_{\text{ср}}=1,55$ мм	Зовнішній шар оболонки $\Delta_{\text{ср}}=1,61$ мм	Оболонка $\Delta_{\text{ср}}=2,40$ мм
	Інтенсивність деформації $1/\lambda_2, \text{с}^{-1}$		
50 мм/хв.	0,022	0,023	0,019
100 мм/хв.	0,048	0,051	0,037

Висновки. 1. Результати оцінки швидкості деформації видовження зразків від часу одноосного розтягування при різних швидкостях розведення затискачів в процесі процедури визначення механічних характеристик для безгалогенних кабельних пластмас при нормативних випробуваннях в умовах виробництва свідчать, що залежність відносного видовження $\delta L(t)$ зразків від часу одноосного розтягування має відтворену характерну форму з мінімумом і максимумом для відмінних за структурою подібних наповнених безгалогенних полімерів. При цьому внутрішній і зовнішній шари оболонки кабелю з безгалогенної пластмаси мають суттєво різні значення нормативного параметру пластичності. Це свідчить про відмінності в структурі полімеру у внутрішніх і зовнішніх шарах оболонки в наслідок технологічного процесу примусового деформування при екструзії.

2. Запропоновано модель залежності швидкості деформування від часу розтягування як суми миттєво-пружної, в'язко-пружної і миттєво-пластичної (незворотної) деформацій: $d\epsilon/dt = \lambda_{\text{пр}} \exp(-t/\lambda_{\text{пр}}) + \left\{ \int \lambda_1 \exp(-\tau/\lambda_1) \exp[-(t-\tau)/\lambda_2] d\tau \right\} / \Delta t$. Наведені відповідні оцінки параметрів названих складових, одержані при апроксимації експериментальних даних запропонованою моделлю.

3. Запропонована модель, по-перше, дає пояснення наявності характерного максимуму ($t = t_m$) відносної деформації як суперпозиції двох взаємозалежних процесів деформування з різним часом післядії λ . По-друге, дозволяє уточнювати вимоги до проведення випробувань: із збільшенням швидкості розведення

затискачів час максимуму t_m суттєво зменшується, відповідно чим більша швидкість розведення затискачів, тим меншим має бути відрізок часу Δt між послідовними вимірюваннями довжини контрольної ділянки зразка.

4. Аналітична модель динаміки деформування зразка дає можливість оцінити вплив швидкості розтягування на час мінімуму і максимуму швидкості деформування, аналізувати внесок складових процесу деформування, тим самим встановлюючи вимоги до випробування розтягуванням в умовах виробництва і підвищуючи інформаційну цінність цих випробувань.

Список літератури

- 1 IEC 60811-501:2012. *Electric and optical fibre cables – Test methods for non-metallic materials – Part 501: Mechanical tests – Test for determining the mechanical properties of insulating and sheathing compounds.*
- 2 Шидловський М.С.. *Нові матеріали: частина 1. Структура і механічні властивості конструкційних полімерів.* Навчальний посібник для вузів. Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Скоропадського.

2017. 192 с.

- 3 Л.А. Щебенюк, С.А. Рябинин, А.И. Стурченко. К анализу зависимости механического напряжения от времени одноосного растяжения для образцов высоконаполненных антипиренами ПВХ-пластикатов // *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2014. № 24. с. 19 – 21.
- 4 Сигорский В.П. *Математический аппарат инженера.* Киев: Техніка. 1975. 768 с.

References (transliterated)

- 1 IEC 60811-501:2012. *Electric and optical fibre cables – Test methods for non-metallic materials – Part 501: Mechanical tests – Test for determining the mechanical properties of insulating and sheathing compounds.*
- 2 Shchidlovskij M.S. *Novi materialy: chastyna 1. Struktura i mekhanichni vlastyivosti konstruktivnykh polimeriv* [New materials: part 1. Structure and mechanical properties polymer]. Kyiv: Polytechnic Institute Publ., 2017. 192 p.
- 3 Shchebeniuk L.A., Rjabinin S.A., Sturchenko A.I. The analysis of dependence mechanical tensile stress of filled PVC-polymers with time elongation. *Bulletin NTU “KhPI”*. 2014. no 24/ p. 19 – 21.
- 4 Sigorsky V.P. *Matematicheskij aparat inzhenera* [Mathematical device of engineer]. Kyiv: Technique. 1975. 768 p.

Надійшла (received) 28.10.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Золотарьов Володимир Володимирович (Золотарев Владимир Владимирович, Zolotarev Vladimir Vladimirovich) – кандидат технічних наук, директор департаменту ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків; тел.: 728-12-48; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua

Голик Оксана Вячеславівна (Голик Оксана Вячеславовна, Golik Oksana Vjacheslavovna) – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Електроізоляційна та кабельна техніка» Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", м. Харків; тел.: 707-65-44; e-mail: agurin@kpi.kharkov.ua.

Москвітін Євген Сергійович (Москвитин Евгений Сергеевич, Moskvitin Eugene Sergiyovich) – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри «Електроізоляційна та кабельна техніка» Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", м. Харків; тел.: 707-60-10; e-mail: moskvitin@kpi.kharkov.ua

Зиков Микола Борисович (Зыков Николай Борисович, Zykov Mykola Borysovych) – начальник ЦЗЛ ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків; тел.: 754-52-04; e-mail: lab@yuzhcable.com.ua

Шурупова Аліна Альбертівна (Шурупова Алина Альбертовна, Shurupova Alina Albertovna) – начальник лабораторії випробувань пластмас ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків; тел.: 754-52-04; e-mail: lab@yuzhcable.com.ua

Щебенюк Леся Артемівна (Щебенюк Леся Артемовна, Shchebeniuk Lesia Artemovna) – кандидат технічних наук, професор кафедри «Електроізоляційна та кабельна техніка» Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", м. Харків; тел.: 707-65-44; e-mail: agurin@kpi.kharkov.ua.

Васильєва Оксана Володимирівна (Васильева Оксана Владимировна, Vasylieva Oksana Volodymyrivna) – начальник лабораторії, ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua

В.П. КАЛІНЧИК, В.А. ПОБИГАЙЛО, В.В. КАЛІНЧИК, В.Г. СКОСИРЕВ

УПРАВЛІННЯ РЕЖИМОМ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

В статті досліджуються методи управління режимами реактивної потужності. Показано, що забезпечення економічності передачі та розподілу електроенергії невіддільне від постановки та вирішення задач, пов'язаних із зниженням втрат електроенергії в мережах. Причому одним із найбільш ефективним способом зниження втрат електроенергії, а також підвищення її якості на затискачах електроприймачів є компенсація реактивної потужності, яка здійснюється за допомогою різних компенсуючих пристроїв. Показано, що управління режимом реактивної потужності здійснюється відповідно до Методики обчислення плати за перетікання реактивної енергії між електропередавальною організацією та її споживачами. Показано, що індикатором економічно вигідної величини рівня споживання реактивної енергії може бути $\cos \varphi$, величина якого попередньо задається. Процедура управління режимом реактивної потужності містить два основних етапи: етап визначення величини можливого зниження поточного $\cos \varphi$ над заданим та етап визначення та реалізації управляючих впливів, направлених на ліквідацію можливого відхилення. Переважно кращою представляється орієнтація на ті методи, які ґрунтуються на дослідженні прогнозних оцінок, що складають вихідну інформацію для прийняття рішень по управлінню. За основу для оперативного прогнозування електричного навантаження доцільно використовувати адаптивні методи експоненціального згладжування. Управління режимом реактивної потужності здійснюється за допомогою компенсуючих установок. Показано, що управління режимами напруги в системі електропостачання суттєво впливає на режими споживання реактивної потужності. В зв'язку з цим доцільне комплексне вирішення проблеми управління режимом реактивної потужності як за рахунок управління компенсуючими установками, так і впливу на режими напруги системи електропостачання. В розрахунковій моделі реактивне навантаження розподільної мережі задається своїми статичними характеристиками, які можуть бути основою для регулювання режимного навантаження. Для здійснення регулювання в центрах живлення електричних мереж передбачаються технічні засоби на основі змінення коефіцієнта трансформації або генерації реактивної потужності шляхом зустрічного регулювання напруги.

Ключові слова: реактивна потужність, прогнозування, управління, перетікання реактивної енергії, зустрічне регулювання, статичні характеристики.

В.П. КАЛІНЧИК, В.А. ПОБИГАЙЛО, В.В. КАЛІНЧИК, В.Г. СКОСИРЕВ

УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМОМ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В статье исследуются способы управления режимами реактивной мощности. Показано, что обеспечение экономичности передачи и распределения электроэнергии неотделимо от постановки и решения задач, связанных со снижением потерь электроэнергии в сетях. Причем одним из наиболее эффективных способов снижения потерь электроэнергии, а также повышения ее качества на зажимах электроприемников, является компенсация реактивной мощности, которая осуществляется с помощью различных компенсирующих устройств. Показано, что управление режимом реактивной мощности осуществляется в соответствии с Методикой вычисления платы за перетекание реактивной энергии между электропередающей организацией и ее потребителями. Показано, что индикатор экономической выгоды величины уровня потребления реактивной энергии может быть $\cos \varphi$, величина которого предварительно задается. Процедура управления режимом реактивной мощности содержит два основных этапа: этап определения величины возможного снижения текущего $\cos \varphi$ над заданным и этап определения и реализации управляющих воздействий, направленных на ликвидацию возможного отклонения. Предпочтительно предпочтительна ориентация на те методы, которые основываются на исследовании прогнозных оценок, составляющих исходную информацию для принятия решений по управлению. За основу оперативного прогнозирования электрической нагрузки целесообразно использовать адаптивные методы экспоненциального сглаживания. Управление режимом реактивной мощности осуществляется посредством компенсирующих установок. Показано, что управление режимами напряжения в системе электроснабжения оказывает существенное влияние на режимы потребления реактивной мощности. В этой связи целесообразно комплексное решение проблемы управления режимом реактивной мощности как за счет управления компенсирующими установками, так и влияния на режимы напряжения системы электроснабжения. В расчетной модели реактивная нагрузка распределительной сети задается своими статическими характеристиками, которые могут служить основой для регулирования реактивной нагрузки. Для регулирования в центрах питания электрических сетей предусматриваются технические средства на основе изменения коэффициента трансформации или генерации реактивной мощности путем встречной регулировки напряжения.

Ключевые слова: реактивная мощность, прогнозирование, управление, перетекание реактивной энергии, встречное регулирование, статические характеристики.

V.P. KALINCHUK, V.A. POBIGAYLO, V.V. KALINCHUK, V.G. SKOSIREV

REACTIVE POWER CONTROL

The article investigates the methods of control of reactive power modes. It is shown that ensuring the efficiency of electricity transmission and distribution is inseparable from setting and solving problems related to reducing electricity losses in networks. Moreover, one of the most effective ways to reduce electricity losses, as well as improve its quality at the terminals of electrical receivers is to compensate for reactive power, which is carried out using various compensating devices. It is shown that the control of the reactive power mode is carried out in accordance with the Methodology for calculating the fee for the flow of reactive energy between the power transmission organization and its consumers. It is shown that the indicator of economically advantageous value of the level of reactive energy consumption can be $\cos \varphi$, the value of which is predetermined. The procedure for controlling the reactive power mode contains two main stages: the stage of determining the magnitude of the possible reduction of the current $\cos \varphi$ above the set and the stage of determining and implementing control effects aimed at eliminating possible deviations. Preferably, it is preferable to focus on those methods that are based on the study of forecast estimates, which constitute the source information for management decisions. It is expedient to use adaptive methods of exponential smoothing as a basis for operative forecasting of electric loading. Reactive power mode is controlled by compensating units. It is shown that the control of voltage modes in the power supply system significantly affects the modes of reactive power consumption. In this regard, it is advisable to comprehensively solve the problem of reactive power control both by controlling the compensating units and the impact on the voltage regimes of the power supply system. In the calculation model, the reactive load of the distribution network is given by its static characteristics, which can be the basis for regulating the reactive load. To implement regulation in the power supply centers of electrical networks, technical means are provided on the basis of changing the transformation coefficient or generating reactive power by counter-voltage regulation.

Key words: reactive power, forecasting, control, reactive energy flow, counter regulation, static characteristics.

Вступ. Забезпечення економічності передачі та розподілу електроенергії невіддільне від постановки та вирішення задач, пов'язаних із зниженням втрат електроенергії в мережах. Одним із найбільш ефективним способом зниження втрат електроенергії, а також підвищення її якості на затискачах електроприймачів є компенсація реактивної потужності, яка здійснюється за допомогою різних компенсуючих пристроїв [1-4]. Задача компенсації реактивної потужності має два основних аспекти. Перший аспект охоплює питання проєктного характеру, другий – експлуатаційний і на сьогоднішній день представляється більш важливим. Метою функціонування систем управління реактивною потужністю є мінімізація втрат електричної енергії з урахуванням необхідності забезпечення заданих енергопостачальною компанією умов споживання реактивної потужності.

Постановка задачі управління режимом реактивної потужності. Відповідно до Методики обчислення плати за перетікання реактивної енергії між електропередавальною організацією та її споживачами [5], основна плата за спожиту і генеровану реактивну електроенергію визначається формулою

$$P = \sum_{i=1}^n (W_{QCP} + KW_{QG})DT \text{ (грн)}, \quad (1)$$

де n - число точок розрахункового обліку реактивної енергії; W_{QCP} - споживання реактивної енергії в точці обліку за розрахунковий період, кВАр*год.; W_{QG} - генерація реактивної енергії в мережу електропередавальної організації в точці обліку за розрахунковий період, кВАр*год.; $K=3$ - нормативний коефіцієнт урахування збитків енергосистеми від генерації реактивної електроенергії з мережі споживача; D - економічний еквівалент реактивної потужності (ЕЕРП), кВт/кВАр; T - фактична середня закупівельна ціна на електроенергію, що складалася за розрахунковий період (розраховується відповідно до нормативних документів НКРЕ), грн./кВт.год. Таким чином мінімальна плата за реактивну енергію буде тоді, коли W_{QCP} і W_{QG} будуть мінімальні (близькі до нуля). Проте досягти нульових значень споживання і генерації реактивної енергії практично не можливо, тому можна обмежитись деякою економічно вигідною величиною. Індикатором такої величини може бути $\cos \varphi_z$, величина якого попередньо задається.

Звідси випливає, що процедура управління режимом реактивної потужності пов'язана з контролем активної потужності.

Процедура управління режимом реактивної потужності містить два основних етапи: етап визначення величини можливого зниження поточного $\cos \varphi$ над заданим та етап визначення та реалізації управляючих впливів, направлених на ліквідацію можливого відхилення. Переважно кращою представляється орієнтація на ті методи, які ґрунтуються на дослідженні прогнозних оцінок, що складають вихідну інформацію для прийняття рішень по управлінню.

За основу для оперативного прогнозування електричного навантаження доцільно використовувати адаптивні методи експоненціального згладжування [5-9], що узгоджується із даними проведеного в роботі [9] аналізу різних методів оперативного прогнозування.

Процес споживання активної та реактивної енергії розглядається як модель лінійного росту, для опису

якої вибрано поліном виду

$$x_t = a_{0,t} + a_{1,t} \cdot t + \varepsilon_t$$

де $a_{0,t}$, $a_{1,t}$ – коефіцієнти поліному, ε_t – випадкові незалежні відхилення (“білий шум”).

Тоді, прогнозним значенням процесу буде

$$\hat{x}_t(t) = \hat{a}_{0,t} + \tau \hat{a}_{1,t}, \quad (2)$$

де $\hat{a}_{0,t}$, $\hat{a}_{1,t}$ – поточні оцінки коефіцієнтів поліному; τ – крок випередження ($\tau = 1, 2, 3, \dots$).

Оцінки коефіцієнтів $\hat{a}_{0,t}$ і $\hat{a}_{1,t}$ знаходяться

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} \hat{a}_{0,t} \\ \hat{a}_{1,t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S_t^{[1]} - S_t^{[2]} \\ \alpha(S_t^{[1]} - S_t^{[2]}) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де $S_t^{[1]}$ та $S_t^{[2]}$ – експоненціальні середні; α – постійна згладжування ($0 < \alpha < 1$); $\beta = 1 - \alpha$.

З урахуванням сказаного модель прогнозування електроспоживання представляється у вигляді

$$\hat{E}_t^T = \hat{x}_t(t) = \left(2 + \frac{\alpha}{\beta} \tau\right) S_t^{[1]} - \left(1 + \frac{\alpha}{\beta} \tau\right) S_t^{[2]}, \quad (4)$$

в якій експоненціальні середні $S_t^{[1]}$ та $S_t^{[2]}$ знаходяться із виразу

$$\left. \begin{aligned} S_t^{[1]} &= \alpha x_t + \beta S_{t-1}^{[1]}; \\ S_t^{[2]} &= \alpha S_t^{[1]} + \beta S_{t-1}^{[2]} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де x_t - останнє значення ряду.

Початкові умови $S_0^{[1]}$ та $S_0^{[2]}$ визначаються через початкові значення вектору \hat{a}

$$\left. \begin{aligned} S_0^{[1]} &= \hat{a}_{0,0} - \frac{\beta}{\alpha} \hat{a}_{1,0}; \\ S_0^{[2]} &= \hat{a}_{0,0} - 2 \frac{\beta}{\alpha} \hat{a}_{1,0}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Оцінки параметрів моделі $\hat{a}_{0,0}$ та $\hat{a}_{1,0}$ по n точках знаходяться із виразу

$$\left. \begin{aligned} \hat{a}_{0,0} &= \frac{2(2n+1)}{n(n-1)} \sum_{t=1}^n x_t - \frac{6}{n(n-1)} \sum_{t=1}^n t x_t; \\ \hat{a}_{1,0} &= \frac{12}{n(n^2-1)} \sum_{t=1}^n t x_t - \frac{6}{n(n-1)} \sum_{t=1}^n x_t \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Якість розглянутої моделі прогнозування суттєво залежить від вибору постійної згладжування α . З одного боку, для збільшення ваги пізніших спостережень необхідно підвищувати значення постійної α . З іншого боку, для зменшення впливу відхилень постійна α повинна бути малою. Це протиріччя усувається шляхом адаптації постійної згладжування α [10].

Постійна згладжування α визначається як модуль сигналу слідкування

$$\alpha(t) = \left| \frac{Q_t}{\Delta_t} \right| \quad (8)$$

де Q_t - згладжена похибка прогнозу, Δ_t - згладжене абсолютне відхилення

$$\left. \begin{aligned} Q_t &= \gamma e_t + (1 - \gamma) Q_{t-1}; \\ \Delta_t &= \gamma |e_t| + (1 - \gamma) \Delta_{t-1} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

де e_t - похибка прогнозу, γ - постійна згладжування ($0 < \gamma < 1$)

Початкові умови

$$\left. \begin{aligned} Q_0 &= 0; \\ \Delta_0 &= 2 \sqrt{\frac{\hat{D}(\varepsilon)}{\pi(2-\alpha)}} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

де $\hat{D}(\varepsilon)$ - початкова оцінка дисперсії похибки.

Стратегія такої адаптації ґрунтується на тому, що збільшення постійної згладжування α здійснюється при збільшенні сигналу слідкування, в результаті чого підвищується вага останнього значення ряду.

В запропонованій моделі прогнозування параметрів електроспоживання перші n точок ряду використовуються для визначення початкових умов із виразів (6), (7), (10). Далі модель "повертається" у вихідну точку і виконується прогнозування з інтервалом випередження на один крок з метою адаптації постійної α . Експериментальні дослідження показали, що модель адаптується до реальних даних вже на $4 \div 6$ кроці прогнозування і далі похибка прогнозу не перевищує 2 % [5-8]. Тому період контролю T розбивається на два інтервали: інтервал адаптації моделі прогнозування Θ та інтервал управління ($T - \Theta$). Крок управління $\Delta t = T/N$ (N - число кроків управління в період T). На перших $n = N - \tau$ кроках виконується адаптація постійної α , а на останніх τ кроках виконується управління електроспоживанням.

Починаючи з першого кроку управління (в інтервалі $T - \Theta$) по формулі (4) визначається прогнозна величина активного $\hat{W}_{\text{РСП}}^T$ та реактивного $\hat{W}_{\text{QСП}}^T$ електроспоживання до кінця періоду контролю T . Визначається величина прогнозованої економічно вигідної величини реактивного електроспоживання як

$$W_{\text{QСП доп}} = \hat{W}_{\text{РСП}}^T * \cos \varphi_3. \quad (11)$$

Необхідність дії на режим реактивної потужності виникає в тому випадку коли

$$\hat{W}_{\text{QСП}}^T - W_{\text{QСП доп}} > 0, \quad (12)$$

де $\hat{W}_{\text{QСП}}^T$ – прогнозне до кінця періоду T значення реактивного електроспоживання; $W_{\text{QСП доп}}$ – допустиме значення, яке визначається на основі заданого $\cos \varphi_3$.

Управління режимом реактивної потужності здійснюється за допомогою компенсуючих установок (КУ в основному – конденсаторних батарей). Проте в мережі промислового підприємства може бути регулювання активного електроспоживання зміною напруги, що необхідно враховувати при управлінні компенсуючими установками. Як показують дослідження [11-13] управління режимами напруги в системі електропостачання (СЕ) суттєво впливає на режими споживання реактивної потужності.

В зв'язку з цим доцільне комплексне вирішення проблеми управління режимом реактивної потужності як за рахунок управління КУ, так і впливу на режими напруги СЕ.

Змінення напруги як засіб регулювання реактивного навантаження. В розрахунковій моделі реактивне навантаження розподільної мережі задається своїми статичними характеристиками

$$Q = F(U, \varpi). \quad (13)$$

Вираз (13) часто апроксимується поліномом виду [14]

$$Q = 1 - a_q - b_q - c_q + a_q U + b_q U^2 + c_q \varpi, \quad (14)$$

коефіцієнти a_q, b_q, c_q - постійні.

Регулюючий ефект реактивного навантаження по напрузі при постійній частоті k_{qU} досить повно характеризує зміни навантаження при малих відхиленнях напруги. Із визначення регулюючого ефекту випливає, що у виразі (14)

$$a_q + 2b_q = k_{qU}, c_q = k_q. \quad (15)$$

Розв'язання задачі формування статичних характеристик можливе двома способами: через здійснення активних експериментів та основі інтегрування статичних характеристик окремих споживачів. Орієнтація на другий спосіб можлива при обмеженому числі різнотипних електроприймачів. Тому в даній роботі статичні характеристики будемо отримувати через здійснення експериментів.

Регулювання напруги розподільних мереж можна здійснювати шляхом змінення коефіцієнтів трансформації силових трансформаторів; ступеня збудження вольтдобавочних уставок; шляхом обмеження перетоків потужності; подовжньою компенсацією.

В залежності від того, на якому рівні мережі використовують технічні засоби регулювання напруги, їх можна віднести:

а) до засобів централізованого регулювання напруги, які дозволяють а) до засобів централізованого регулювання напруги, які дозволяють змінювати рівень напруги на шинах центрів живлення (головні понижуючі підстанції – ГПП, центральні розподільчі пункти – ЦРП);

б) до засобів місцевого регулювання напруги, якими забезпечуються розподільчі мережі, як правило, промислових підприємств (трансформаторні підстанції – ТП, розподільчі пункти – РП).

Для здійснення регулювання в центрах живлення електричних мереж передбачаються технічні засоби на основі змінення коефіцієнта трансформації або генерації реактивної потужності шляхом зустрічного регулювання напруги [15].

Рекомендується [15] пониження напруги на 5 ... 10 %. Ефективним способом досягнення цього є використання засобів регулювання напруги під навантаженням (РПН), якими забезпечуються силові трансформатори. РПН забезпечують регулювання в межах 12 % ($8 \times 1,5$ %) для напруги 35 кВ та 16 % ($9 \times 1,78$ %) – для напруги 110 кВ та вище.

Для регулювання напруги в центрах живлення застосовують також синхронні компенсатори або конденсаторні установки [15-17]. Батарею конденсаторів (БК) включають по поперечній або по подовжній схемі. Для ступінчатого регулювання БК розбивають на окремі секції, які включають або відключають комутаційною апаратурою.

Для місцевого регулювання напруги застосовуються: лінійні регулятори; конденсаторні установки; розподільні трансформатори з РПН [14]. Лінійні регулятори використовують для незалежного регулювання напруги для частини споживачів аналогічно як для ЦРП. Ефективність лінійних регуляторів особливо проявляється в мережах великої довжини з дротами малого перетину.

Висновки

1. Одним із найбільш важливих напрямків підвищення техніко-економічної ефективності компенсації реактивної потужності в електричних мережах є реалізація диференційованого контролю за режимами реактивної потужності та управління КУ.

2. Показано, що доцільними є управління режимом реактивної потужності як за рахунок управління конденсаторними батареями, так і за рахунок впливу на режими напруги системи електропостачання.

3. В розрахунковій моделі навантаження мережі задається статичними характеристиками.

Список літератури

- 1 Железко Ю.С. *Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии*. Москва: Энергоатомиздат, 1985. 224 с.
- 2 Пекелис В.Г. *Перспективы применения поперечной емкостной компенсации в электрических сетях энергосистем и промышленных предприятий*. Минск: БелНИИИТИ, 1984. 48 с.
- 3 Воротничкий В.Э., Железко Ю.С., Казанцев В.Н. и др. *Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем*. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 368 с.
- 4 Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов ЭНАС. 2013. 456 с.
- 5 Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії. Наказ по Міненерго України. 30.11.2020 № 764. [Електронний ресурс]. 2021. 18 с. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0109-21#Text>
- 6 Праховник А.В., Розен В.П., Дегтярев В.В. Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий. М.: Недра, 1985. 232 с.
- 7 Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов: Учеб. пособие. М.: Финансы и статистика, 2003. 416 с.
- 8 Прогнозирование показателей энергопотребления, генерации и стоимости полученной энергии/ Калинин В.П., Кокорина М.Т.: НТУУ „КПИ” Н.-и. ин-т автоматки и энергетки «Энергия». Киев, 2013. 14 с.: ил. – Библиогр.: 7 назв. – Рус. – Деп. в ГНТБ Украины 22.07.13, № 35– Ук 2013.
- 9 Калинин В.П., Буравльова М. Т., Калинин В.В., Скосирев В.Г. Прогнозування показників енергоспоживання, генерації і вартості отриманої енергії. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2020. - Том 31 (70) № 2, Частина 1. – С.243-249.
- 10 Trigg D.W., Leach A.G. Exponential smoothing with an adaptive response rate // Oper. Res. Quart. – 1967. – Vol. 18. – No. 1.
- 11 Автоматизированная система оперативно-диспетчерского управления электроэнергетическими системами / О.Н.Войтов, Н.В. Воронов, А.З. Тамм и др. Под ред. М.Н.Розанова и В.А. Семенова. - Новосибирск: Наука, 1986. 205 с.
- 12 А.с. № 1334269. Способ управления потреблением электроэнергии предприятия / Праховник А.В., Кудовбенко К.П., Калинин В.П. - Оpubl. в Б.И., - 1987, - № 32.
- 13 Маркушевич Н.С. Регулирование напряжения и экономия электроэнергии. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 100 с.
- 14 Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Хачатрян Э.А. Устойчивость нагрузки электрических систем. – М.: Энергоиздат, 1981. – 234с.
- 15 Петренко Л.И. Электрические сети и системы. – К.: Вища школа, 1981.–380 с.
- 16 Жежеленко И.В., Рабинович М.Л., Божко В.М. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. – К.: Техніка, 1981. – 220 с.
- 17 Лежнюк, П. Д., О. М. Нанака. Формування умов оптимальності компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживачів і енергопостачальних компаній : монографія – Вінниця:

ВНТУ, 2015. – 148 с.

References (transliterated)

- 1 Zhelezko Ju.S. *Kompensacija reaktivnoj moshhnosti i povyshenie kachestva jelektroenergii*. Moscow: Energoatomizdat, 1985. 224 p.
- 2 Pekelis V.G. *Perspektivy primeneniya poperechnoj emkostnoj kompensacii v jelektricheskikh setjah jenergosistem i promyshlennykh predpriyatij*. Minsk: BelNIINTI, 1984. 48 p.
- 3 Poteri jelektroenergii v jelektricheskikh setjah jenergosistem / V.Je. Vorotnickij, Ju.S. Zhelezko, V.N.Kazancev i dr. Moscow: Energoatomizdat. 1990. Pp.50-51.
- 4 Zhelezko, Ju.S. Poteri jelektroenergii. Reaktivnaja moshhnost'. *Kachestvo jelektroenergii: Rukovodstvo dlja prakticheskikh raschetov JeNAS*. 2013. 456 p.
- 5 Metodika obchislennâ plati za peretikannâ reaktivnoï elektroenergii. *Nakaz po Minenergo Ukraïni*. 30.11.2020, 764. [Elektronnij resurs]. 2021. 18 p. Režim dostupu: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0109-21#Text>
- 6 Prahovnik A.V., Rozen V.P., Degtjarev V.V. *Jenergosberegajushhie rezhimy jelektrosnabzhenija gornodobyvajushhijh predpriyatij*. Moscow: Nedra, 1985. 232 p.
- 7 Lukashin Ju.P. *Adaptivnye metody kratkosrochnogo prognozirovanija vremennykh rjadov: Ucheb. posobie*. Moscow: Finansy i statistika, 2003. 416 p.
- 8 Kalinchik V.P., Kokorina M.T. *Prognozirovanie pokazatelej jenergotrebleniya, generacii i stoimosti poluchЕННОj jenerгии: NTUU „KPI” N.-i. in-t avtomatiki i jenergetiki «Jenergiya»*. Dep. v GNTB Ukrainy 22.07.13, 35, Kiev, 2013. 14 p.
- 9 Kalinchyk V.P., Burav'lova M. T., Kalinchyk V.V., Skosyrev V.H. *Prohnozuvannâ pokaznykiv enerhospozhyvannâ, heneratsii i vartosti otrymanoï enerhiï. Vcheni zapysky Tavriis'koho natsional'noho universytetu imeni V.I. Vernads'koho. Seriiâ: tekhnichni nauky*. 2020. Tom 31 (70), 2, Chastyna 1. Pp. 243-249.
- 10 Trigg D.W., Leach A.G. *Exponential smoothing with an adaptive response rate*. Oper. Res. Quart. 1967. Vol. 18. No. 1.
- 11 *Avtomatizirovannaja sistema operativno-dispatcherskogo upravlenija jelektroenergeticheskimi sistemami / O.N.Vojtov, N.V. Voronov, A.Z. Tamm i dr. Pod red. M.N.Rozanova i V.A. Semenova*. Novosibirsk: Nauka, 1986. 205 p.
- 12 А.с. № 1334269. *Sposob upravlenija potrebleniem jelektroenergii predpriyatija*. Prahovnik A.V., Kudovbenko K.P., Kalinchik V.P. Opubl. v B.I., 1987, No 32.
- 13 *Markushevich N.S. Regulirovanie naprjazhenija i jekonomija jelektroenergii*. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 100 p.
- 14 *Gurevich Ju.E., Libova L.E., Hachatryan Je.A. Ustojchivost' nagruzki jelektricheskikh sistem*. Moscow: Energoizdat, 1981. 234 p.
- 15 *Petrenko L.I. Jelektricheskie seti i sistemy*. Kyiv: Vishha shkola, 1981. 380 p.
- 16 *Zhezhenko I.V., Rabinovich M.L., Bozhko V.M. Kachestvo jelektroenergii na promyshlennykh predpriyatijah*. Kyiv: Tehnika, 1981. 220 p.
- 17 *Lezhnyuk P. D., Nanaka O. M. Formuvannia umov optimalnosti kompensacii reaktyvnoi potuzhnosti v elektrychnykh merezakh spozhyvachiv i enerhopostachalnykh kompanii : monohrafiia Vynnytsia : VNTU, 2015. 148 p.*

Надійшла (received) 09.09.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

Побігайло 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. e-mail: pobigaylo@gmail.com.

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

Скосирев Віктор Георгійович (Скосырев Виктор Георгиевич, Skosyrev Viktor Heorhiiovych) – кандидат технічних наук, доцент кафедри систем автоматизації та електроприводу Державного вищого навчального закладу «Приазовський державний технічний університет», тел.: (067) 209-87-26

Е.Д. КИМ, Я.Е. КОРОСТЕЛЕВ

НАПРЯЖЕНИЕ КАК ПАРАМЕТР ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ОПН

Рассматривается альтернативный метод диагностики ограничителей перенапряжений (ОПН) на основе оксида цинка – варистора в полевых условиях, параметром контроля которого принимается напряжение на разряднике. В качестве датчика измерения напряжения предложен конденсатор, присоединяемый последовательно к разряднику. Электрическое старение активных элементов – варисторов, ухудшение изоляции покрышки разрядника и другие виды электрического повреждения приведут к увеличению напряжения на конденсаторе, величина которого может быть измерена непосредственно или запасенная на конденсаторе энергия, преобразованная в электромагнитное излучение, зарегистрировано дистанционно соответствующими радиоволновыми приемниками. Последовательно присоединенный к ОПН конденсатор также служит элементом ограничения тока утечки в рабочем режиме в течение всего периода эксплуатации разрядника. Простейшим, вместе с тем надежным индикатором может служить стандартный стеклянный (керамический) изолятор тарельчатого типа, зашунтированный искровым промежутком, таким образом, представляющий собой слаботочный искровой разрядник с наперед заданным пороговым напряжением срабатывания. С использованием современных технологий может быть разработана система непрерывного отслеживания за состоянием разрядников и определения месторасположения повреждаемого разрядника, что особенно актуально при обслуживании отдаленных электрических сетей, оснащенных такого рода защитными от перенапряжений аппаратами.

Ключевые слова: ограничитель перенапряжений, варистор, мониторинг, электрическое старение, токи утечки, накопитель электрической энергии, искровой разряд.

Є.Д. КИМ, Я.Є. КОРОСТЕЛЄВ

НАПРУГА ЯК ПАРАМЕТР ДІАГНОСТИКИ СТАНУ ОПН

Розглядається альтернативний метод діагностики обмежувачів перенапруг (ОПН) на основі оксиду цинку - варистора в польових умовах, параметром контролю якого приймається напруга на розряднику. Як датчик вимірювання напруги запропоновано конденсатор, що приєднується послідовно до розряднику. Електричне старіння активних елементів - варисторів, погіршення ізоляції покриття розрядника і інші види електричного пошкодження приведуть до збільшення напруги на конденсаторі, величина якого може бути виміряна безпосередньо або збережена на конденсаторі енергія, перетворена в електромагнітне випромінювання, зареєстровано дистанційно відповідними радіохвильовими приймачами. Послідовно приєднаний до ОПН конденсатор також служить елементом обмеження струму витoku в робочому режимі протягом всього періоду експлуатації розрядника. Найпростішим, разом з тим надійним індикатором може служити стандартний скляний (керамічний) ізолятор тарельчастого типу, зашунтований іскровим проміжком, таким чином, представляє собою слабострумний іскровий розрядник з наперед заданим пороговим напругою спрацьовування. З використанням сучасних технологій може бути розроблена система безперервного відстеження за станом розрядників і визначення місця розташування ушкодженого розрядника, що особливо актуально при обслуговуванні віддалених електричних мереж, оснащених такого роду захисними від перенапруг аппаратами.

Ключові слова: обмежувач перенапруг, варистор, моніторинг, електричне старіння, струми витoku, накопичувач електричної енергії, іскровий розряд.

E.D. KIM, I.E. KOROSTELEV

VOLTAGE CHARACTERISTIC AS A PARAMETER FOR SURGE ARRESTER DIAGNOSING

An alternative method for field MOV surge arresters diagnosing was observed, the controlled characteristic was the surge voltage of a gap arrester. The condenser that was connected in series with gap arrester was applied as voltage measurement sensor. Electrical aging of active elements (MOV), surge arrester insulation degradation and other types of electric faults causes to voltage increase at capacitor. The voltage value can be measured directly or the energy stored in capacitor can be transformed to electromagnetic signal and, then, registered remotely by specific radio transceiver. The capacitor connected in series with the surge arrester can also be used for leakage current limitation during all the life period of surge arrester. Shunted with a spark gap and presented as the low-current gap arrester with pre-saturated discharge voltage glass (porcelain) pin-cap insulator can be the simplest, but reliable sensor. Taking into consideration modern technologies the surge arrester statement continuous monitoring system can be designed. It also allows locating the place of damaged arrester that is particularly true for remote maintenance of equipped with surge protection devices electrical

Keywords: surge arrester, metal oxide varistor, monitoring, electrical aging, leakage current, condenser, energy storage device, discharge.

Введение. На сегодня наиболее эффективным аппаратом защиты оборудования электрических сетей от различного рода перенапряжений являются ограничители перенапряжений – ОПН, выполненные на основе высоконелинейных металлооксидных резисторов – варисторов. Варисторы последних десятилетий, выпускаемые известными производителями, вследствие совершенствования технологий, относятся к «нестареющим» устройствам. Подразумевается, что они становятся со временем более термически устойчивыми и отказ разрядника в результате старения варисторного блока маловероятен. Но вместе с тем на практике имеет место выход со строя ОПН. Полагают, что наблюдаемое снижение электрической прочности ОПН и последующее его разрушение могут быть провозицированы совокупностью сочетания следующих

основных факторов [1-3]:

- нарушение герметичности конструкции, приводящее к конденсации влаги на пограничной поверхности и как следствие электрическое повреждение внутренней изоляции;
- длительное термическое воздействие рабочим напряжением и квазистационарным повышенным напряжением;
- кумулятивный эффект протекания импульсов тока грозовых и коммутационных напряжений при срабатывании разрядника;
- ошибка в выборе электроэнергетических параметров ОПН.

Применяемые методы мониторинга ОПН.

Предприятия, выпускающие ограничители перенапряжений, как правило, рекомендуют оснащать си-

стемами непрерывного контроля за состоянием разрядника собственной разработки или из имеющихся на рынке устройств. Возможны различные способы диагностики ОПН, они основаны на измерение тока утечки через разрядник в сочетании с термографированием, поскольку явление электрического старения, так или иначе, сопровождается с увеличением тока и мощности потерь [1-3].

В эксплуатации нашли широкое применение два способа измерения тока утечки ОПН в онлайн режиме: измерение полного тока – например, устройство беспроводного дистанционного измерения «ОПН-Визор II» [4]; измерение активного тока третьей гармоники (и 5-й) для диагностики более ранней стадии старения, например, система «СКАТ-3 (4)» и «ОПН-монитор» [5, 6]. Эти устройства, как правило, оснащены также счетчиками импульсных токов перенапряжений, протекающих через разрядники при их срабатывании.

В номинальном режиме работы разрядника в измеряемом токе утечки в значительной мере доминирует емкостная составляющая, активная составляющая тока не превышает 5-20 % емкостного тока, что соответствует приблизительно от 10 до 600 мкА [3, 7]. Поскольку фактором старения является значение активного тока, то индикация ОПН измерением полного тока предполагает выявление поздней стадии старения разрядника, при которой активный ток утечки превышает емкостную составляющую. Следует отметить, что на сегодня значения критического для ОПН устанавливает производитель, и они интерпретируются неоднозначно. Вместе с тем рекомендуются детальная проверка с отключение от сети разрядника при превышении тока проводимости выше одного миллиампера.

Метод контроля измерением 3-й гармонической составляющей тока утечки основывается на нелинейности вольтамперной характеристики варистора. Высшая гармоническая составляющая тока утечки коррелируются с активным током, поэтому результаты отслеживания за изменением 3-й гармонической составляющей тока утечки несет в себе более достоверную информацию о состоянии разрядника. Основная проблема метода заключается в чувствительности к гармоническим составляющим напряжения сети, порождающим емкостные токи, соизмеримые с контролируемым током [1-7].

Базовая версия 3EX5 080-0 устройства Siemens Energy обеспечивает широкий диапазон стандартных функций, включая измерение общего тока утечки и анализа 3-й гармоники с компенсацией сетевых гармоник, температурной коррекций и индикацией состояния с помощью светодиодов [8]. По мере развития концепции интеллектуальной сети малобюджетные инструменты диагностики станут обязательными не только для подстанционного оборудования, но отдаленных от сервисного центра объектов [9]. Поэтому методы оценки состояния разрядников для защиты от перенапряжений продолжают совершенствоваться и далее.

Цель исследования: обоснование эффективности непрерывного контроля электрического состояния ОПН, при котором в качестве параметра индикации

является напряжение на конденсаторе, присоединяемого последовательно с разрядником. Аналогичный прием был предложен для ранней онлайн диагностики линейных полимерных изоляторов [10].

Исходные данные. Для определенности в начале качестве нелинейного резистора были взяты варисторы известного производителя варистора EPCOS, E48R153E: $\varnothing = 48$ мм - диаметр; $h = 40,5$ мм – высота; $U_{н.р} = 4,6$ кВ – наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение; ОПН 35 кВ в полимерном корпусе, выполненный из 9 последовательно соединенных этих варисторов с наибольшим длительно допустимым напряжением 40, 5 кВ.

На рис. 1 приведен пример экспериментально установленного начального участка вольтамперной характеристики (ВАХ) рассматриваемого варистора, соответствующего нормальному рабочему режиму. Результаты измерений и расчетов показывают хорошую сходимость с опубликованными данными [11]: на первом участке ВАХ рис. 1 ток утечки возрастает практически линейно с увеличением напряжения и носит емкостной характер ($I_{ем}$). С приближением напряжения к длительно допустимому $U_{н.р}$ наблюдается существенное возрастание измеряемого общего тока $I_{общ}$, что обусловлено проявлением нелинейности резистора и активная составляющая тока $I_{акт}$ превалирует емкостную составляющую. При $U_{н.р} = 4,6$ кВ – $I_{общ} \approx I_{акт} \approx 2$ мА.

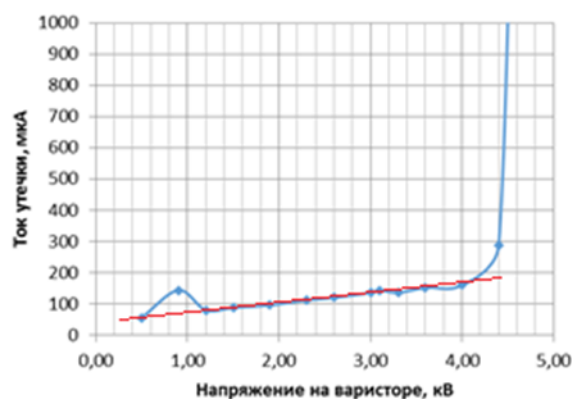


Рис. 1. Начальная область вольтамперной характеристики варистора

С учетом опубликованных данных принимаем следующие возможные эквивалентные параметры варисторов в рассматриваемом участке ВАХ: $\epsilon_v \in 320 \div 850$ – относительная диэлектрическая проницаемость; $\rho_v \in 10^5 \div 10^8$ Ом.м – удельное сопротивление.

Электрический расчет ОПН 35 кВ с последовательно соединенным конденсатором. Для наглядности обоснования цели исследования рассмотрим ОПН 35 кВ, для которого можно пренебречь влиянием паразитных емкостей на распределение потенциала вдоль разрядника. Кроме того энергетические расчеты выполним по упрощенной схеме замещения разрядника (рис. 2) для переменного синусоидального тока, широко используемой в инженерных анализах [11].

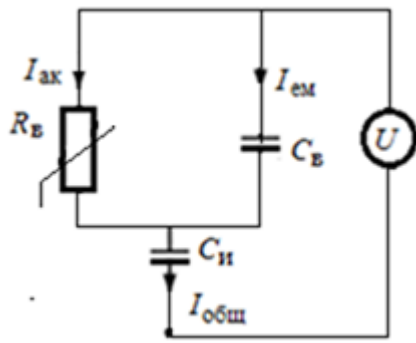


Рис. 2. Упрощенная расчетная схема замещения

Для электрической цепи с сосредоточенными параметрами (рис. 2) получаем следующие выражения токов в действующих значениях:

$$\left. \begin{aligned} I_{ак} &= \frac{U}{Z} \\ I_{ем} &= \frac{UR_в\omega C_в}{Z} \\ I_{общ} &= \sqrt{I_{ак}^2 + I_{ем}^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где

$$Z = \sqrt{R_{опн}^2 \left(1 + \frac{C_{опн}}{C_и}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega C_и}\right)^2};$$

$\omega = 2\pi f$ – угловая частота напряжения сети;

$C_{опн}$ и $R_{опн}$ – эквивалентные емкость и сопротивление варисторного блока разрядника:

$$\left. \begin{aligned} C_{опн} &= \varepsilon_в \varepsilon_0 \frac{S = \pi(\phi/2)^2}{9h} \\ R_{опн} &= \rho_в \frac{9h}{S = \pi(\phi/2)^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Полагая, $C_и \rightarrow \infty$ в формулах токов (1), приходим к решению задачи при отсутствии конденсатора - индикатора:

$$I_{ак} = \frac{U}{R_{опн}}; \quad I_{ем} = U\omega C_{опн} \quad (3)$$

На рис. 3 сопоставлены изменения расчетных токов с внешним конденсатором (б) и без него (а). При расчетах было принято: $\varepsilon_в = 850$, что соответствует верхнему измеренному значению диэлектрической проницаемости; $C_и = 45$ пФ – величина емкости конденсатора индикатора, соизмеримая с емкостью варисторного блока ОПН; $U = 40,5$ кВ.

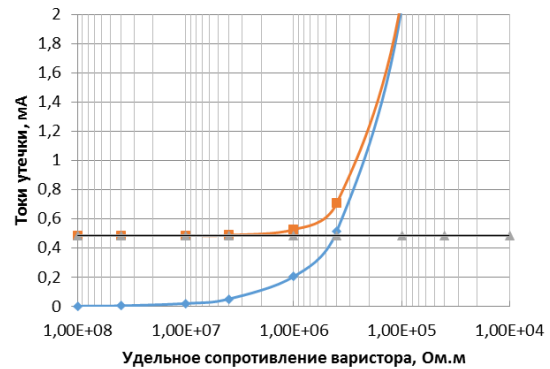
По рис. 3 можно сделать предварительные ожидаемые выводы:

- последовательно включенный к ОПН конденсатор приводит к ощутимому ограничению токов утечки через ОПН при тех же величинах приложенного напряжения и удельной проводимости варисторов;

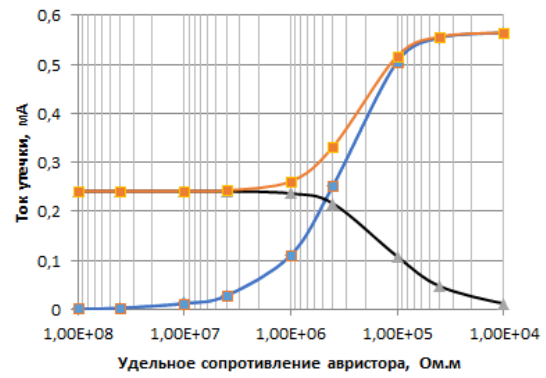
- другим ожидаемым эффектом последовательно присоединенного конденсатора является компенсация емкостного тока в области крутого возрастания активного тока, при удельных сопротивлениях варисторов ниже значения: $\rho_в \leq 1 \cdot 10^6$ Ом.м.

Оценим перераспределение приложенного напряжения между ОПН, $U_{опн}$, и конденсатором индикатора, $U_{ин}$:

$$\left. \begin{aligned} U_{ин} &= \frac{I_{общ}}{\omega C_{ин}} = U \frac{\sqrt{1 + (R_{опн}\omega C_{опн})^2}}{\omega C_{ин} Z} \\ U_{опн} &= R_{опн} I_{ак} = \frac{UR_{опн}}{Z} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$



а



б

Рис. 3 Расчетные токи утечки:
а - без конденсатора; б - с конденсатором

На рис. 4 показаны распределения приложенного напряжения для рассматриваемого примера в зависимости от удельного сопротивления варисторов. Они иллюстрируют следующий эффект наличия конденсатора в цепи ОПН - резкое вытеснение потенциала в сторону индикатора в области возрастания активного тока при $\rho_в \leq 1 \cdot 10^6$ Ом.м, что соответствует граничной проводимости проявления нелинейности резисторов (см. рис. 1, рис. 3а). Следовательно, можно допустить, что контроль за состоянием разрядника осуществлять отслеживанием напряжения на индикаторе, величина которого коррелируется проводимостью варисторов, следовательно, активным составляющим тока утечки.

Установим взаимосвязь между емкостью индикатора и диэлектрическими характеристиками варисторов. Поделив напряжения на индикаторе (4) на приложенное напряжение, получаем долю напряжения, приходящее на индикатор при различных удельных сопротивлениях варисторов:

$$\bar{U}_{ин} = \frac{U_{ин}}{U} = \frac{\bar{C}_{ин} \sqrt{1 + (\varepsilon\varepsilon_0\omega\rho)^2}}{\varepsilon\varepsilon_0\omega\rho \sqrt{(1 + \bar{C}_{ин})^2 + \left(\frac{\bar{C}_{ин}}{\varepsilon\varepsilon_0\omega\rho}\right)^2}}, \quad (5)$$

где $\bar{C}_{ин} = C_{опн}/C_{ин}$.

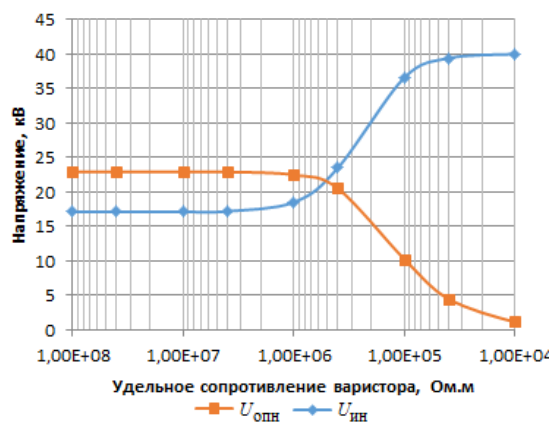


Рис. 4. Перераспределение напряжения между ОПН и индикатором

Из последней формулы вытекает, что перераспределение напряжения сети при выбранной величине емкости индикатора, зависит только от диэлектрических характеристик варистора (рис. 5).

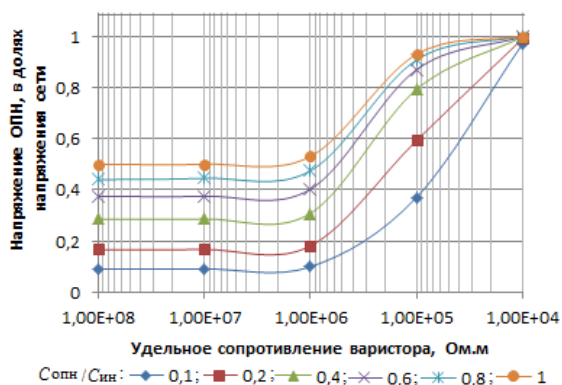


Рис. 5. Изменение напряжения на индикаторе от удельного сопротивления варисторов при различных соотношениях емкостей

Результаты предварительного опыта. Для оценки правомерности предложенного подхода были выполнены следующие опыты, измерены вольтамперные характеристики ОПН35, собранного на варисторах HengDa D46H22 с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 700 \div 900$, близкой варисторов фирмы EPCOS. Измерения ВАХ разрядника выполнялись без конденсатора - индикатора и с последовательно присоединенным индикатором с различной емкостью (рис. 6). По результатам измерений оценивалась доля напряжения, приходящая на индикатор, при этом были приняты следующие допущения для линейного участка ВАХ: емкость ОПН остается неизменной; проводимость определяется только величиной напряженности поля, в нашем примере, от напряжения на ОПН; фазы напряжений на разряднике и на конденсаторе индикатора практически совпадают.

Для принятых допущений можно считать, что приложенное напряжение равно арифметической сумме напряжений ОПН и индикатора:

$$U = U_{\text{олн}} + U_{\text{ин}} \quad (6)$$

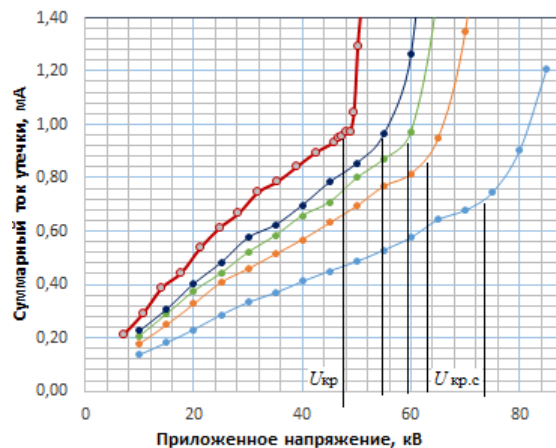


Рис. 6. Вольтамперные характеристики ОПН с емкостным индикатором

Из вольтамперной характеристики исходного разрядника (рис. 6, $C_{\text{олн}}/C_{\text{ин}} = 0$) устанавливаем критическое напряжение $U_{\text{кр}}$, при котором наблюдается резкое проявление нелинейности (возрастание тока утечки): $U_{\text{кр}} \cong 47$ кВ.

В случае присоединения индикатора ($C_{\text{олн}}/C_{\text{ин}} \neq 0$), как видим из рис. 6, критическое напряжение $U_{\text{кр.с}}$ для всей схемы смещается в большую сторону, на величину напряжения на индикаторе:

$$U_{\text{кр.с}} = U_{\text{ин}} + U_{\text{кр}} \quad (7)$$

Установленная, согласно (7), зависимость напряжения на индикаторе от соотношения емкостей $C_{\text{олн}}/C_{\text{ин}}$ приведена на рис. 7. Там же изображена аналогичная зависимость, которая получена по результатам расчетного анализа для критического удельного сопротивления $\rho_{\text{в}} \approx 1 \cdot 10^6$ Ом.м (см. рис. 5). Сопоставляя эти кривые можно констатировать о качественной их сходимости, что служит доводом о работоспособности приведенных соотношений.

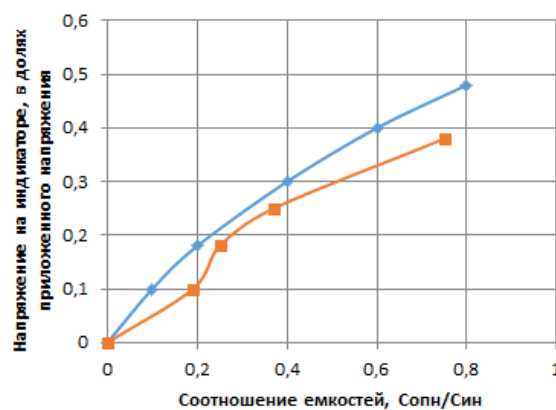


Рис. 7. Напряжение на индикаторе в зависимости от величины емкости

Выбор емкости индикатора. Применение. В первом приближении величину емкости индикатора выбираем на основе выражение (5) для условия $\rho_{\text{в}} > 1 \cdot 10^6$, что соответствует линейному участку вольтамперной характеристики ОПН. При известном рабочем напряжении разрядника по зависимостям рис. 5 (см. пологую область) можно оценить степень вытеснения потенциала от разрядника к индикатору с

ухудшением состояния по проводимости варисторов. Чем меньше начальное напряжение на индикаторе, или же чем больше его емкость, тем выше кратность прогнозируемого возрастания контролируемого напряжения. В тоже время следует учитывать, что энергия, запасаемая индикатором, находится в обратной зависимости от величины его емкости.

Очевидно, емкость индикатора и само устройство – конденсатор, должны быть выбраны из условий эксплуатации ОПН, эффективности его контроля, реализуемости и надежности. Напряжение на индикаторе возможно измерено с помощью, например, электростатического киловольтметра непосредственно без отключения от сети в условиях эксплуатации ОПН для защиты наземных объектов.

Одним из действенных мер для защиты от атмосферных перенапряжений воздушных линий (ВЛ), проходящих в районах с неудовлетворительным сопротивлением заземления опор, с высокой грозовой интенсивностью, на компактных линиях является ОПН [12]. Вследствие протяженности линий и дальности расположения мониторинг измерением токов утечки представляется мало эффективным. Контроль осуществляется с помощью отделителей, которые отключают от сети полностью поврежденных разрядников, создавая при этом видимый разрыв.

В таких условиях при альтернативном способе в качестве датчика контроля напряжения ОПН могут быть использованы стандартные тарельчатые изоляторы, емкость которых составляет 40 пФ и более в зависимости от типа, что соизмерима емкостью ОПН. Энергия, эквивалентная напряжению индикатора, может быть преобразована в электромагнитные излучения, регистрируемые соответствующими радиоприемниками, таким образом, осуществлен непрерывный дистанционный контроль за состоянием разрядника.

Выводы:

- состоятельность способа диагностики ОПН, посредством контроля напряжения на последовательно присоединяемом к разряднику конденсаторе;
- к эффективности в сравнении с известным методом измерения тока утечки можно отнести ограничение длительно протекающего тока утечки в нормальном режиме эксплуатации разрядника и частичная компенсация емкостной составляющей тока, как следствие, повышение информативности диагностики;
- простота визуализации и обнаружения ОПН в критическом состоянии, невысокие расходы на реализацию.

Список литературы

- 1 Демьяненко К.Б. Нужна ли диагностика ОПН в процессе эксплуатации? <https://polymer-apparat.ru/articles/techinfo/diagnostikaopn>
- 2 Дмитриев В.Л., Красавина М.А. "Старение" варисторов в процессе эксплуатации ОПН"/ Журнал «Новости Электротехники», №1 (61) 2010.

- 3 Monitoring Condition of Surge Arresters <https://www.inmr.com/monitoring-condition-surge-arresters/>
- 4 М.Ю. Шумилов. Беспроводные приборы для непрерывной диагностики ОПН в эксплуатации типа «ОПН-Визор-II LR» с возможностью передачи данных на большое расстояние. <https://szvi.biz/articles=5>
- 5 Особенности контроля состояния ограничителей перенапряжений нелинейных на местах их эксплуатации. <https://www.elec.ru/publications/peredacha-raspredelenie-i-nakoplenie-elektroenergi/1536/>
- 6 Прибор мониторинга ОПН «ОПН-Монитор». https://dimrus.com/manuals/opn_um.pdf
- 7 IEC 60099-5:2000 Surge arresters – Part 5: Selection and application recommendations (MOD).
- 8 Siemens ACM-basic 3EX5 080-0 AND ACM-advanced 3EX5 080-1 Digital Monitoring devices. Air-insulated switchgear <https://www.dsgenterprisesltd.com/product/siemens-acm-basic-3ex5-080-0-and-acm-advanced-3ex5-080-1-digital-monitoring-devices-air-insulated-switchgear/>
- 9 Monitoring Condition of Surge Arresters. <https://www.inmr.com/monitoring-condition-surge-arresters/>
- 10 Е.Д. Ким, В.Н. Таран, Г.В. Залужная. Онлайн диагностика внутренней изоляции линейных полимерных изоляторов/ Вісник НТУ «ХП»: Енергетика: надійність та ергоєфективність: Харків 2019. - №29(1354) 2019. - С.81-87.
- 11 Novizon Novizon, Zulkurnain Abdul-Malek, Nouruddeen Bashi, Aulia Sayuti. Condition Monitoring of Zinc Oxide Surge Arresters/ In book: Practical Applications and Solutions Using LabVIEW™ Software. August 2011. - pp. 253-270. doi:10.5772/23761.
- 12 А.С. Гайворонский. Линейные разрядники радикальное средство грозозащиты ВЛ. Новости электротехники -2006-№ 2(38).

References (transliterated)

- 1 Demyanenko K.B. Nuzhna li diagnostika OPN v processe ekspluatatsii? <https://polymer-apparat.ru/articles/techinfo/diagnostikaopn>.
- 2 Dmitriev V.L., Krasavina M.A. "Starenie" varistorov v processe ekspluatatsii OPN"/ Zhurnal «Novosti Elektrotehniki», №1 (61) 2010.
- 3 Monitoring Condition of Surge Arresters. <https://www.inmr.com/monitoring-condition-surge-arresters/>
- 4 M.Yu. Shumilov. Besprovodnye pribory dlya nepreryvnoy diagnostiki OPN v ekspluatatsii tipa «OPN-Vizor-II LR» s vozmozhnostyu peredachi dannyh na bolshoe rasstoyanie. <https://szvi.biz/articles=5/>
- 5 Osobennosti kontrolya sostoyaniya ogranichitelej perenapryazhenij nelinejnyh na mestah ih ekspluatatsii. Dostupen. na <https://market.elec.ru/nomer/45/osobennosti-kontrolya-sostoyaniya-ogranichitelej-p/>
- 7 IEC 60099-5:2000 Surge arresters – Part 5: Selection and application recommendations (MOD).
- 8 Siemens ACM-basic 3EX5 080-0 AND ACM-advanced 3EX5 080-1 Digital Monitoring devices. Air-insulated switchgear. <https://www.dsgenterprisesltd.com/product/siemens-acm-basic-3ex5-080-0-and-acm-advanced-3ex5-080-1-digital-monitoring-devices-air-insulated-switchgear/>
- 9 Monitoring Condition of Surge Arresters. <https://www.inmr.com/monitoring-condition-surge-arresters/>
- 10 E.D. Kim, V.N. Taran, G.V. Zaluzhnaya. Onlajn diagnostika vnutrennej izolyatsii linejnyh polimernih izolyatorov/ Visnik NTU «HPI»: Energetika: nadijnist ta eregoefektivnist: Harkiv 2019. - № 29(1354) 2019. - Pp.1-87.
- 11 Novizon Novizon, Zulkurnain Abdul-Malek, Nouruddeen Bashi, Aulia Sayuti. Condition Monitoring of Zinc Oxide Surge Arresters/ In book: Practical Applications and Solutions Using LabVIEW™ Software August 2011. - pp. 253-270. doi:10.5772/23761.
- 12 A.S. Gajvoronskij. Linejnye razryadniki radikalnoe sredstvo grozozashity VL. Novosti elektrotehniki -2006-№ 2(38).

Поступила (received) 01.10.2021

Відомості про авторів/Сведения об авторах/About the Authors

Кім Єн Дар (Kim En Dar, Kim En Dar) – доктор технічних наук, професор кафедри, ЛНАУ, м. Слов'янськ; тел.: +38(050)3711941; orcid.org/0000-0002-0042-7974; e-mail: ykim@meta.ua.

Коростелєв Ян Євгенович (Korostelev Ian Evgenievich) – Начальник отдела НИОКР ООО «Форэнерго-Инжиниринг», г. Москва; тел.: +7(922)0112077; e-mail: askerfog@yandex.ru.

I. О. КОСТЮКОВ

АБСОРБЦІЙНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ

В статті наведено огляд найбільш розповсюджених методів контролю технічного стану електричної ізоляції, що засновані на використанні абсорбційних явищ, які виникають в ній під дією прикладеної постійної напруги. Описано основні положення методу контролю за визначеною на електродах досліджуваного ємнісного об'єкта напругою, відновлюваною після короткочасного розряду його ємності. Проаналізовано основні аспекти застосування індексу поляризації та коефіцієнта абсорбції для визначення технічного стану ізоляції шляхом використання коефіцієнтів, що характеризують зміну в часі струму через діелектрик при подачі на нього постійної випробувальної напруги.

Ключові слова: поляризація, наскрізний струм провідності, діагностика ізоляції, об'ємний заряд.

И. А. КОСТЮКОВ

АБСОРБЦИОННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ

В статье приведен обзор наиболее распространенных методов контроля технического состояния электрической изоляции, основанных на использовании абсорбционных явлений возникающих в ней под действием постоянного напряжения. Описаны основные положения метода контроля, основанного на определении напряжения на электродах исследуемого емкостного объекта контроля, восстанавливающегося после кратковременного разряда его емкости. Проанализированы основные аспекты применения индекса поляризации и коэффициента абсорбции для определения технического состояния изоляции путем использования коэффициентов, характеризующих изменение во времени тока через диелектрик при подаче на него постоянного испытательного напряжения.

Ключевые слова: поляризация, сквозной ток проводимости, диагностика изоляции, объемный заряд.

I. KOSTIUKOV

ABSORPTION METHODS OF CONTROL OF TECHNICAL CONDITION OF ELECTRICAL INSULATION

The article provides an overview of the most common methods for monitoring the technical state of electrical insulation, based on the applying of absorption phenomena arising in dielectric materials under the influence of DC voltage. The main provisions of the control method based on determining the voltage at the electrodes of the investigated capacitive control object, which is recovering after a short-term discharge of its capacity, are described. The main aspects of the application of the polarization index and the absorption coefficient for determining the technical state of insulation by using the coefficients characterizing the change in time of the current through the dielectric when a constant test voltage is applied to it are analyzed. The advantages of using absorption methods for monitoring the technical state of electrical insulation, first of all, are the ability to carry out testing without the necessity of applying of relatively high test voltages, which greatly simplifies all the necessary technical operations. Such control methods show a significant dependence of the informative parameters used in them on the technical state of insulation on the degree of development of slow polarization processes in the material under study and, therefore, are successfully used to determine the degree of moisture in tested electrical insulation.

Keywords: polarization, conduction current, insulation diagnostics, space charge.

Вступ. Методи контролю технічного стану електричної ізоляції, основані на виміренні її абсорбційних характеристик, достатньо інтенсивно розвиваються в течение достаточного тривалого проміжку часу і широко застосовуються в електроенергетиці не тільки для контролю технічного стану ізоляції ємнісних об'єктів (силові кабелі), але і при контролі ізоляції електроенергетичного обладнання, яке працює в номінальних умовах і представляє активну-індуктивну навантаження, наприклад, при контролі ізоляції обмоток силових трансформаторів [1, 2]. Методи визначення технічного стану ізоляції, засновані на використанні виникаючих в ній абсорбційних явищ, зазвичай включають наступні методи контролю:

- контроль ізоляції методом відновлюваної напруги;

- контроль ізоляції шляхом визначення коефіцієнтів, що характеризують зміну в часі струму через діелектрик при подачі на нього постійної напруги. В більшості випадків в якості таких коефіцієнтів визначають індекс поля-

ризації і коефіцієнт абсорбції.

При контролі технічного стану ізоляції методом відновлюваної напруги проводять вимірення напруги на ємнісному об'єкті контролю після короткочасного розряду його попередньо зарядженої ємності. При визначенні характеристик зміни в часі струму через досліджуємого діелектрика використовують допоміжні коефіцієнти, визначаєми на основі вимірянних в певні моменти часу значень опорів ізоляції. Обидва методи використання абсорбційних явищ дозволяють контролювати технічний стан ізоляції без використання високих випробувальних напруг, що визначає актуальність їх практичного застосування.

Ціль статті полягає в проведенні огляду і аналізу основних аспектів застосування абсорбційних явищ в електричній ізоляції для визначення її технічного стану.

Контроль технічного стану ізоляції методом відновлюваної напруги.

Причини виникнення абсорбційних явищ в електричній ізоляції можуть бути пояснені с

использованием приведенных на рис. 1 эквивалентных схем замещения диэлектриков (схемы Максвелла и Фойгта) [3, 4].

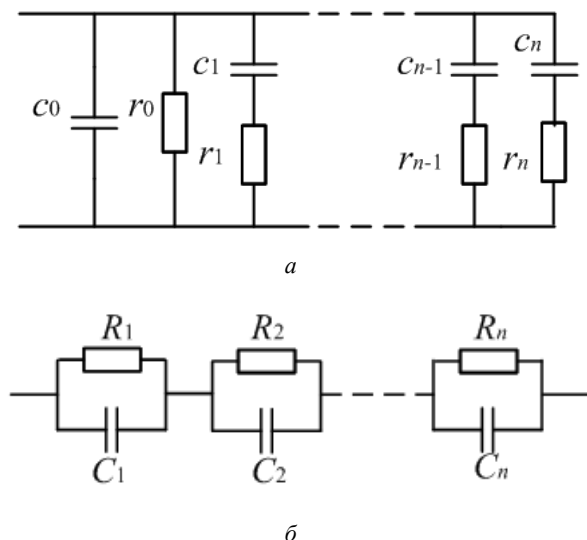


Рис. 1. Эквивалентные схемы замещения неоднородных диэлектриков [3, 4]:
а – схема Фойгта; б – схема Максвелла.

На приведенных на рис. 1 схемах замещения неоднородного диэлектрика r_0 – электрическое сопротивление утечки, которое обусловлено конечным значением электропроводности изоляционного материала, c_0 – высокочастотная емкость, т.е. емкость, обусловленная видами поляризации с назначенным временем релаксации. При этом цепочки $c_1 r_1 \dots c_n r_n$ используются для моделирования, согласно используемой в [5] терминологии, именно «медленных» видов поляризации, то есть видов поляризации, которые могут приводить к диэлектрическим потерям в исследуемом изоляционном материале. Для схемы замещения неоднородного диэлектрика на рис. 1. б все $R_1 C_1 \dots R_n C_n$ представляют электрические емкости и сопротивления, определяемые поляризационными процессами и потерями на поляризацию и электропроводность в каждом из компонентов диэлектрического материала.

Именно наличие элементов $r_1 c_1 \dots r_n c_n$, отражающих влияние медленных видов поляризации на рис. 1 а, дает возможность проводить контроль технического состояния изоляции по ее абсорбционным характеристикам. При таком контроле исследуемый кабель заряжается до определенного напряжения, после чего его в течение относительно небольшого промежутка времени (несколько секунд) разряжают на достаточно малое сопротивление. За это короткое время емкость c_0 , отвечающая за быстрые виды поляризации, успевает полностью разрядиться, а емкости $c_1 \dots c_n$, отвечающие за медленные виды поляризации, не успевают полностью разрядиться. Согласно классическому физическому объяснению явления диэлектрической абсорбции описанному, например, в [6] такая разница объясняется различием постоянных времени разряда емкостей c_0 и $c_1 \dots c_n$. Дальнейшее перераспределение зарядов между емкостями вызывает появление возобновляемого напряжения на электродах объекта контроля, которое непосредственно и используется в ка-

честве источника информации о техническом состоянии электрической изоляции. Таким образом, метод контроля технического состояния электрической изоляции по параметрам восстанавливающегося напряжения достаточно эффективен при применении по отношению к неоднородным диэлектрикам, поскольку именно для таких диэлектриков существование миграционной поляризации приводит к увеличению электрической емкости и диэлектрических потерь, что, в свою очередь, находит свое отражение в увеличении параметров $r_1 c_1 \dots r_n c_n$ на схеме замещения приведенной на рис. 1 а. Кроме того, такой метод контроля достаточно чувствителен к степени увлажнения электрической изоляции, поскольку ее увлажнение, как и наличие миграционной поляризации, приводит к увеличению параметров $r_1 c_1 \dots r_n c_n$.

Классическим примером неоднородных диэлектриков, для которых применение описанного метода контроля позволяет достаточно точно определить их техническое состояние является бумажная пропитанная изоляция силовых кабелей. Использование приведенной на рис. 1 б схемы замещения неоднородной изоляции предусматривает последовательное расположение слоев изоляции по отношению к электрическому полю. На практике такое расположение слоев изоляции можно встретить в достаточно ограниченном количестве случаев. Типичными примерами являются двухслойная изоляция эмалированных проводов [7-10], а также трехслойная структура изоляционной системы силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена [11-17], представляющая собой основной слой изоляции и два полупроводящих слоя. Разработанные на основе приведенной на рис. 1 б схемы замещения модели неоднородных диэлектриков широко применяются для моделирования процессов, связанных с диагностикой по методу восстанавливающегося напряжения. Такие модели разработаны, например, для электроэнергетического оборудования, изоляция которого выполнена на основе такого типичного неоднородного диэлектрика как бумажная пропитанная изоляция [18, 19]. В данном случае применение такой схемы замещения позволяет отразить разное влияние диэлектрических проницаемостей компонентов изоляции на напряженность электрического поля и соответственно на напряжение в каждом из компонентов изоляции. Так, при включении неоднородного диэлектрика, который может быть описан схемой замещения приведенной на рис. 1 б, к источнику постоянного напряжения во время переходного процесса напряжение на каждом из компонентов изоляции распределяется обратно пропорционально их электрическим емкостям, в то же время после окончания переходного процесса напряжение будет распределяться прямо пропорционально значению электрических сопротивлений. Согласно физической интерпретации явления диэлектрической абсорбции при его использовании для диагностики технического состояния силовых кабелей, приведенной в [18], появление восстанавливаемого напряжения связано с существованием объемного заряда в исследуемой электрической изоляции.

Контроль технического состояния изоляции методом восстанавливаемого напряжения предусматривает следующие технические операции [21]:

- длительный процесс предварительной зарядки исследуемого объекта контроля. Так, например, при использовании описанной в [22] испытательной установки CDS продолжительность заряда составляет 15 минут;

- кратковременный процесс разряда предварительно заряженного объекта контроля на низкоомную нагрузку. Для испытательной установки CDS продолжительность разряда составляет 2 секунды [22];

- отключение исследуемого объекта контроля от нагрузки и измерение появляющегося (восстанавливающегося) напряжения на его электродах.

На рис. 2 в произвольном масштабе приведены характерные временные зависимости напряжения на электродах объекта контроля при выполнении приведенных технических операций [21].

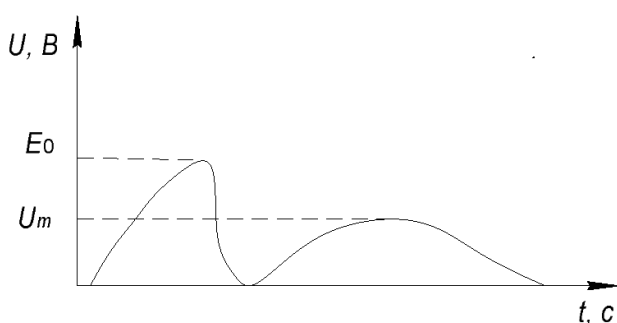


Рис. 2. Зависимость напряжения на электродах исследуемого емкостного при контроле технического состояния электрической изоляции методом восстанавливаемого напряжения

Согласно [18] при определении степени деградации электрической изоляции по методу восстанавливаемого напряжения в качестве критериев, чувствительных к его техническому состоянию, используют время, при котором наблюдается максимальное значение восстанавливаемого напряжения, отношение U_m к значению зарядного напряжения E_0 , а также постоянную времени саморазряда. Учитывая, что измерения производятся при достаточно небольших значениях зарядного напряжения, а также возможность проведения измерений при различных его значениях, использование отношения U_m к значению зарядного напряжения E_0 в качестве критерия, чувствительного к техническому состоянию изоляции, позволяет избежать влияния величины зарядного напряжения на максимальное значение восстанавливаемого напряжения. Согласно результатам ранее упомянутого исследования [18] старение бумажной пропитанной изоляции силовых кабелей сопровождается постепенным увеличением отношения U_m к значению зарядного напряжения E_0 с последующим уменьшением этого отношения. В то же время, деградация технического состояния такой изоляции также сопровождается уменьшением времени, при котором наблюдается максимальное значение восстанавливаемого напряжения.

Несомненным преимуществом описанного метода контроля является возможность определения техни-

ческого состояния электрической изоляции путем использования сравнительно невысоких значений приложенного к ней напряжения, что, безусловно, значительно упрощает процедуру проведения измерений по сравнению с высоковольтными испытаниями. Так, например, для испытательной установки CDS значения зарядного напряжения составляют 1 кВ и 2 кВ, при этом испытание при величине зарядного напряжения 2 кВ проводят после испытаний при значении зарядного напряжения 1 кВ [22]. Приведенные в [23] результаты были получены при значении зарядного напряжения, составлявшего 1 кВ.

К недостаткам указанного метода необходимо, в первую очередь, отнести повышенные требования к величине внутреннего сопротивления вольтметра, используемого для измерения восстанавливающегося напряжения на исследуемом емкостном объекте контроля. Указанный недостаток был отмечен в [24]. При контроле технического состояния изоляции электроэнергетического оборудования этот недостаток, безусловно, осложняет практическое применение этого метода контроля. Так, например, он накладывает определенные ограничения на длину исследуемого образца силового кабеля, для которого можно с достаточной точностью проводить измерения. Другим существенным недостатком метода контроля технического состояния изоляции по параметрам восстанавливающегося напряжения на электродах исследуемого объекта контроля является достаточно большая продолжительность измерений, поскольку измерения в некоторых случаях необходимо проводить в течение 30 минут с момента времени, когда на объекте контроля начинает появляться восстанавливающийся напряжение. При контроле силовых кабелей продолжительность испытаний увеличивается из-за необходимости предварительной подготовки исследуемого образца силового кабеля к измерениям. В данном случае согласно [24] под подготовкой к измерениям подразумевается пребывание емкостного объекта контроля в течение некоторого времени (не менее 3 часов) с закороченными электродами. Такая подготовка позволяет избежать воздействия накопленных в изоляции объемных зарядов, накопленных при ее предварительной работе в эксплуатационных условиях и после предварительных испытаний.

Следует отметить, что на основе приведенной на рис. 1, б схемы замещения в [25] проведен анализ переходных процессов при включении неоднородной изоляции к источнику постоянного напряжения. При этом показано, что неоднородность изоляции может приводить к существенному изменению напряженности электрического поля в каждом из слоев изоляции.

Контроль технического состояния изоляции с использованием коэффициента абсорбции и индекса поляризации. Среди методов контроля технического состояния электрической изоляции, использующих абсорбционные явления в диэлектриках, особое место занимают методы, характеризующие изменение во времени тока через диэлектрик после его подключения к источнику постоянного напряжения. В качестве коэффициентов, характеризующих изменение во времени постоянного тока через диэлектрик, чаще всего используют коэффициент абсорбции и

индекс поляризации. Коэффициент абсорбции k_a определяют согласно выражению [26]:

$$k_a = \frac{R_{60}}{R_{15}}, \quad (1)$$

где R_{60} представляет собой значение сопротивления изоляции, измеренное через 60 секунд после подачи на контролируемый объект постоянного напряжения, а R_{15} представляет значение электрического сопротивления, измеренное через 15 секунд после подачи напряжения. Согласно приведенным в [26] данным для изоляции вращающихся электрических машин значения k_a превышающие 1.5 свидетельствуют о высоком качестве изоляции, в то же время приближение величины коэффициента абсорбции к 1 является признаком ухудшения состояния изоляции.

Индекс поляризации (PI), в свою очередь, может быть определен согласно соотношению [27]:

$$PI = \frac{R_{600}}{R_{60}}, \quad (2)$$

где R_{600} представляет собой значение электрического сопротивления, измеренное через 600 секунд после подачи на исследуемый объект постоянного напряжения. Физические процессы в электрической изоляции, приводящие к изменению во времени тока, связаны с тем, что помимо составляющей тока связанной с током утечки, через электрическую изоляцию протекает ток абсорбции, который обусловлен медленными процессами поляризации в диэлектрике. Для поляризуемых диэлектрических материалов токи абсорбции обусловлены относительно медленным вращением дипольных молекул под действием электрического поля. Для неоднородных диэлектриков токи абсорбции обусловлены миграционной поляризацией, то есть накоплением зарядов на границах составляющих компонентов неоднородного материала. Именно поэтому для большинства технических диэлектриков измерение электрического сопротивления производится через 60 секунд после подачи на объект испытательного напряжения. Считается, что за это время ток абсорбции спадает до 0 и величина тока через диэлектрик определяется непосредственно током утечки. Необходимо заметить, что при измерениях спустя 60 секунд с момента подачи испытательного напряжения не всегда удается получить постоянное значение электрического сопротивления [28]. Это означает, что переходный процесс, обусловленный абсорбционными токами, еще не завершен и на измеренное значение электрического сопротивления все еще влияет составляющая тока абсорбции. К тому же необходимо принимать во внимание возможные флуктуации тока через диэлектрик. Изменение тока через диэлектрик может быть обусловлено как, согласно терминологии [20], «электрической очисткой» материала, так и его старением и разрушением под действием внешнего электрического поля, вследствие чего в материале возникают новые носители заряда, ранее являвшиеся структурными элементами молекул диэлектрика. Указанные флуктуации тока через диэлектрик могут быть проиллюстрированы приведенными в [26] кривыми тока в изоляции вращающихся электрических машин. Таким образом, существование составляющих полного тока через диэлектрик, кото-

рые обусловлены током утечки, током абсорбции и емкостным током [29-31] дает возможность характеризовать медленные виды поляризации в материале путем применения определенных по формулам (1, 2) коэффициентов. Применение индекса поляризации и коэффициента абсорбции является эффективным средством для определения однородности электрической изоляции и степени ее увлажнения. Для разделения поверхностной и объемной составляющих тока через диэлектрик при измерениях используется система из 3 электродов [32]. В случае применения схем измерения с двумя электродами разделение поверхностной и объемной составляющих будет невозможным, что приведет к завышенным значениям протекающего через диэлектрик тока и, соответственно, к заниженным значениями электрического сопротивления.

Выводы. Преимущества использования абсорбционных методов контроля технического состояния электрической изоляции, прежде всего, заключаются в возможности проведения контроля без использования относительно высоких испытательных напряжений, что значительно упрощает технические операции. Такие методы контроля показывают значительную зависимость используемых в них информативных параметров о техническом состоянии изоляции от степени развития медленных процессов поляризации в исследуемом материале и, следовательно, с успехом применяются для определения степени увлажнения изоляции.

Список литературы

- Gutten M., D. Korenciak, M. Sebok, et al., Diagnostics of transformer with insulation oil-paper, *Przeglad Elektrotechniczny*, vol. 91, no. 8, pp. 69-72, 2015.
- Simko M. Measuring and diagnostics system for analysis of transformer insulation by return voltage method / M. Simko, D. Korenciak, M. Gutten, R. Janura // *Przeglad Elektrotechniczny*. – 2020. – № 12. – P. 67 – 70.
- Борисова М. Э. Оценка параметров неоднородности диэлектрика на основе анализа абсорбционных характеристик / М. Э. Борисова, С. Н. Койков, М. С. Марченко, Н. В. Северюхина // *Электричество*. – 1995. – № 6. – С. 62 – 67.
- Борисова М. Э. Физика диэлектрических материалов. Электроперенос и накопление заряда в диэлектриках / М. Э. Борисова, О. В. Галюков, П. В. Цацынкин. – СПб.: Издательство СПбГПУ, 2004. – 106 с.
- Zaengl W. S. Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment, part 1: Theoretical considerations, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 19, no. 5, pp. 5-19, September - October 2013.
- Ренне В. Т. Электрические конденсаторы Л.-М.: Государственное энергетическое издательство, 1947. – 193 с.
- Гурин А. Г. Экспериментальное исследование электрическое прочности провода ПЭЭИДХ – 0,63 / А. Г. Гурин, С. Ю. Антонец // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2013. – № 4. – С. 44 – 46.
- Голик О. В. Исследование дефектности нагревостойких проводов с двойной полиимидной изоляцией при испытаниях высоким напряжением на проход / О. В. Голик // *Український метрологічний журнал*. – 2009. – №1. – С. 12 – 17.
- Голик О. В. Контроль та аналіз дисперсії параметрів кабельної продукції – основа реалізації принципу неперерваного підвищення якості / О. В. Голик // *Український метрологічний журнал*. – 2013. – №2. – С. 39 – 43.
- Голик О. В. Технологічний контроль дефектів в емальпроводі з поліамідною ізоляцією / О. В. Голик, С. Ю. Антонець, Л. А. Щепенюк, В. В. Золотарьов // *Вістник НТУ «ХП»*. – 2017. – № 31. – С. 12 – 18.

11. Золотарев В. М. Тангенс угла диэлектрических потерь многослойных шитых изоляционных конструкций / В. М. Золотарев, В. П. Карпушенко, В. В. Золотарев, Ю. А. Антоненко, А. А. Науменко // Вісник НТУ «ХП». – 2011. – № 8. – С. 64 – 73.
12. Золотарев В. М. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от конструкции многослойной шитой изоляции кабелей и проводов / В. М. Золотарев, В. П. Карпушенко, В. В. Золотарев, Ю. А. Антоненко, А. А. Науменко // Вісник НТУ «ХП». – 2012. – № 21. – С. 78 – 89.
13. Золотарев В. В. Распределение стационарного электрического поля в цилиндрическом неидеальном диэлектрике / В. В. Золотарев, В. П. Карпушенко, В. М. Золотарев, А. А. Науменко // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – №4. – С. 65 – 69.
14. Золотарев В. М. Влияние проводимости экранов на диэлектрические потери в кабелях / В. М. Золотарев, В. В. Золотарев, С. В. Бузько, Т. Ю. Антоненко, А. А. Науменко // Вісник НТУ «ХП». – 2014. – № 21. – С. 50 – 54.
15. Набока Б. Г. Обоснование электрофизических характеристик полупроводящих экранов силовых кабелей высокого напряжения со шитой изоляцией / Б. Г. Набока, А. В. Беспрозванных, Е. С. Москвитин // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – №3. – С. 44 – 47.
16. Кучерявая И. Н. Дефекты полупроводящего слоя по жиле и их влияние на распределение электрического поля в полиэтиленовой изоляции / И. Н. Кучерявая // Техническая электродинамика. – 2018. – № 1. – С. 17 – 22.
17. Щебенюк Л. А. Дослідження втрат в ізоляції високовольтних силових кабелів з полімерною ізоляцією / Л. А. Щебенюк, Т. Ю. Антоненко // Електротехніка і електромеханіка. – 2016. – №4. – С. 58 – 62.
18. Беспрозванных А. В. Физическая интерпретация кривых восстановления напряжения на основе схем замещения неоднородного диэлектрика / А. В. Беспрозванных // Технічна електродинаміка. – 2009. – № 6. – С. 23 – 27.
19. Беспрозванных А. В., Набока Б. Г. Математические модели и методы расчета электроизоляционных конструкций. – Х.: НТУ «ХПИ», 2012. – 108 с.
20. Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов М.: Энергоиздат, 1982. – 320 с.
21. Ковригин Л. А. Прогнозирование остаточного ресурса силовых кабелей по возвратному напряжению / Л. А. Ковригин, Л. А. Сидельников // КАБЕЛЬ – news 2009. – № 8. – С. 54 – 56.
22. Ольшевский А. М. Неразрушающая диагностика силовых кабельных линий. Состояние и перспективы / А. М. Ольшевский // Электрические сети и системы. – 2013. – № 5. – С. 46 – 51.
23. Taran Kumar Saha Experience with return voltage measurements for assessing insulation conditions in service aged transformers / Taran Kumar Saha, Zheng Tong Yao // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2003. – № 1. – P. 128 – 135.
24. Беспрозванных А. В. Современные электрические методы контроля и диагностики силовых кабелей со шитой полиэтиленовой изоляцией / А. В. Беспрозванных, Е. С. Москвитин // Электрические сети и системы. – 2013. – № 5. – С. 52 – 58.
25. Розісулов С. С. Перехідні процеси у неоднорідній електричній ізоляції високовольтних кабелів при її діагностиці методами вимірювання і аналізу струму релаксації та поверхневої напруги / С. С. Розісулов, В. І. Михайлів, Б. Л. Грабчук // Методи та прилади контролю якості. – 2013. – № 1. – С. 84 – 91.
26. Глинка Т. Диагностика изоляции обмоток электрических машин постоянным напряжением / Т. Глинка // Электричество. – 1998. – № 1. – С. 60 – 63.
27. Gonzales E. A. Novel polarization index evaluation formula and fractional-order dynamics in electric motor insulation resistance / E. A. Gonzales, I. Petras, M. D. Ortigueira // Fractional calculus & applied analysis. – 2018. – № 3. – P. 613 – 627.
28. Серебряков А. С. Способ измерения установившегося значения сопротивления изоляции / А. С. Серебряков // Электричество. – 1999. – № 5. – С. 40 – 43.
29. Лачин В. И. Методы и устройства измерения сопротивления изоляции электроэнергетических объектов и их классификация / В. И. Лачин, Нгуен Куок Уи, К. Ю. Соломенцев, И. Г. Балабан // Известия вузов. Северо-Кавказский регион – 2015. – № 1. – С. 84 – 89.
30. Лачин В. И. Влияние тока абсорбции на процесс измерения сопротивления изоляции / В. И. Лачин, Нгуен Куок Уи, К. Ю. Соломенцев // Известия вузов. Северо-Кавказский регион – 2013. – № 6. – С. 32 – 35.
31. Лачин В. И. Сравнительный анализ математических моделей аппроксимации тока абсорбции / В. И. Лачин, Нгуен Куок Уи, К. Ю. Соломенцев, И. Г. Балабан // Известия вузов. Северо-Кавказский регион – 2015. – № 2. – С. 14 – 18.
32. Луцкейкин Г. А. Методы исследования электрических свойств полимеров / Г. А. Луцкейкин. – М.: Химия, 1988. – 160 с.

References (transliterated)

1. M. Gutten, D. Korenciak, M. Sebok, et al., “Diagnostics of transformer with insulation oil-paper,” Przeglad Elektrotechniczny, vol. 91, no. 8, pp. 69-72, 2015.
2. Simko M. Measuring and diagnostics system for analysis of transformer insulation by return voltage method / M. Simko, D. Korenciak, M. Gutten, R. Janura // Przeglad Elektrotechniczny. – 2020. – № 12. – P. 67 – 70.
3. Borisova M. Je. Ocenka parametrov neodnorodnosti dijelektrika na osnove analiza absorbcionnyh karakteristik / M. Je. Borisova, S. N. Kojkov, M. S. Marchenko, N. V. Severjuhina // Jelektrichestvo. – 1995. – № 6. – С. 62 – 67.
4. Borisova M. Je. Fizika dijelektricheskikh materialov. Jelektroperenos i nakoplenie zarjada v dijelektrikah / M. Je. Borisova., O. V. Galjukov, P. V. Cacynkin. – SPb.: Izdatel'stvo SPbGPU, 2004. – 106 s.
5. W. S. Zaengl, “Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment, part 1: Theoretical considerations,” IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 19, no. 5, pp. 5-19, September - October 2013.
6. Renne V. T. Jelektricheskie kondensatory L.-M.: Gosudarstvennoe jenergeticheskoe izdatel'stvo, 1947. — 193 s.
7. Gurin A. G. Jeksperimental'noe issledovanie jelektricheskoe prochnosti provoda PJeJeIDH – 0,63 / A. G. Gurin, S. Ju. Antonec // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2013. – №4. – С. 44 – 46.
8. Golik O. V. Issledovanie defektnosti nagrevostojkih provodov s dvojnoj poliimidnoj izolaciej pri ispytanijah vysokim naprjazheniem na prohod / O. V. Golik // Ukraїns'kij metrologichnij zhurnal. – 2009. – №1. – С. 12 – 17.
9. Golik O. V. Kontrol' ta analiz dispersii parametriv kabel'noї produkcii – osnova realizacii principu neperervanogo pidvisshennja jakosti / O. V. Golik // Ukraїns'kij metrologichnij zhurnal. – 2013. – №2. – С. 39 – 43.
10. Golik O. V. Tehnologichnij kontrol' defektiv v emal'provodi z poliimidnoju izolacieju / O. V. Golik, S. Ju. Antonec', L. A. Shhebenjuk, V. V. Zolotar'ov // Vistnik NTU «HP». – 2017. – № 31. – С. 12 – 18.
11. Zolotarev V. M. Tangens ugla dijelektricheskikh poter' mnogoslajnyh sshityh izolacionnyh konstrukcij / V. M. Zolotarev, V. P. Karpushenko, V. V. Zolotarev, Ju. A. Antonec, A. A. Naumenko // Vistnik NTU «HP». – 2011. – № 8. – С. 64 – 73.
12. Zolotarev V. M. Zavisimost' tangensa ugla dijelektricheskikh poter' ot konstrukcii mnogoslajnoj sshitoj izolacii kabelej i provodov / V. M. Zolotarev, V. P. Karpushenko, V. V. Zolotarev, Ju. A. Antonec, A. A. Naumenko // Vistnik NTU «HP». – 2012. – № 21. – С. 78 – 89.
13. Zolotarev V. V. Raspredelenie stacionamogo jelektricheskogo polja v cilindricheskom neideal'nom dijelektrike / V. V. Zolotarev, V. P. Karpushenko, V. M. Zolotarev, A. A. Naumenko // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2008. – №4. – С. 65 – 69.
14. Zolotarev V. M. Vlijanie provodimosti jekranov na dijelektricheskie poter' v kabeljah / V. M. Zolotarev, V. V. Zolotarev, S. V. Buz'ko, T. Ju. Antonec, A. A. Naumenko // Vistnik NTU «HP». – 2014. – № 21. – С. 50 – 54.
15. Naboka B. G. Obosnovanie jelektrofizicheskikh karakteristik poluprovodjashhijh jekranov silovyh kabelej vysokogo naprjazhenija so sshitoj izolaciej / B. G. Naboka, A. V. Besprozvannyh, E. S. Moskvitin // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2010. – №3. – С. 44 – 47.
16. Kucherjavaja I. N. Defekty poluprovodjashhego sloja po zhile i ih vlijanie na raspredelenie jelektricheskogo polja v polijetilenovoj izolacii / I. N. Kucherjavaja // Tehnicheskaja jelektrodinamika. – 2018. – № 1. – S. 17 – 22.
17. Shhebenjuk L. A. Doslidzhennja vtrat v izolacii visokovol'tnih silovyh kabeliv z polimernoju izolacieju / L. A. Shhebenjuk, T. Ju. Antonec' // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2016. – №4. – С. 58 – 62.
18. Besprozvannyh A. V. Fizicheskaja interpretacija krivyh vosstanavlivajushhegosja naprjazhenija na osnove shem zameshenija neodnorodnogo dijelektrika / A. V. Besprozvannyh // Tehnichna elektrodinamika. – 2009. – № 6. – С. 23 – 27.

19. Besprozvannyh A. V., Naboka B. G. Matematicheskie modeli i metody rascheta jelektrioizoljacionnyh konstrukcij. – H.: NTU «HPI», 2012. – 108 s.
20. Tareev B. M. Fizika dijelektricheskijh materialov M.: Jenergoizdat, 1982. – 320 s.
21. Kovrigin L. A. Prognozirovanie ostatochnogo resursa silovyh kabelej po vozvratnomu naprjazheniju / L. A. Kovrigin, L. A. Sidel'nikov // KABEL" – news 2009. – № 8. – С. 54 – 56.
22. Ol'shevskij A. M. Nerazrushajushhaja diagnostika silovyh kabel'nyh linij. Sostojanie i perspektivy / A. M. Ol'shevskij // Jelektricheskie seti i sistemy. – 2013. – № 5. – С. 46 – 51.
23. Tapan Kumar Saha Experience with return voltage measurements for assessing insulation conditions in service aged transformers / Tapan Kumar Saha, Zheng Tong Yao // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2003. – № 1. – P. 128 – 135.
24. Besprozvannyh A. V. Sovremennye jelektricheskie metody kontrolja i diagnostiki silovyh kabelej so sshitoj polijetilenovoj izoljaciej / A. V. Besprozvannyh, E. S. Moskvitin // Jelektricheskie seti i sistemy. – 2013. – № 5. – С. 52 – 58.
25. Roziskulov S. S. Perehidni procesi u neodnorodnij elektrichnij izoljaciej visokovol'tnih kabeliv pri ii diagnostici metodami vimirjuvannja i analizu strumu relaksacii ta poverhnevoi naprugi / S. S. Rozisulov, V. I. Mihajliv, B. L. Grabchuk // Metodi ta priladi kontrolju jakosti. – 2013. – № 1. – С. 84 – 91.
26. Glinka T. Diagnostika izoljaciej obmotok jelektricheskijh mashin postojannym naprjazheniem / T. Glinka // Jelektrichestvo. – 1998. – № 1. – С. 60 – 63.
27. Gonzales E. A. Novel polarization index evaluation formula and fractional-order dynamics in electric motor insulation resistance / E. A. Gonzales, I. Petras, M. D. Ortigueira // Fractional calculus & applied analysis. – 2018. – № 3. – P. 613 – 627.
28. Serebrjakov A. S. Sposob izmerenija ustanovivshegosja znachenija soprotivlenija izoljaciej / A. S. Serebrjakov // Jelektrichestvo. – 1999. – № 5. – С. 40 – 43.
29. Lachin V. I. Metody i ustrojstva izmerenija soprotivlenija izoljaciej jelektrojenergeticheskijh ob'ektov i ih klassifikacija / V. I. Lachin, Nguen Kuok Ui, K. Ju. Solomencev, I. G. Balaban // Izvestija vuzov. Severo-Kavkazskij region – 2015. – № 1. – С. 84 – 89.
30. Lachin V. I. Vlijanie toka absorbcii na process izmerenija soprotivlenija izoljaciej / V. I. Lachin, Nguen Kuok Ui, K. Ju. Solomencev, // Izvestija vuzov. Severo-Kavkazskij region – 2013. – № 6. – С. 32 – 35.
31. Lachin V. I. Sravnitel'nyj analiz matematicheskijh modelej approksimacii toka absorbcii / V. I. Lachin, Nguen Kuok Ui, K. Ju. Solomencev, I. G. Balaban // Izvestija vuzov. Severo-Kavkazskij region – 2015. – № 2. – С. 14 – 18.
32. Lushhejkin G. A. Metody issledovanija jelektricheskijh svojstv polimerov / G. A. Lushhejkin. – M.: Himija, 1988. – 160 s.

Поступила (received) 17.11.21

Відомості про авторів/Сведения про авторов/About the Authors

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

Р.Э. МОХНАЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КОМПЕНСАЦИОННЫХ МЕДНЫХ И МЕДНОСТАЛЬНЫХ ТОКОПРОВОДОВ

В статье изложена технология изготовления токопроводов для систем питания кранов, железнодорожных транспортных средств, мощных ответственных электродвигателей и энергосистем. Показаны результаты исследований для медно-стальных образцов, в указанных системах происходят снижение потерь материалов, за счет увеличения прочности и долговечности изделий. Предложенная технология может быть использована для использования стале-медных проводов в системах компенсации потерь электроснабжения.

Ключевые слова: система подпитки, тролля, шина подпитки, наноприсадки, потери мощности и напряжения.

Р.Е. МОХНАЧ

ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА КОМПЕНСАЦІЙНИХ МЕДНИХ І МІДНОСТАЛЬНИХ СТРУМОПРОВОДІВ

У статті викладена технологія виготовлення струмопроводів для систем живлення кранів, залізничних транспортних засобів, потужних відповідальних електродвигунів і енергосистем. Показані результати досліджень для мідно-сталевих зразків, в зазначених системах відбуваються зниження втрат матеріалів, за рахунок збільшення міцності і довговічності виробів. Запропонована технологія може бути використана для використання стале-мідних проводів в системах компенсації втрат електропостачання.

Ключові слова: система підживлення, тролля, шина живлення, наноприсадки, втрати потужності і напруги.

R.E. MOKHNACH

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY OF PRODUCTION OF COMPENSATION COPPER AND COPPER STEEL CURRENT DUCTS

The article describes the technology of manufacturing conductors for power supply systems for cranes, railway vehicles, powerful critical electric motors and power systems. The results of studies for copper-steel samples are shown; in these systems there is a decrease in material losses due to an increase in the strength and durability of products. The proposed technology can be used to use steel-copper wires in power supply loss compensation systems.

Keywords: make-up system, trolley, make-up bus, nano-additives, power and voltage losses

Введение. В мировом производстве и потреблении электротехнических материалов наметилась и постоянно прослеживается устойчивая тенденция к увеличению доли применению комплексных, композиционных материалов. Это связано не только с тем, что природные запасы легирующих элементов, входящих в состав электротехнических материалов, таких, как вольфрам и медь, алюминий, весьма ограничены, но и с востребованностью новых конструкционных и технических свойств деталей электроаппаратов. Для целей техники на транспорте используют медные медно-стальные и алюмомедные компенсационные провода для электроснабжения мощных ответственных электродвигателей. Производство меди марки М0, используемой для таких проводников, очень энергозатратный и трудоемкий процесс. Следует учитывать и очень низкий коэффициент скольжения и прочности медных проводников. На современном этапе производства пути повышения качества и конкурентоспособности металлопродукции для электротехнических машин и механизмов на мировом рынке сводятся к совершенствованию существующих и разработке новых технологических схем производства. Реализация имеющихся способов экономии основных электротехнических элементов состоит в разработке мероприятий по уменьшению содержания последних в конечных изделиях без снижения эксплуатационных характеристик последних. При этом совершенствование эксплуатационных свойств материала осуществляют усложнением технологии его производства (ва-

кумный и электрошлаковый переплав, рациональное легирование; использование порошковых и композитных материалов; модифицирование и др.), а также различными вариантами термомеханической обработки. Считают, что такие меры, как нанесение покрытий и утилизация отходов, направленные на улучшение качества материалов, связаны с дополнительными энергетическими и материальными затратами и не обеспечивают существенной экономии легирующих и снижении себестоимости продукции.

Анализ процесса функционирования аппаратов и токопроводов транспортных средств свидетельствует о том, что в непосредственном взаимодействии с рабочей поверхностью детали находится только контактный (рабочий) слой. Поэтому, выделив в изделии рабочую зону, можно осуществить полную замену части инструмента другими материалами и, как более вероятным и близким по свойствам, металлами и сплавами. За счет рационального расположения слоев из армирующей середины (несущей основную механическую нагрузку) и рабочей поверхности (осуществляющую основную электрическую работу) может быть достигнуто значительное ресурсосбережение.

Однако обеспечение заданных конструктивных особенностей слоистых заготовок, предназначенных для изготовления, в значительной мере зависит от возможностей технологии их производства. При этом в надежности и работоспособности детали большое значение имеет возможность обеспечения прочной зоны контакта слоев или переходной зоны, определя-

© Р.Э. Мохнач, 2021

емых их составом, структурой и свойствами.

Актуальной является проблема повышения прочностных свойств медной матрицы без заметного снижения проводимости [4]. Большинство реализуемых на практике методов получения биметаллических литых слитков и заготовок, например, предусматривающие использование вставок, сварку слоев, а также применение промежуточных слоев, не могут гарантировать надежного соединения разнородных слоев [1, 5]. Поэтому разработка эффективной технологии получения биметаллического электротехнического материала представляет собой актуальную задачу. (Под термином «слоистые» или биметаллические подразумеваются материалы с соизмеримой толщиной слоев, получаемые преимущественно металлургическими технологиями.)

Целью работы является: разработка методов получения медного и сталемедного токопровода, используемого в троллеях для компенсации потерь в электропитании электродвигателей кранов, троллеях подачи электроснабжения в дуговых электропечах, для вставок в токосъемниках пантографов электропоездов. В последнее время большое распространение получило применение в таких компенсирующих троллеях применение биметаллического провода (сталемедного, медно-алюминиевого, с армирующей металлической вставкой и медной матрицей).

Основные исследования. Для целей токосъема на транспортных установках используют медные токопроводы и токосъемники с биметаллическими материалами (медносталевыми и алюмосталевыми проводниками, имеющими низкие триботехнические характеристики). Для передачи электроэнергии используют медносталевые и медные провода, свитые из нескольких тонких жил проводников. Изделия из меди обладают низкой износостойкостью, для повышения прочности используют медносталевые провода. Довольно остро стоит вопрос о повышении прочности, износостойкости и электропроводности такой проводниковой продукции. Проведя анализ существующих методов производства проводниковой продукции рассмотренной номенклатуры, пришли к выводу, что наиболее рациональным является метод дисперсионного упрочнения основного материала. Для этого, необходимо, чтобы в медной матрице фаза (упрочняющая, и инициирующая кристаллообразование) представляла собой сверхмелкозернистые и однородно рассеянные частицы, имеющие некогерентную границу раздела с матрицей. Образование частиц второй фазы путем легирования меди некоторыми элементами, например, бериллием, неизбежно приводит к снижению проводимости меди. Более рационально введение в жидкую медь наночастиц и обеспечение их равномерного распределения по сечению матрицы.

1.1 Для наночастиц необходимо учитывать падение температуры плавления мелких кристаллов в зависимости от их размера. Разница между температурой плавления маленького кристалла и нормальной (макроскопической) точкой плавления выражается уравнением Гиббса-Томсона.

$$\frac{(T_{\infty} - T_r)}{T_{\infty}} = \frac{\Delta T}{T_{ni}}$$

где T_{∞} – нормальная температура плавления; ΔT – разность между точкой плавления микро- и макрокристалла. T_r – температура плавления, при которой плавится кристалл с радиусом r .

Кристаллы твердого металла, близкие по размеру, с наночастицами способны растворяться в жидком металле за короткий промежуток времени. Следовательно, наночастицы металлов, температура плавления которых схожа с температурой плавления меди, неэффективны в качестве консолидирующей фазы. Некоторые неметаллические соединения, присутствуя в расплаве, способны придавать новые свойства матричному материалу. Примером такого соединения является нитрид бора [1, 2, 3]. На лабораторной установке были получены образцы круглого и фигурного сечения длиной до 20 м, а также заготовки круглого сечения из чистой меди. Предел прочности металлической матрицы изделий на 20% превышал аналогичный показатель марки МФ-85 медных образцов.

1.2 Необходимым условием равномерного распределения наночастиц в расплаве является минимальная взаимная адгезия и большая адгезия к расплаву. Идеальным условием явилось бы начало зарождения кристаллов металлической матрицы (меди) на введенных в расплав наночастицах.

Для армирующего основания существенное влияние на качество последнего оказывают поверхностные явления на границах разделения «жидкий металл – твердое тело». Надежность соединения матрицы и стальной арматурной вставки во многом определяется смачиванием жидкого металла твердого тела. Условия увлажнения: поверхностное натяжение на границе жидкости с твердым телом должно быть меньше поверхностного натяжения твердого тела с газовой фазой.

В то же время введение наночастиц не должно увеличивать краевой угол смачивания и поверхностное натяжение плавления, так как в этом случае нарушается прочность соединения медной матрицы и стальной арматуры.

В таблице приведены результаты расчетов по формуле:

$$\sigma_T = \frac{Gb}{R},$$

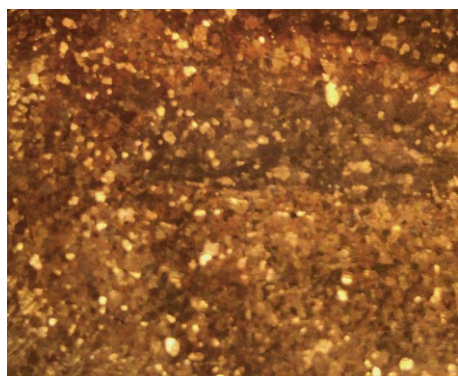
где G – модуль сдвига, для меди $G = 48000$ МПа; b – вектор Бюргерса, $b = 2,56 \times 10^{-9}$ м; R – расстояние между наночастицами, м.

Таблица – Влияние расстояния между наночастицами на предел текучести меди

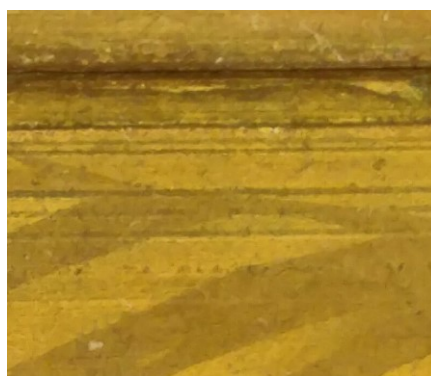
Расстояние между наночастицами, м	Увеличение предела текучести, МПа
10-2	0,0122
10-3	0,12288
10-4	1,2288
10-5	12,288
10-6	122,88
10-7	1228,8

По результатам расчетов сделан вывод о размерах, модифицирующих медную матрицу, и предположение о количестве такого модификатора.

Наиболее близким к меди, по температуре плавления, и некоторым другим физико-химическим свойствам (теплопроводность, электропроводность, одинаковый структурный тип и пространственная группа, близкие атомные радиусы) из приведенных металлов



а



б

Рис. 1. Структура модифицированного медного проводника:
а – модифицированная микроструктура ($\times 150$), б – макроструктура проводника в изделии ($\times 10$)

1.4 На электротехнические характеристики, оказывают немаловажные влияния следующие рассмотренные явления. Существенное влияние для армированных отливок на качество последних оказывают поверхностные явления на границах раздела «жидкий металл – твердое тело» [2, 3]. Надежное соединение медной матрицы и стальной армирующей вставки в значительной степени определяется смачиванием жидким расплавом твердого тела. Обычные условия смачивания таковы - поверхностное натяжение на границе жидкости с твердым телом должно быть меньше поверхностного натяжения твердого тела с газовой фазой. Условия равновесия на границе раздела трех фаз определяются следующим уравнением [6]:

$$\sigma_{T-G} = \sigma_{T-J} + \sigma_{J-G} \cos \theta$$

где θ – угол, образованный касательной к границе раздела «жидкость – газ» (ж – г) и границей раздела «твердое тело – жидкость» (т – ж) (краевой угол смачивания) [3].

Работа адгезии $A_{адг}$ определяется по уравнению:

$$A_{адг} = \sigma_{T-G} + \sigma_{J-G} - \sigma_{T-J}$$

или

$$A_{адг} = \sigma_{J-G} (1 - \cos \theta)$$

Работа поверхностного натяжения тем больше, чем меньше межфазное натяжение.

Растекание жидкости по поверхности твердого тела может быть выражено через работу адгезии и работу когезии. Условие растекания таково: работа адгезии должна быть больше работы когезии.

Растекание жидкости по поверхности твердого тела характеризуется коэффициентом растекания $K_{ж-т.раст.}$

$$K_{ж-т.раст.} = \sigma_{J-G} (\cos \theta - 1)$$

В свою очередь $\cos \theta$ является функцией поверхностного натяжения $\theta_{ж-г}$:

является серебро [6]. Логично предположить, что и значения Tr меди и серебра будут близкими. Однако исследования показали, что наиболее перспективными материалами могут стать наночастицы материалов температура плавления которых значительно превышает температуру плавления меди. Соединения, наночастицы которых, вводятся в расплав будут являться центрами кристаллизации.

$$\cos \theta = \frac{(\sigma_{T-G} - \sigma_{T-J})}{\sigma_{J-G}}$$

Из всех преобразований видно, что необходимым условием равномерного распределения наночастиц в расплаве является минимальная взаимная адгезия и большая адгезия к расплаву. 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 стальной вставки.

Изготовлены опытные образцы медно-стального композитного материала в индукционной печи, по центру индуктора размещали графитовый тигель, внутреннее сечение которого соответствовало сечению МФ-85 в масштабе 1:5. В донной части тигля закрепляли стальную армирующую вставку. Пространство между вставкой и стенками тигля заполнялось отрезками медной проволоки марки М0. При достижении температуры 1100°C медь расплавлялась и заполняла пространство между внутренней частью тигля и стальной армирующей вставкой. На сконструированной системе непрерывной вытяжки, по мере заполнения тигля производили формирование готового изделия. Расплавление медной шихты осуществлялось в условиях восстановительной атмосферы внутри тигля, учитывая высокую активность модифицирующей присадки бора. Расход модификатора просчитывали согласно расходу жидкого расплава на формирование конечной заготовки. В условиях высокой температуры жидкой меди (около 1200°C) в расплавленной меди возможна диффузия железа, что может повлиять на магнитную проницаемость металлической вставки. Полученная многослойная заготовка характеризуется высокой однородностью состава медной матрицы за счет формирования мелкодисперсной структуры по объёму заготовки.

Установка с графитовым водоохлаждаемым кристаллизатором показана на рис. 2.

В стенке металлоприёмника 1 устанавливают кристаллизатор, состоящий из водоохлаждаемой рубашки 2 и графитовых вкладышей 3, а при необходимости получения отверстия в отливке – стержень 4 с отверстиями 5 для прохода расплава. В начале процесса внутрь кристаллизатора вводят затравку-захват. Расплав, в разогретом металлоприемнике, заполняет водоохлаждаемый кристаллизатор, где начинает затвердевать в заготовку, наружный профиль которой соответствует геометрии кристаллизатора.

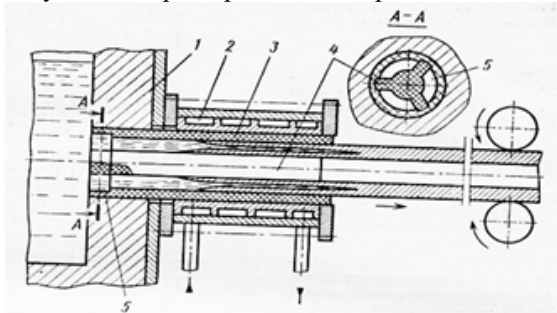


Рис. 2. Исполнительный узел кристаллизатора

Следующие технологии изготовления металлообрабатываемых проводников для штыревой электрической системы: совместная прокатка биметаллических заготовок и непрерывная разливка длинномерных композитных проводников конечной формы [1]. Обработка медной матрицы давлением снижает ее электропроводность из-за упрочнения поверхностного слоя, частый нагрев заготовки влияет на долговечность стальной арматурной вставки. Исходя из вышеизложенного, выбрали метод непрерывной разливки металла. Условия кристаллизации определялись математическим расчетом вставки матрицы из армированной стали и меди в медную изложницу с водяным охлаждением. Полученные данные использованы при разработке лабораторного кристаллизатора получения непрерывнолитого металлического матричного проводника.

Медносталльные композитные материалы сочетают в себе высокую проводимость, характерную для матрицы из чистой меди, с прочностью вставки из армирующей стали. Повышение прочностных характеристик таких материалов связано с увеличением сечения армирующей вставки. Поэтому оптимальный вариант – это комплексное повышение долговечности стальной вставки и медной матрицы. Нарушение такого условия приведет к снижению прочностных характеристик.

Выводы. Проведённый анализ физикохимических свойств прогнозируемого материала позволил выделить основные положения в технологии получения фактически нового электротехнического материала. Проведенные опытные плавки позволили получить дисперсионно упрочненный образец, полученный методом непрерывного литья, имеющий прочностные

свойства выше, чем обычный промышленный образец, что позволит апробировать применение такой медной проволоки и для троллей компенсации потерь для электрического питания приводов кранов. Разработан усовершенствованный метод получения медных композиционных токопроводов.

Список літератури:

1. Литейные технологии получения биметаллических слитков / Т. М.Титова, В. В.Лунев, Г. А.Бялик, С. И. Адамчук // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2002. Спец. вып. № 7. С. 206-209.
2. 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. doi: https://doi.org/10.7449/2019mst/2019/mst_2019_439_443
3. 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.
4. Чекуров В. В., Крупеников С. А. Теплофизическая модель получения биметаллического инструмента // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1989. № 9. С. 126-129.
5. Формирование области соединения сплавов в литых металлических композициях / В. Кондратенко, В. Лейбензон, Т. Титова // *Third international congress "Mechanical engineering-technologies'01"*. Sofia, Bulgaria. 2001. P. 285-288.
6. К. Мейер. Физико-химическая кристаллография. М.: Металлургия, 1972. – 480 с.
7. Андриенко П.Д., Мохнач Р.Е. Мідні і сталемідні композиційні матеріали з високими електротехнічними властивостями. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика, 2020, No 1, С. 47-52. doi: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2020.1.10>

References (transliterated)

1. Liteynnye tekhnologii polucheniya bimetallicheskih slitkov / T. M.Titova, V. V.Lunev, G. A.Byalik, S. I. Adamchuk // *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promysh-lennost'*. 2002. Spets. vyp. № 7. S. 206-209.
2. 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. doi: https://doi.org/10.7449/2019mst/2019/mst_2019_439_443
3. Creation of wearproof eutecticum composition materi-als for the details of the high temperature dynamic sys-tems/Tsyganov, V., Ivschenko, L., Byalik, H., Mokhnach, R., Sakhniuk, N.// *MS and T 2019 - Materials Science and Technology 2019*, pp. 450-456.
4. Chekurov V. V., Krupennikov S. A. Teplofizicheskaya model' polucheniya bimetallichesкого инструмента // *Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1989. № 9. S. 126-129.
5. Formirovaniye oblasti soyedineniya splavov v litykh metallicheskih kompozitsiyakh / V. Kondratenko, V. Leybenzon, T. Titova // *Third international congress "Mechanical engineering-technologies'01"*. Sofia, Bulgaria. 2001. P. 285-288.
6. K. Meyyer. Fiziko-khimicheskaya kristallografiya. M.: Metallurgiya, 1972. – 480 s.
7. Andriyenko P.D., Mokhnach R.Ye. Mідні і сталемідні kompozitsiyni materialy z visokimi yelektrotekhnichnimi vlastivostyami. Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «KHPÍ». Seriya: Problemi udoskonalyuvannya yelektrechnikh mashin i aparativ. Teoriya i praktika, 2020, No 1, S. 47-52. doi: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2020.1.10>

Поступила (received) 09.10.2021

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.

П. Д. АНДРІЄНКО, В. В. ВАСИЛЕВСЬКИЙ, І. Ю. ВІТЦІВСЬКИЙ

ДОСВІД ВПРОВАДЖЕННЯ В УЧБОВИЙ ПРОЦЕС СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ FDM 3D ДРУКУ

Однією з найбільш поширених технологій адитивного виробництва є моделювання методом пошарового наплавлення Fused Deposition Modeling. В якості матеріалів для друку використовуються як стандартні матеріали, так і матеріали з покращеними характеристиками та композитні матеріали. Серед сфер застосування FDM друку основними є швидке прототипування а також дрібносерійне та серійне виробництво. Робота присвячена впровадженню технології FDM 3D друку в учбовий процес підготовки здобувачів освіти за спеціальністю 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка". Здійснено дослідження особливостей технології адитивного виробництва деталей електротехнічних пристроїв методом FDM друку. Виконаний друк деталей чотирьох типорозмірів із використанням пластиків акрилонітріл-бутадієн-стирол ABS+ та полілактид PLA, а саме каркасів трансформаторів струму у кількості 110 штук та корпусів датчиків у кількості 100 штук. Для друку використовувався FDM 3D принтер з кінематичною схемою XZ Head Y Bed з відкритою робочою камерою. Наведений аналіз дефектів готових виробів, основними дефектами є відхилення реальних розмірів та геометричної форми готових виробів. Розглянуті шляхи запобігання виникненню цих дефектів, а саме корекція розмірів моделі на етапі підготовки моделі до друку, мінімізація щільності заповнення моделі, використання країв в моделях, встановлення оптимальної температури робочої платформи та одночасний друк декількох виробів. Результати дослідження особливостей технології виробництва деталей електротехнічних пристроїв шляхом FDM друку дозволили розробити комплекс лабораторних робіт, присвячених вивченню основ сучасних технологій адитивного виробництва для здобувачів освіти спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка".

Ключові слова: адитивне виробництво, 3D друк, термопластик, деталь, точність, моделювання.

П. Д. АНДРИЕНКО, В. В. ВАСИЛЕВСКИЙ, И. Ю. ВИТЦИВСКИЙ

ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ FDM 3D ПЕЧАТИ

Одной из наиболее распространенных технологий аддитивного производства является моделирование методом послойного наплавления Fused Deposition Modeling. В качестве материалов для печати используются стандартные материалы, материалы с улучшенными характеристиками и композитные материалы. Среди сфер применения FDM печати основными являются быстрое прототипирование а также мелкосерийное и серийное производство. Работа посвящена внедрению технологии FDM 3D печати в учебный процесс подготовки студентов специальности 141 "Электроэнергетика, электротехника и электромеханика". Проведено исследование особенностей технологии аддитивного производства деталей электротехнических устройств методом FDM печати. Выполнена печать деталей четырех типоразмеров с использованием пластика ABS + и PLA, а именно каркасов трансформаторов тока в количестве 110 штук и корпусов датчиков в количестве 100 штук. Для печати использовался FDM 3D принтер построенный на кинематической схеме XZ Head Y Bed с открытой рабочей камерой. Проведен анализ дефектов готовых изделий, который показал, что основными дефектами являются отклонения реальных размеров и геометрической формы готовых изделий. Рассмотрены пути предотвращения возникновения этих дефектов, а именно коррекция размеров модели на этапе подготовки модели к печати, минимизация плотности заполнения модели, использование краев в моделях, установление оптимальной температуры рабочей платформы и одновременная печать нескольких изделий. Результаты исследования особенностей технологии производства деталей электротехнических устройств путем FDM печати позволили разработать комплекс лабораторных работ, посвященных изучению основ современных технологий аддитивного производства для студентов специальности 141 "Электроэнергетика, электротехника и электромеханика".

Ключевые слова: адитивное производство, 3D печать, термопластик, деталь, точность, моделирование.

P. D. ANDRIENKO, V. V. VASILEVSKIJ, I. Y. VITTSIVSKY

EXPERIENCE OF IMPLEMENTATION IN EDUCATIONAL PROCESS MODERN TECHNOLOGIES OF FDM 3D PRINTING

Fused Deposition Modeling is an additive manufacturing technology where a temperature-controlled head extrudes a thermoplastic material onto a build platform in a predetermined path. Standard, advanced thermoplastics and composites are used for printing. Among the areas of application for FDM printing, the main ones are rapid prototyping, as well as small-scale and batch production. The purpose of the work is the implementation of FDM 3D printing technology in the educational process of students in specialty 141 "Electroenergy, electrotechnics and electromechanics". The features of the technology of additive manufacturing of electrical apparatuses parts by the method of FDM printing have been investigated. Parts of four standard sizes were printed using ABS + and PLA plastics, namely, current transformer carcasses in the amount of 110 pieces and sensor bodies in the amount of 100 pieces. For printing, an FDM 3D printer was used built on the XZ Head Y Bed kinematic scheme with an open working chamber. The analysis of defects in finished products was carried out, which showed that the main defects are deviations of the actual dimensions and geometric shape of the finished products. Ways to prevent the occurrence of these defects are considered, namely, correcting the size of the model at the stage of preparing the model for printing, minimizing the filling density of the model, using brims in models, setting the optimal temperature of the working platform and simultaneously printing several products. The results of the study of features of the technology of additive manufacturing of electrical apparatuses parts by the method of FDM printing made it possible to develop a set of laboratory works for students of the specialty 141 "Electroenergy, electrotechnics and electromechanics".

Key words: additive manufacturing, 3D printing, thermoplastic, detail, precision, modeling.

Вступ. Адитивне виробництво (Additive Manufacturing) або 3D друк – це процес створення фізичного об'єкту на основі комп'ютерної моделі [1]. В залежності від технології для друку можуть використовуватись термопласти, фотополімерні матеріали, металеві сплави, папір і т. д [2].

Однією з найбільш поширених технологій адитивного виробництва є 3D друк методом пошарового наплавлення або Fused Deposition Modeling (FDM). Сутність методу полягає в пошаровому формуванні об'єкту шляхом екструзії розплавленого термопласту на робочий стіл 3D принтера [3].

© П.Д. Андрієнко, В.В. Василевський, І.Ю. Вітцівський, 2021

Широке розповсюдження FDM друку обумовлене відносною доступністю та різноманіттям термопластів і 3D принтерів (як побутових, так і промислових). До недоліків технології відноситься порівняно низька швидкість "виращування" виробів, а також обмеження, що накладаються властивостями пластиків. В той же час використання технології FDM друку дозволяє знизити вартість та трудомісткість при одиничному та дрібносерійному виробництві у порівнянні із традиційними методами отримання деталей з пластмас.

Серед сфер застосування FDM друку можна виділити швидке прототипування, дрібносерійне та серійне виробництво, в тому числі деталей електротехнічних пристроїв, які мають складну геометричну форму. Тому актуальною є задача впровадження технології FDM 3D друку в учбовий процес підготовки здобувачів освіти за спеціальністю 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка".

Аналіз основних досягнень. Існує ряд робіт, в яких розглядаються особливості технології FDM друку з точки зору виробництва деталей та вузлів електротехнічних пристроїв. Так, мікроструктура та електричні властивості стандартних пластиків ABS (акрилонітрил-бутадиєн-стирол) та PLA (полілактид) при FDM друці досліджено в роботі [4]. Автори дійшли висновку, що шорсткість поверхні та наявність внутрішніх порожнин в готовому виробі можуть призвести до виникнення часткових розрядів. Проте в цілому діелектричні властивості розглянутих пластиків є задовільними, тому вони можуть бути використані в конструкціях електричних та електронних апаратів низької напруги. Крім того, відмічено, що ABS пластик має вищу механічну міцність у порівнянні з PLA.

Дослідження механічної міцності найбільш розповсюджених пластиків для FDM друку наведені в ряді робіт [5, 6]. Результати проведених авторами досліджень підтверджують достатньо високий рівень механічних властивостей таких пластиків, як ABS та PLA.

Ряд виробників пропонує композитні матеріали для використання при FDM друці. В роботі [7] наведені результати FEM моделювання вентильного двигуна, статор та ротор якого виконані з матеріалу під назвою The Magnetic PLA. В роботі зазначено, що отримана конструкція має невисоку точність геометричних розмірів, потребує постобробки а під час експлуатації – додаткового охолодження.

Створення ємнісних та резистивних датчиків за допомогою FDM друку розглянуто в роботі [8]. Для досліджень використовувалось два типи матеріалів: термопластичний поліуретан TPU та PLAcb, наведені результати виробництва резистивного датчика температури та ємнісного датчика сили.

Приклад сумісного застосування технологій FDM та Paste Extrusion System для виробництва суперконденсатору (іоністора) наведений в [9]. Корпус пристрою виконаний за допомогою FDM друку із використанням термопласту PLA.

Мета роботи полягає в розробці комплексу лабораторних робіт, присвячених вивченню основ сучасних технологій адитивного виробництва деталей та

вузлів електротехнічних пристроїв для здобувачів освіти спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка".

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати дослідження особливостей технологічного процесу FDM 3D друку із застосуванням стандартних матеріалів.

3D принтер та матеріали. При виконанні роботи використовувався FDM 3D принтер, кінематична схема якого заснована на декартовій системі координат *XZ Head Y Bed*. Така схема передбачає рух стола принтера за віссю *Y*, а екструдера (механізму, який здійснює подачу та плавлення матеріалу) за осями *X* та *Z*. Особливістю конструкції принтерів з кінематичною схемою *XZ Head Y Bed* є застосування відкритої робочої камери. Це в свою чергу ускладнює використання термопластів, яким властива усадка в процесі друку, тому необхідним є забезпечення якісної адгезії між деталлю та робочою поверхнею.

Типовий процес адитивного виробництва включає в себе наступні основні етапи:

- 1) Підготовка комп'ютерної CAD моделі фізичного об'єкту.
- 2) Генерація STL (STereoLithography) файлу та завантаження готового STL файлу до програмного забезпечення 3D принтера.
- 3) Коригування масштабу моделі, її позиціонування та орієнтація для подальшої побудови.
- 4) Налаштування параметрів друку та генерація g-коду.
- 5) Друк об'єкту.
- 6) Видалення готового об'єкту з робочої платформи.
- 7) Фінішна обробка та експлуатація готового об'єкту.

Виконання розглянутого процесу необхідно здійснювати із урахуванням властивостей термопласту, який використовується для друку. При виробництві електротехнічних пристроїв вимоги, що пред'являються до термопластів аналогічні вимогам до електротехнічних пластмас, а саме: забезпечення електроізоляційних та механічних властивостей готового виробу; висока стійкість до корозії; висока хімічна стійкість та низька гігроскопічність.

Широко використовуються для FDM друку ABS пластики та композиційні полімерні матеріали на їх основі (ABS+, ABS Flex, ABS PRO та інш.). Електрична міцність ABS пластику складає 12–15 МВ/м, діелектрична проникність ϵ' при 106 Гц дорівнює 2,4–2,5 Ф/м, значення $\tan\delta = 0,008–0,02$ (в порівнянні, електрична міцність полістиролу ПС 20–23 МВ/м, $\epsilon' = 2,4–2,8$ Ф/м, $\tan\delta = 0,0002–0,0009$), температура розм'якшення 90–105 °С.

Водопоглинення становить 1% за 24 години при температурі 23°C. До переваг ABS відноситься висока механічна міцність та легкість обробки надрукованих деталей, вологостійкість та інш. Одним з основних недоліків ABS є наявність термічної усадки в процесі друку, що впливає на точність геометричної форми та розмірів отриманих деталей.

Інший популярний матеріал для друку – термопласт PLA має низьку температуру розм'якшення 50 °С, водопоглинання становить 0,7 % за 24 години при 23 °С. Це в купі з низькою механічною міцністю обмежує можливість застосування PLA для друку деталей електротехнічних пристроїв, проте є можливим його застосування для вирішення задач швидкого прототипування окремих деталей та вузлів.

Крім термопластів, розглянутих вище, вітчизняні та зарубіжні виробники пропонують пластики, які відрізняються покращеними властивостями. Так ПЕТ (поліетилентерефталат) пластик має електричну міцність 140–180 МВ/м, температуру розм'якшення 245–248 °С та водопоглинання 0,3 %. Високі механічні властивості досягаються шляхом кристалізації виробів з ПЕТ після друку. Крім того, друк із застосуванням ПЕТ передбачає достатньо високу температуру екструдера 3D принтера в діапазоні 260–270 °С.

В роботі використовувались пластики ABS+ та PLA. Марка термопласту ABS+ являється модифікацією ABS з покращеною адгезією та зменшеною термічною усадкою, завдяки чому пластик може використовуватись для друку виробів відносно великих розмірів та для використання з принтерами, які мають відкриту робочу камеру.

Результати дослідження. В якості об'єкту дослідження обраний процес друку наступних деталей:

Деталь 1 – каркас повітряного трансформатора (перший типорозмір) у кількості 85 шт.

Деталь 2 – каркас повітряного трансформатора (другий типорозмір) у кількості 25 шт.

Деталь 3 – корпус датчика (перший типорозмір) у кількості 50 шт.

Деталь 4 – корпус датчика (другий типорозмір) у кількості 50 шт.

Параметри, що використовувались для друку наведені в табл. 1.

На рис. 1 наведені комп'ютерні CAD моделі деталей 1–4, на рис. 2 – зразки деталей, отриманих в результаті друку пластиком ABS+. Деталі 1–4 мають відхилення лінійних розмірів та діаметрів отворів, значення яких наведені в табл. 2.

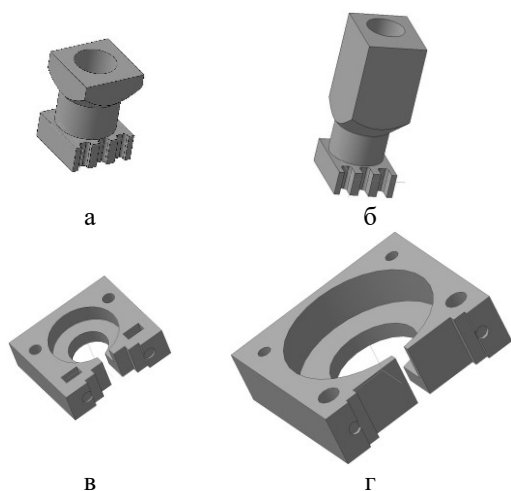


Рис. 1. CAD моделі деталей для друку

Серед основних причин виникнення відхилень реальних розмірів від їх номінальних значень при FDM друці можна виділити термічну усадку матеріалу в результаті нерівномірного охолодження (стосується ABS пластику) та відхилення реальних розмірів на величину, що дорівнює діаметру сопла екструдера 3D принтера (в даному випадку використовувалось сопло діаметром 0,4 мм).

Для підвищення точності реальних розмірів готових виробів здійснюється коригування розмірів на етапі підготовки комп'ютерної CAD моделі фізичного об'єкту. Значення скоригованих розмірів отримується з наступних виразів:

$$\begin{aligned} a_{nk} &= a_n + d_{ex} + k_a, \\ b_{nk} &= b_n + d_{ex} + k_b. \end{aligned} \quad (1)$$

де a_n, b_n – значення лінійних та діаметральних розмірів моделі до корекції, мм;

a_{nk}, b_{nk} – значення лінійних та діаметральних розмірів моделі після корекції, мм;

d_{ex} – діаметр сопла екструдера, мм;

k_a, k_b – складові, що враховують усадку матеріалу для лінійних та діаметральних розмірів, мм. Виходячи з практичного досвіду, значення k_a, k_b повинно лежати в діапазоні 0,1...0,2 мм.

Таблиця 1 – Параметри, що використовувались для друку

Параметр	Значення параметру	
	ABS +	PLA
Діаметр філаменту, мм	1,75	1,75
Температура робочої поверхні, °С	90	70
Температура екструдера, °С	225	210
Швидкість друку периметрів моделі, мм/с	45	45
Швидкість друку заповнення, мм/с	50	50
Щільність заповнення, %	20	20
Висота шарів, крім першого, мм	0,1	0,1
Висота першого шару, мм	0,2	0,2
Режим охолодження	Природне	Автоматичний режим

Коригування CAD моделей дозволяє отримати розміри, значення яких лежать в межах необхідних допусків, визначених конструкторською документацією.

В результаті нерівномірного охолодження моделі в процесі друку ABS+ пластиком відбувається викривлення нижніх шарів деталей 3 та 4 (загинання країв). Усунення даного дефекту можливе на етапі налаштування параметрів друку наступними способами:

1) Зменшення щільності заповнення деталі. Високе значення щільності заповнення збільшує викривлення геометричної форми деталі внаслідок термічної усадки. Як показав досвід, значення параметру *fill density*, що лежить в діапазоні 10–25 % дозволяє отримувати задовільні за механічною міцністю деталі та підвищує точність їх геометричної форми.

2) Застосування країв (*brim*), що дає можливість покращити адгезію та зменшити ймовірність деформації нижніх шарів друкованої деталі. Край – плоска область навколо основи моделі, висота якої дорівнює висоті одного шару. Значення параметру *ширина краю (brim width)* обирається виходячи з геометрії моделі. Так, для деталей 1 та 2 значення цього параметру обрано рівним 3 мм, тоді як для деталей 3 та 4 значення *brim width* дорівнює 8 мм.

Таблиця 2 – Отримані відхилення розмірів

Деталь	Відхилення лінійних розмірів, мм	Відхилення діаметрів отворів, мм
Деталь 1	0	-0,5 ... -0,6
Деталь 2	0	-0,5 ... -0,6
Деталь 3	-0,2	-0,5 ... -0,6
Деталь 4	-0,6	-0,5 ... -0,6

3) Встановлення оптимальної температури робочої платформи принтера, завдяки чому підвищується адгезія перших шарів друкованої деталі. Зазвичай, діапазон температур робочої платформи вказується виробником конкретного матеріалу. Так, для термопласту ABS виробництва Monofilament рекомендовано встановлювати значення температури підігріву робочої платформи у межах 105–120 °С. Для пластику ABS+, який характеризується порівняно низькою усадкою, рекомендовані температури робочої поверхні лежать в діапазоні 80–90 °С.

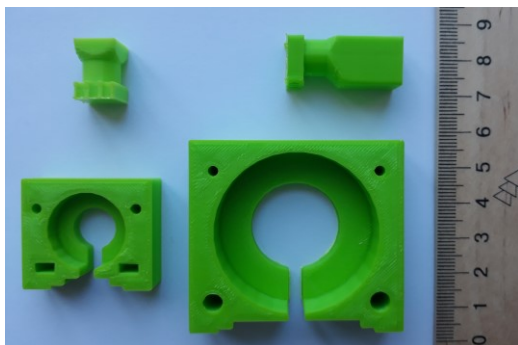


Рис. 2. Зразки деталей 1-4, виконані з ABS+

При виробництві об'єктів невеликих розмірів, таких як каркаси трансформатора 1 та 2, доцільним є одночасний друк декількох деталей. Завдяки цьому під час друку досягається більш рівномірне та якісне охолодження вже готових шарів моделі, що в свою чергу дає можливість зменшити величину деформацій геометричної форми готових виробів.

Приклад розташування деталі 1 на друкованій платі наведений на рис. 3.

Базуючись на отриманому досвіді розроблений комплекс лабораторних робіт, які включають в себе створення комп'ютерних CAD моделей розглянутих деталей, підготовку моделей до друку та вибір оптимальних параметрів друку з точки зору відповідності характеристик отриманих виробів поставленому завданню.

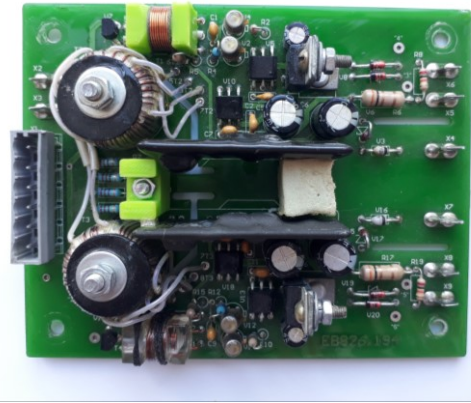


Рис. 3. Приклад розташування виготовлених деталей на друкованій платі

Результатом виконання лабораторних робіт здобувачами освіти є вивчення основ сучасних технологій адитивного виробництва, специфіки одиничного та дрібносерійного виробництва деталей за допомогою FDM 3D друку, дослідження оптимальних технологічних режимів FDM 3D друку та впливу властивостей термопластів на характеристики готових виробів.

Висновки.

1. Наведений досвід дрібносерійного FDM друку деталей електротехнічних пристроїв, а саме двох типорозмірів каркасів повітряних трансформаторів та двох типорозмірів корпусів датчиків. Для друку використовувались пластики ABS+ та PLA.

2. Виконаний аналіз дефектів, отриманих в результаті друку, таких як відхилення розмірів та геометричних форм готових виробів. Зазначених дефектів можна повністю або частково запобігти при підготовці CAD моделі об'єкту до друку та налаштуванням відповідних параметрів друку.

3. Результати дослідження особливостей технології виробництва деталей електротехнічних пристроїв шляхом FDM друку дозволили розробити комплекс лабораторних робіт, присвячених вивченню основ сучасних технологій адитивного виробництва для здобувачів освіти спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка".

Список літератури

- Gibson, Ian & Rosen, David & Stucker, Brent Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition. Springer New York, 2015. – 498 p. doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3
- Андрощук Г.О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку (II частина) / Г.О. Андрощук // Наука, технології, інновації. — 2017. — № 2 (2). — С. 29-36.
- М. М. Hoque, М. М. Н. Jony, М. М. Hasan and М. Н. Kabir, "Design and Implementation of an FDM Based 3D Printer," 2019 International Conference on Computer, Communication, Chemical, Materials and Electronic Engineering (IC4ME2), 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/IC4ME247184.2019.9036538
- X. Li et al., "Analysis of Morphology and Electrical Insulation of 3D Printing Parts," 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICHVE.2018.8642096
- J. Yang, Z. Zhao and S. Park, "Evaluation of directional mechanical properties of 3D printed polymer parts," 2015 15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), 2015, pp. 1952-1954, doi: 10.1109/ICCAS.2015.7364685

6. F. Decuir, K. Phelan and B. C. Hollins, "Mechanical Strength of 3-D Printed Filaments," 2016 32nd Southern Biomedical Engineering Conference (SBEC), 2016, pp. 47-48, doi: 10.1109/SBEC.2016.101.
7. H. Stakhiv, O. Solomchak, P. Lasek and M. Stepien, "FEM Simulation and Analysis of a Concept 3D Printed Electric Motor with Permanent Magnets," 2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), 2021, pp. 656-660, doi: 10.1109/PEMC48073.2021.9432529
8. X. Aeby, R. v. Dommelen and D. Briand, "Fully FDM 3D Printed Flexible Capacitive and Resistive Transducers," 2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII), 2019, pp. 2440-2443, doi: 10.1109/TRANSDUCERS.2019.8808268
9. A. Tanwilaisiri, R. Zhang, Y. Xu, D. Harrison and J. Fyson, "A manufacturing process for an energy storage device using 3D printing," 2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2016, pp. 888-891, doi: 10.1109/ICIT.2016.7474869
4. X. Li et al., "Analysis of Morphology and Electrical Insulation of 3D Printing Parts," 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICHVE.2018.8642096
5. J. Yang, Z. Zhao and S. Park, "Evaluation of directional mechanical properties of 3D printed polymer parts," 2015 15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), 2015, pp. 1952-1954, doi: 10.1109/ICCAS.2015.7364685.
6. F. Decuir, K. Phelan and B. C. Hollins, "Mechanical Strength of 3-D Printed Filaments," 2016 32nd Southern Biomedical Engineering Conference (SBEC), 2016, pp. 47-48, doi: 10.1109/SBEC.2016.101
7. H. Stakhiv, O. Solomchak, P. Lasek and M. Stepien, "FEM Simulation and Analysis of a Concept 3D Printed Electric Motor with Permanent Magnets," 2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), 2021, pp. 656-660, doi: 10.1109/PEMC48073.2021.9432529
8. X. Aeby, R. v. Dommelen and D. Briand, "Fully FDM 3D Printed Flexible Capacitive and Resistive Transducers," 2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII), 2019, pp. 2440-2443, doi: 10.1109/TRANSDUCERS.2019.8808268
9. A. Tanwilaisiri, R. Zhang, Y. Xu, D. Harrison and J. Fyson, "A manufacturing process for an energy storage device using 3D printing," 2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2016, pp. 888-891, doi: 10.1109/ICIT.2016.7474869

References (transliterated)

1. Gibson, Ian & Rosen, David & Stucker, Brent Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition. Springer New York, 2015. – 498 p. doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3
2. Androshchuk H.O. Adytyvni tekhnolohii: perspektyvy i problemy 3D-druku (II chastyna) [Additive technology: prospects and challenges of 3D-print (Second part)] *Nauka, tekhnolohii, innovatsii* – Science, technology, innovation, 2017, No. 2 (2), pp. 29-36.
3. M. M. Hoque, M. M. H. Jony, M. M. Hasan and M. H. Kabir, "Design and Implementation of an FDM Based 3D Printer," 2019 International Conference on Computer, Communication, Chemical, Ma-

- terials and Electronic Engineering (IC4ME2), 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/IC4ME247184.2019.9036538
4. X. Li et al., "Analysis of Morphology and Electrical Insulation of 3D Printing Parts," 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICHVE.2018.8642096
5. J. Yang, Z. Zhao and S. Park, "Evaluation of directional mechanical properties of 3D printed polymer parts," 2015 15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), 2015, pp. 1952-1954, doi: 10.1109/ICCAS.2015.7364685.
6. F. Decuir, K. Phelan and B. C. Hollins, "Mechanical Strength of 3-D Printed Filaments," 2016 32nd Southern Biomedical Engineering Conference (SBEC), 2016, pp. 47-48, doi: 10.1109/SBEC.2016.101
7. H. Stakhiv, O. Solomchak, P. Lasek and M. Stepien, "FEM Simulation and Analysis of a Concept 3D Printed Electric Motor with Permanent Magnets," 2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), 2021, pp. 656-660, doi: 10.1109/PEMC48073.2021.9432529
8. X. Aeby, R. v. Dommelen and D. Briand, "Fully FDM 3D Printed Flexible Capacitive and Resistive Transducers," 2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII), 2019, pp. 2440-2443, doi: 10.1109/TRANSDUCERS.2019.8808268
9. A. Tanwilaisiri, R. Zhang, Y. Xu, D. Harrison and J. Fyson, "A manufacturing process for an energy storage device using 3D printing," 2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2016, pp. 888-891, doi: 10.1109/ICIT.2016.7474869

Поступила (received) 11.10.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Андрієнко Петро Дмитрович (Андрюенко Петр Дмитриевич, Andrienko Petr Dmitrievich) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електричних та електронних апаратів, Національний університет "Запорізька політехніка", тел. +38 (050) 484-16-71, e-mail: andrpd@ukr.net.

Василевський Володимир Валентинович (Василевский Владимир Валентинович, Vasilevskij Vladimir Valentinovich) – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри електричних та електронних апаратів, Національний університет "Запорізька політехніка", тел. +38 (050) 889-30-73, e-mail: lisses@ukr.net.

Вітцівський Іван Юрійович (Витцивский Иван Юрьевич, Vitsivskiy Ivan Yuriiovych) – студент кафедри електричних та електронних апаратів, Національний університет "Запорізька політехніка", тел. +38 (096) 005-18-47, e-mail: ivan.0960051847@gmail.com.

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

ЧЕЛОВЕЧЕСКОЕ ТЕЛО КАК ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ

В статье рассматриваются актуальные проблемы использования энергии, выделяемой человеческим телом. Возникает вопрос, а сколько энергии может вырабатывать человеческое тело? А возможно ли использовать эту энергию для бытовых и промышленных нужд? В 18 и 19 веках появились первые научные работы на эту тему. Выяснилось, что носителями зарядов в белках живого организма являются протоны и электроны, которые вместе с системой электронно-дырочной проводимости создают присущую только живому организму проводимость. Электрическая активность мозга оценивается импульсами напряжения амплитудой 500 мкВ различной частоты от 0,5 до 55 Гц. Получить импульсы с такой частотой и такой амплитудой от носителей заряда только ионного типа невозможно. Электрохимические источники тока инерционны, поэтому это может являться прямым доказательством наличия в мозгу и нервной системе электронного движения носителей заряда. Вполне реально использовать тепловую энергию человеческого тела. В настоящее время центральное здание Стокгольмского железнодорожного вокзала превращено в своеобразный экспериментальный полигон. Ежедневно через здание вокзала проходит около 250 тыс. человек, которые выделяют до 25 МВт тепловой энергии. Большая ее часть в виде нагретого воздуха собирается в вентиляции и через теплообменники энергия передается на нагрев воды в системе отопления другого здания. По приблизительным оценкам эффективность такой системы позволяет экономить до 25% энергии, расходуемой на отопление здания. Внутри человека вырабатываются электрические токи различных частот в 7 биологических электростанциях: в сердце, в мозге и в пяти органах чувств. Все электричество, которое вырабатывается внутри человеческого организма, поглощается его же тканями. Ни один электрон, произведенный внутри живого организма, не покидает человеческое тело, и не переходит в окружающую среду, а поглощается кожей. Этим и обусловлена замкнутость электрической системы человека. Организм сам поглощает все электричество, которое ранее он же и произвел. Вырабатываемая человеческим телом энергия подразделяется на механическую, тепловую и электрическую. Наиболее эффективно можно использовать тепловую энергию человеческого тела. Механическая энергия также может быть использована, однако с гораздо меньшей эффективностью. Электрическую энергию человеческого тела на данном этапе развития науки и техники использовать практически невозможно. Ее использование видимо станет реальным в очень отдаленном будущем.

Ключевые слова: тепловая энергия человеческого тела, электрическая активность мозга, биоток

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

ТІЛО ЛЮДИНИ ЯК ДЖЕРЕЛО ЕНЕРГІЇ

У статті розглядаються актуальні проблеми використання енергії, що виділяється людським тілом. Виникає питання, а скільки енергії може виробляти людське тіло чи енергії? А чи можливо використати цю енергію для побутових та промислових потреб? У 18 та 19 століттях з'явилися перші наукові роботи на цю тему. З'ясувалося, що носіями зарядів у білках живого організму є іони (протоми та електрони), які разом із системою електронно-діркової провідності створюють єдину, властиву лише живому організму провідність. Електрична активність мозку оцінюється імпульсами напруги амплітудою 500 мкВ різної частоти від 0,5 до 55 Гц. Отримати імпульси з такою частотою та такою амплітудою від носіїв заряду лише іонного типу неможливо. Електрохімічні джерела струму інерційні, тому цей факт може бути прямим доказом наявності в мозку та нервовій системі загалом електронного руху носіїв заряду. Цілком реально використовувати теплову енергію людського тіла. В даний час центральна будівля Стокгольмського залізничного вокзалу перетворена на своєрідний експериментальний полігон. Щодобово через будівлю вокзалу проходить близько 250 тис. осіб, що виділяють до 25 МВт теплової енергії. Більшість її у вигляді нагрітого повітря збирається у вентиляції і через теплообмінники енергія передається на нагрівання води в системі опалення іншої будівлі. За приблизними оцінками, ефективність такої системи дозволяє економити до 25% енергії, що витрачається на опалення будівлі. У середині людини виробляються електричні струми різних частот у 7 біологічних електростанціях: у серці, у мозку та у п'яти органах почуттів. Вся електрика, що виробляється всередині людського організму, поглинається його тканинами. Жоден електрон, вироблений усередині живого організму, не залишає людське тіло, і не перетворюється на навколишнє середовище, а поглинається шкірою. Цим і обумовлена замкнутість електричної системи людини. Організм сам поглинає всю електрику, яку раніше він і зробив. Енергія, що виробляється людським тілом, підрозділяється на механічну, теплову та електричну. Найбільш ефективно можна використовувати теплову енергію людського тіла. Механічна енергія також може бути використана, проте з набагато меншою ефективністю. Електричну енергію людського тіла на даному етапі розвитку науки та техніки використати практично неможливо. Її використання мабуть стане реальним у дуже віддаленому майбутньому.

Ключові слова: теплова енергія людського тіла, електрична активність мозку, біострум

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

A HUMAN BODY AS AN ENERGY SOURCE

The article deals with the actual problems of using the energy released by the human body. The question arises how much energy can the human body generate? Is it possible to use this energy for domestic and industrial needs? In the 18th and 19th centuries, the first scientific works on this topic appeared. It turned out that the charge carriers in the proteins of a living organism are protons and electrons, which, together with the electron-hole conduction system, create a single conductivity inherent only in a living organism. The electrical activity of the brain is assessed by voltage pulses with an amplitude of 500 μ V of various frequencies from 0.5 to 55 Hz. It is impossible to receive pulses with such a frequency and such an amplitude from only ionic-type charge carriers. Electrochemical current sources are inertial; therefore, this fact can be direct evidence of the presence of electron movement of charge carriers in the brain and the nervous system as a whole. It is quite realistic to use the thermal energy of the human body. Currently, the central building of the Stockholm railway station has been turned into a kind of experimental testing ground. Every day about 250 thousand people pass through the station building, who emit up to 25 MW of thermal energy. Most of it in the form of heated air is collected in ventilation and through heat exchangers energy is transferred to heat water in the heating system of another building. According to rough estimates, the efficiency of such a system can save up to 25% of the energy spent on heating the building. Inside a person, electric currents of various frequencies are generated in 7 biological power plants: in the heart, in the brain and in the five sense organs. All the electricity that is generated inside the human body is absorbed by its own tissues. Not a single electron produced inside a living organism leaves the human body, and does not pass into the environment, but is absorbed by the skin. This is the reason for the closure of the human electrical system. The body itself absorbs all the electricity that it previously produced. The energy generated by the human body is divided into mechanical, thermal and electrical. The thermal energy of the human

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

body can be used most effectively. Mechanical energy can also be used, but with much less efficiency. The electrical energy of the human body at this stage in the development of science and technology is practically impossible to use. Its use is likely to become real in the very distant future.

Key words: thermal energy of the human body, electrical activity of the brain, biocurrent

Актуальность. За последние сто пятьдесят лет бурное развитие электротехники привело к тому, что электрические устройства находятся буквально повсюду. Они круглосуточно помогают нам, делают нашу жизнь более комфортной. Однако их работа требует огромного количества электроэнергии, которую человечество научилось производить, используя, как исчерпаемые источники: уголь, газ, нефть, уран, так и, в последнее время все активнее, практически неисчерпаемые: ветер, приливные волны, солнечный свет. Но, несмотря на это, проблема экономии энергии, и как следствие, энергоэффективности, становится все острее. Связано это как с проблемами экологии, так и с капитальными вложениями в создание новых электростанций.

Постановка проблемы. А что если электрическую энергию, необходимую для удовлетворения нужд человека, будет вырабатывать сам человек? Казалось бы, фантастическая идея, но уже почти сто лет существуют наручные часы с автоподзаводом, не нуждающиеся в ежедневном закручивании пружины. Механизм таких часов содержит маховик, совершающий колебания при движении руки. Автоподзавод часов – хорошая идея, но и энергии на него тратится совсем мало. Возникает резонный вопрос, а сколько энергии может вырабатывать человеческое тело? А возможно ли использовать эту энергию для бытовых и промышленных нужд?

Из истории вопроса. С так называемым «живым» электричеством человек сталкивался очень давно, еще со времен древнеримского врача Клавдия Галена. Во времена императора Марка Антония он лечил раненных гладиаторов с помощью электрических скатов, причем, такую электрофизиотерапию он подсмотрел в рыбацкой деревушке на берегу Средиземного моря. В эпоху великих географических открытий, у берегов Амазонки, европейцы столкнулись с местными электрическими угрями, которые генерировали электрическое напряжение в воде, как было установлено впоследствии, до 550 вольт. Горе было тому, кто случайно попадал в трехметровую зону поражения.

Но впервые наука обратила внимание на способность живых организмов вырабатывать электричество, после забавного случая с лягушачьими лапками в XVIII веке, которые в один ненастный день где-то в Болонье, начинали дергаться от соприкосновения с железом. Зашедшая в лавку мясника за французским деликатесом, жена болонского профессора Луиджи Гальвани, увидела эту ужасную картину и рассказала мужу о нечистой силе, которая бушует по соседству. Но Гальвани посмотрел на это с научной точки зрения, а спустя 25 лет упорных трудов вышла его книга «Трактаты о силе электричества при мышечном движении». В ней ученый впервые заявил – электричество есть в каждом из нас, а нервы это своеобразные электропровода.

Впервые электрические свойства живого организма были обнаружены и стали предметом исследований в 80-е годы девятнадцатого века. Русский исследователь И.П. Тишков в 1886 опубликовал работу «О сопротивлении человеческого тела электрическому току», где впервые привел численные значения сопротивления. Позднее немецкий ученый Вебер высказал предположе-

ние, что тело человека по своим электрофизическим характеристикам можно отнести к соленым растворам или электролитам, что сейчас считается не совсем верным. Ныне считается, что носителями зарядов в белках живого организма являются протоны и электроны, которые вместе с системой электронно-дырочной проводимости создают единую, присущую только живому организму проводимость. Установлено, что включение в белок незначительного количества хлоранила играет роль акцептора, что повышает общую проводимость белков примерно в 10 раз. Вода же, служащая донором электронов, тем не менее, ухудшает проводимость в 10 раз. Наряду с белками в организме большую роль играют нуклеиновые кислоты, которые обладают пьезоэлектрическими и термоэлектрическими свойствами. Живой объект также можно характеризовать биопотенциалом. Под ним понимают ионизационный потенциал биологических соединений, характеризуемый малым значением энергии связи. В двадцатом веке определена электрическая прочность кожи, характеризуемая значением электрической напряженности (напряженность при которой происходит пробой вещества) 200 В/мм.

Электрическая активность мозга оценивается импульсами напряжения различной частоты. Установлено, что для человека наиболее выраженными являются следующие ритмы (в импульсах в секунду):

- дельта-ритм – от 0,5 до 3
- тета-ритм от 4 до 7
- альфа-ритм от 8 до 13
- бета-ритм от 14 до 35
- гамма-ритм от 35 до 55.

Амплитуда этих импульсов находится в пределах 500 мкВ. Получить импульсы с такой частотой и такой амплитудой от носителей заряда только ионного типа невозможно. Электрохимические источники тока инерционны, поэтому этот факт может являться прямым доказательством наличия в мозгу и нервной системе в целом электронного движения носителей заряда.

Электрическая активность сердечной мышцы может быть охарактеризована значением генерируемой энергии. Если разделить напряжение, соответствующее зубцу на электрокардиограмме, равное 0,3 – 0,5 мВ, на значение входного сопротивления электрокардиографа, находящегося в пределах от 500 кОм до 2 МОм, можно получить значение тока примерно равное 10^{-11} – 10^{-12} А.

Анализ возможных путей решения проблемы. Как же человек генерирует электричество? Всему причиной многочисленные биохимические процессы, которые происходят на клеточном уровне. Внутри нашего организма присутствует множество разных химических веществ – кислород, натрий, кальций, калий и многие другие. Их реакции друг с другом и вырабатывают электрическую энергию.

Например, в процессе «клеточного дыхания», когда клетка высвобождает энергию, полученную

от воды, углекислого газа и так далее. Она, в свою очередь откладывается в особые химические соединения, условно назовем это «хранилищами», и впоследствии используется по мере надобности.

Необходимо хотя бы приблизительно представлять процесс преобразования и выработки энергии в самом человеческом теле. Человек – теплокровное существо, энергия выделяется в каждой клетке тела человека. Если энергия в клетке не выделяется, то это значит, клетка умерла, а умершая клетка подлежит удалению из тела. Процесс добычи энергии начинается в полости рта. Содержащийся в слюне фермент пталин действует на углеводы пищи, при этом крахмал превращается в сахар. Сахар, белки, жиры в организме перерабатываются, в основном, в глюкозу. При окислении глюкозы в живых клетках организма выделяется энергия. Процесс образования глюкозы в животном организме из белков, жиров и других веществ (отличных от углеводов), происходит преимущественно в печени и называется глюконеогенезом. Постоянный уровень глюкозы в крови поддерживается синтезом и распадом гликогена. Потребление клеткой глюкозы регулирует фермент инсулин, который вырабатывается поджелудочной железой. Внутри клетки глюкоза окисляется с участием кислорода: образуется углекислый газ и вода. При биологическом окислении органических веществ в клетке появляется атомарный водород, который может окисляться двумя путями: окисление без участия кислорода, так в клетке образуется этиловый спирт, молочная кислота и др. вещества; окисление с участием кислорода – образуется вода. Реакции окисления происходят с выделением тепловой энергии: энергия расходуется на обогрев тела и выполнение внешней работы.

Вся тепловая энергия, выделившаяся в клетках человека, отводится в окружающую среду:

- кожными покровами, а именно, жидким потом, выделениями сальных желез, испарением жидких фракций пота и сальных желез, газовыми выделениями кожи;
- фекалиями, газовыми выделениями;
- уриной;
- слюной;
- выдыхаемым воздухом – разностью теплосодержания вдыхаемого и выдыхаемого воздуха;
- парами воды в выдыхаемом воздухе;
- работой над внешней средой.

Если человека идеально теплоизолировать от внешней среды, то по окончании выработки внутренних ресурсов системы терморегулирования человек перегреется, т.е. получит "тепловой удар".

В табл. 1 приведены приблизительные значения мощности, которую вырабатывает человек в зависимости от испытываемой нагрузки.

Таблица 1

I	II	III	IV	V
от 60 до 80 Вт	от 100 до 150 Вт	от 250 до 290 Вт	от 500 до 650 Вт	от 800 до 900 Вт

Где римскими цифрами обозначена вырабатываемая мощность:

I – в состоянии покоя или медленной ходьбы;

II – совершая легкую работу или во время быстрой ходьбы;

III – во время физической работы средней тяжести;

IV – при очень тяжелой физической работе;

V – спортсмены во время интенсивной тренировки или соревнований.

У людей большие перспективы в качестве генераторов электричества, его можно вырабатывать практически из любого нашего действия. Так, от одного вдоха можно получить 1 Вт, а спокойного шага хватит, чтобы питать лампочку в 60 Вт, даже зарядить мобильный телефон будет достаточно.

Дело за малым – научиться использовать энергию, которую мы столь бесполезно растрачиваем. И в научной среде уже есть предложения на этот счет. Так, активно изучается эффект пьезоэлектричества, который создает напряжение из механического воздействия. На его основе еще в 2011 году австралийские ученые предложили модель компьютера, который заряжался бы от нажатия клавиш. В Корею разрабатывают телефон, который будет заряжаться от разговоров, то есть от звуковых волн, а группа ученых из Georgia Institute of Technology, США создала действующий прототип «наногенератора» из оксида цинка, который вживляется в человеческое тело и вырабатывает ток от каждого нашего движения. Но это еще не все, в помощь солнечным батареям в некоторых городах собираются получать энергию из часа пик, точнее от вибраций при ходьбе пешеходов и машин, а потом использовать ее для освещения города. Такую идею предложили лондонские архитекторы из фирмы Facility Architects. В часы пик через вокзал Виктория за 60 минут проходит 34 тысячи человек. Понятно, что если удастся применять эту энергию, которая в настоящее время расходуется впустую, то может фактически получиться очень полезный источник энергии. Например, в одном из вокзалов технологичной Японии стоят вырабатывающие электричество турникеты. Пассажиры, а их многие тысячи, ежедневно проходят через такую систему, что позволяет питать терминал дополнительным чистым источником электричества. Конечно, о больших объемах получаемой энергии говорить не приходится. Она едва ли обеспечивает и несколько процентов потребности, но сам прецедент заслуживает не только внимания, но и уважения. Возможно, по такому принципу когда-нибудь будут работать многие предприятия.

В настоящее время центральное здание Стокгольмского железнодорожного вокзала превращено в своеобразный экспериментальный полигон. Из основных залов убрали кондиционеры, стены оснастили слоем теплоизоляции, а дверные и оконные проемы сделали менее воздухопроницаемыми. Внутри системы вентиляции установили теплообменники и подключили их к системе теплоснабжения соседнего здания.

Ежесуточно через здание вокзала проходит около 250 тыс. человек, которые выделяют до 25 МВт тепловой энергии. Большая ее часть в виде нагретого воздуха собирается в вентиляции и через теплообменники энергия передается на нагрев воды в системе отопления другого здания. Остывший, но насыщенный СО воздух поступает наружу, а на его

место закачивается свежий и пока еще прохладный с улицы. Подсчитать эффективность работы такой системы проблематично, но по приблизительным оценкам она позволяет экономить до 25% энергии, расходуемой на отопление здания. При этом сооружение подобного нагревателя не требует особых капиталовложений, а установить его можно в самых разных местах скопления людей – в метро, в супермаркетах, в банках.

Человеческий организм – по сути своей биологическая машина, перерабатывающая органические соединения в процессе своей жизнедеятельности. Потребляемая пища раскладывается на более простые вещества, часть которых (белки, аминокислоты) используется как «строительный материал» для тела, а еще часть (углеводы) служит «топливом». Человек за день потребляет количество еды, содержащее в себе примерно от 1500 до 5000 ккал энергии. Нормой считается 2500-3000 ккал, что в переводе на киловатт-часы равно 2,9-3,5 кВтч. Для сравнения, емкость батареи iPhone X равна 10,3 Втч. То есть, за день человек нуждается в количестве энергии, достаточной для того, чтобы зарядить около трех сотен айфонов, или почти ежедневно заряжать один на протяжении года. Не вся энергия, потребленная организмом, полностью задействуется им, так как КПД нашего тела ниже 100%. Значительная ее часть выделяется в виде тепла. При физических нагрузках количество энергии увеличивается, так как в организме активно протекают химические реакции, необходимые для работы мышц, а сами мышцы производят механическую работу. Стоит взять хотя бы десятую долю энергии организма – и это решит навсегда проблему зарядки портативной электроники. Но реально ли обратить ту часть энергии тела, что тратится впустую, себе на пользу?

Нас же интересует возможность получить от тела намного больше полезной энергии. А это уже гораздо сложнее. Большой маховик на человека не повесишь, он будет приносить дискомфорт. Да и энергию такой маховик будет задействовать не ту, что тратится впустую, а требовать дополнительных затрат. Нацеплять везде маленьких механизмов (на руки, ноги, торс и т.д.) – тоже не вариант. Это и дискомфорт, и лишняя тяжесть, и потребность в миниатюрных генераторах, преобразующих механическую энергию в электрическую. В общем, пока что задействовать излишки механической энергии движения тела проблематично. Единственным реальным источником «дармовой» энергии является ходьба. Этот режим передвижения весьма малоэффективен с энергетической точки зрения, имеет низкий КПД. При ходьбе много энергии выделяется при касании ступней земли и переносе массы тела на нее. Двигаясь с умеренной скоростью, человек за минуту совершает около 120 шагов. В момент касания земли он осуществляет давление на нее, совершается механическая работа. А теперь вспоминаем карманные зажигалки с искробразованием от пьезоэлектрического элемента. Нажимая кнопку, человек сжимает пьезоэлемент, от чего тот выделяет электроэнергию, и возникает пробой искры, поджигающей газ. Однако энергии выделяется мало, если щелкать зажигалку раз в полсекунды (частота шагов), в среднем выйдет около 0,5 мВт (милливатт). Мало, но все же можно попробовать посчитать дальше. Площадь пьезоэлемента зажигалки примерно 0,25 см² значит в 1 см² можно разместить 4 таких устройства.

Площадь подошвы обуви около 150 см² итого около 600 элементов можно поместить в подошву. Их нажатие даст около 300 мВт или 0,3 Вт. То есть, за час ходьбы будет выработано 0,3 Втч энергии. 0,3 Втч – маловато, даже без учета следующего нюанса: для активации пьезоэлемента зажигалки требуется усилие около 3 кг. 600 элементов потребуют усилия, создаваемого массой 1800 кг. Человек при ходьбе создает усилие всего около 120% от своей массы. При массе тела 70 кг это порядка 85 кг. Этого хватит лишь для активации 28 элементов, а $28 \times 0,5 = 14$ мВт, за час ходьбы будет выработано всего 0,014 Втч энергии, что совсем ничтожно.

Можно сделать вывод, что пока механическую энергию тела преобразовать в электрическую, не создавая неудобств для человека, проблематично. Оснастить обувь пьезоэлементами реально, но снять с нее мощность, достаточную для удовлетворения базовых потребностей человека пока нет. Тело человека выделяет в окружающую среду порядка 100 Вт тепловой энергии. Преобразовать ее в электрическую можно, используя эффект Зеебека: возникновения электродвижущей силы в термоэлектрических материалах, части которых находятся под действием разных температур. Разместив на теле пластину, которая другой стороной контактирует с окружающей средой, можно вырабатывать электричество за счет разницы температур. Чем больше разница температур, тем выше вырабатываемая мощность, поэтому такие генераторы (элементы Зеебека) особенно эффективны зимой на улице. Но есть ряд проблем. КПД современных термоэлектрических материалов не превышает 10%, то есть из 100 Вт тепла будет выработано до 10 Вт электроэнергии. 10 Вт – неплохо, ведь за час-два ношения элемента можно полностью зарядить смартфон. Но в таком случае понадобится покрыть 100% тела термоэлектрическим материалом. Естественно, это невозможно. Выходом из ситуации может стать одежда, пошитая из термоэлектрической ткани, но такой пока нет. Существующие технологии позволяют производить только твердые или гибкие термоэлектрические пластины, непригодные для такого использования. Их максимум – это получать сотые или десятые доли ватта, будучи использованными в мелкой носимой электронике (например, смарт-часах и фитнес-трекерах). В будущем не исключено появление термоэлектрических материалов пригодных для производства некоего подобия ткани, но ее применение будет ограниченным. Ведь летом в чем-то, похожем на скафандр, особо не походишь, потому что жарко, а зимой такая одежда не будет в достаточной мере удерживать тепло из-за слабых теплоизоляционных свойств термоэлектрического материала. Если же носить куртку из такой ткани поверх футболки, свитера, а на ноги одевать подштанники – КПД термоэлектроткани упадет из-за меньшей разности температур. Расчеты показывают, что превращать механическую энергию тела в электрическую можно. Технология вовсе не нова, в ней нет ничего фантастического. Однако если использовать лишь ту энергию, что тратится впустую, то много электричества вырабо-

тать не выйдет. Поэтому использование тела в качестве серьезного источника электрической энергии из кинетической станет реальным только при открытии новых на порядок более эффективных материалов с пьезоэлектрическим эффектом. С теплом все немного лучше. Вырабатывать электричество из него ученые уже научились, КПД современных термоэлектрических элементов невысокий, но допустимый. Проблема в том, что эти элементы недостаточно гибкие и универсальные, чтобы эффективно их использовать. В будущем теоретически реально создание гибких листовых термоэлектрических материалов, пригодных для использования в одежде. Одежда из такой ткани сможет вырабатывать несколько ватт энергии, достаточные для зарядки смартфона и более мелкой носимой электроники. Получить больше электроэнергии от тела на практике, скорее всего, не получится никогда.

Независимо от нашего желания, количества съеденной еды или состояния здоровья человеческое тело постоянно выделяет тепло. Как правило, впусую, но недавно начались первые эксперименты по использованию данной тепловой энергии.

Как уже было указано ранее, тело взрослого человека с нормальной температурой в состоянии покоя выделяет тепло в эквиваленте от 60 Втч. Если он занимается легкой физической работой, например, ходьбой, то это значение увеличивается до 100 -150 Втч. А спортсмены во время интенсивной тренировки прогревают окружающий воздух на 800-900 Втч. На обогрев непосредственно тела и его органов идет достаточно небольшая часть это тепла – не более 50%. Остальное просто рассеивается в атмосфере, независимо от нашего желания. Наиболее рациональное применение этому теплу – нагрев воздушной прослойки под зимней одеждой или одеялом. В остальных случаях можно говорить о бесполезном расходе. Поверхность человеческого тела выделяет тепло неравномерно и подключить к ней теплообменники весьма проблематично. Да и КПД такой системы будет оставлять желать лучшего, так как человек не может все время заниматься интенсивной физической работой.

Хотя электричество мы можем генерировать напрямую, избегая переходных систем импульс-движение и движение-генератор. Дело в том, что сама природа любого живого организма, а не только человека, это замкнутая электрическая система, в которой есть свои генераторы, линии передач и потребители. Уж не попробовать ли качать ток прямо из наших внутренних органов? Однако сначала стоит разобраться с причинами того, почему человек теоретически может быть использован в качестве источника энергии и откуда она в нем берется. Дело в том, что у человека есть все необходимые звенья любой полной электрической цепи. Во-первых, это генераторы. Они делятся на внутренние (сердце и мозг) и внешние (органы чувств). В мозгу ток образуется в месте ретикуло-эндотелиальной формации, откуда по нервам распространяется по всему организму в виде биотоков. В сердце биотоки возникают в синатриальном узле, откуда они через посредников передают импульсы сердечной мышце, а затем растворяются в теле. Именно благодаря этому узлу сердце может какое-то время биться даже вне тела.

В глазах ток возникает в виде потока электронов по нервам к мозгу от сетчатки. Во внутреннем ухе формируется электричество под действием звуковых волн. Физическое и температурное воздействие на рецепторы кожи формирует в них биотоки, которые направляются к головному мозгу на обработку. Это самые мелкие генераторы тока в человеческом организме. В носу электричество вырабатывают митральные клетки, воздействие запаха на которых генерирует биоимпульсы. Во рту под воздействием химических веществ ток вырабатывают вкусовые сосочки. Если суммировать все вырабатываемое нами внутреннее электричество, то окажется, что более половины берет на себя сердце. Десятую часть тока генерируют органы чувств, а все остальное, около 40%, производит головной мозг. Однако при больших болях органы чувств, болевые рецепторы, могут давать абсолютно большую часть всего электричества в организме. В общем, все это не удивительно, если понимать, что биотоки являются главным движущим и поддерживающим живое существо фактором.

Теоретически внутреннее электричество могло бы питать вживленные чипы человека будущего или искусственные органы. Но еще дальше уходят идеи искусственной культивации рецепторов боли в промышленных масштабах, чтобы из них вырабатывать ток в больших объемах. Бесспорно, эта идея далекого будущего. Но некоторые современные достижения выглядят не менее фантастично. Так, в японской лаборатории Matsushita Electric научились получать ток напрямую из крови человека. Дело в том, что она полна электронов от ферментного окисления глюкозы.

Где в организме электрический "плюс", а где "минус"? Великий русский физиолог И.П. Павлов утверждал, что в том месте, где возникает электричество в центрально-нервной системе (ЦНС), там оно и поглощается. То есть, он полагал, что в ЦНС, как и в электрической батарее, существуют ткани вырабатывающие электричество (генератор, плюсовой потенциал) и ткани, поглощающие электричество (минусовой потенциал). Движение биотоков осуществляется по кругу: от генератора электричества, «от плюса» - к эфферентным нервным волокнам, после чего они перетекают к органу.

Все биотоки в этой схеме не выходят за пределы нервных тканей, не покидают нервных клеток, «вооруженных» надежной электроизоляцией в виде жировой оболочки. Правда, тогда становится непонятна судьба электричества, выработанного в сердце. Павловской рефлекторной дугой (точнее Павловским кольцом) можно объяснить движение биотоков, вырабатываемых в ЦНС, но невозможно объяснить движение биотоков от сердца и пяти органов чувств. Она не дает объяснения на вопрос: почему все биотоки можно регистрировать на поверхности кожи? Ведь по Павловской теории биотоки не должны покидать нервные волокна, имеющие прекрасные жировые изоляторы вокруг своего электропроводящего волокна. Но почему тогда электрические приборы определяют наличие электрических потенциалов на поверхности кожи, исхо-

дящих от сердца (электрокардиограмма) и от мозга (электроэнцефалограмма)? Аfferентные же нервные волокна имеют совершенно другие генераторы энергии на поверхности организма (кожа, глаз, язык, нос, ухо) в 5 органах чувств, а прерываются они в центральной нервной системе.

Вероятно, что замкнутого цикла движения биотоков в природе не существует, а теория рефлекторной дуги подлежит коррекции. Но при этом, несомненно, то, что человек является замкнутой электрической системой. Внутри него вырабатываются электрические токи различных частот в 7 биологических электростанциях: в сердце, в мозге и в пяти органах чувств. Сначала биотоки по нервным клеткам несут информацию к специфическим для них клеткам человеческого тела, к органам и тканям. После передачи информации клеткам соответствующих органов, электричество устремляется по межклеточному пространству к кожным покровам, где и аннигилируется. Все электричество, которое вырабатывается внутри человеческого организма, поглощается его же тканями. Ни один электрон, произведенный внутри живого организма, не покидает человеческое тело, и не переходит в окружающую среду, а поглощается кожей. Этим и обусловлена замкнутость электрической системы человека. Организм сам поглощает все электричество, которое ранее он же и произвел. Поэтому использовать непосредственно электрическую энергию человеческого тела вряд ли возможно.

Выводы. Таким образом, человеческое тело является по сути биоэлектромеханической системой. Вырабатываемая человеческим телом энергия подразделяется

на тепловую, механическую или кинетическую, и электрическую. Пока наиболее эффективно можно использовать тепловую энергию человеческого тела. Механическая энергия также может быть использована, однако с гораздо меньшей эффективностью. Непосредственно электрическую энергию человеческого тела на данном этапе развития науки и техники использовать практически невозможно. Ее использование видимо станет реальным в очень отдаленном будущем.

Список литературы:

1. Манойлов В.Е. Электричество и человек. – 2-е изд., перераб и доп. – Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 152 с., ил.
2. <https://russian7.ru/post/skolko-ehlektrichestva-vyrabytyvaet/>
3. Наше тело как источник бесплатной электроэнергии насколько это реально. Александр Навагин/ Хайп.ру
4. <http://zarayad.com>
5. <http://molostovvd.narod.ru/books/acupru.htm>
6. Алексей Щукин Энергия свечей, человека и земли. «Эксперт» №38 (675)

References (transliterated):

1. Manojlov V.E. Ehlektrichestvo i chelovek. – 2-e izd., pererab i dop. - Ehnergoizdat. Leningr. otd-nie, 1982. - 152 s., il.
2. <https://russian7.ru/post/skolko-ehlektrichestva-vyrabytyvaet/>
3. Nashe telo kak istochnik besplatnoj ehlektroehnergii naskol'ko ehto real'no. Aleksandr Navagin/ Khajp.pu
4. <http://zarayad.com>
5. <http://molostovvd.narod.ru/books/acupru.htm>
6. Aleksej Shchukin Ehnergiya svechej, cheloveka i zemli. «EhksperT» №38 (675).

Поступила (received) 04.11.21

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

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

Марков Владислав Сергійович (Марков Владислав Сергеевич, Markov Vladislav Sergeevych) – 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.

ЗМІСТ

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

- Жорняк Л.Б., Афанасьєв О.І., Шусь В.М., Морозов О.Ю., Руденко Ю.В.* Особливості оцінки надійності зовнішньої полімерної ізоляції газонаповнених вимірювальних трансформаторів 3
- Литвиненко В.В., Серєда О.Г., Варшамова І.С., Король О.Г.* Експериментальне дослідження впливу феромагнітного осердя на швидкість індукційно-динамічного розчіплювача з якорем поротного типу 10
- Пантелеят М.Г., Кузьмін А.О.* Мультифізична модель процесів у електромагнітах і актуаторах вакуумних комутаційних апаратів з урахуванням контактної взаємодії конструктивних елементів 15

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

- Васьковський Ю.М., Гераскін О.А., Татарінов К.М.* Дослідження фізичних процесів ушкодження демпферної системи ротора синхронних машин 19
- Кортунів В.І., Масленников А.М., Єгоров А.В., Дунєв О.О.* Експериментальне дослідження генераторного режиму роботи безщіткового двигуна постійного струму при підвищеній частоті обертання 25

ЕЛЕКТРИЧНІ СТАНЦІЇ І МЕРЕЖІ

- Золотарьов В.В., Голик О.В., Москвітін Є.С., Зиков М.Б., Шурупова А.А., Щебенюк Л.А., Васильєва О.В.* Модель динаміки розвитку деформації при механічних випробуваннях наповнених полімерних матеріалів в умовах кабельного виробництва 30
- Калінчик В.П., Побігайло В.А., Калінчик В.В., Скосирєв В.Г.* Управління режимом реактивної потужності ... 36
- Ким Е.Д., Коростелев Я.Е.* Напряжение как параметр диагностики состояния ОПН 40
- Костюков И.А.* Абсорбционные методы контроля технического состояния электрической изоляции 45
- Мохнач Р.Э.* Совершенствование технологии производства компенсационных медных и медностаальных токопроводов 51

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

- Андрієнко П. Д., Василевський В. В., Вітцівський І. Ю.* Досвід впровадження в навчальний процес сучасних технологій FDM 3D друку 55

ІНФОРМАЦІЯ, ГІПОТЕЗИ, ДУМКИ

- Гончаров Е.В., Крюкова Н.В., Марков В.С., Поляков И.В.* Человеческое тело как источник энергии 60

CONTENT

ELECTRIC APPARATUS

- Zhorniak L. B., Afanasiev A. I., Morozov A. Yu., Schus V.M., Rudenko J. V.* Estimation peculiarities of external polymer insulation reliability of gas-filled instrument transformers 3
- Lytvynenko V.V., Sereda O.H., Varshamova I.S., Korol O.H.* Experimental research of the influence of a ferromagnetic core on the speed of an induction-dynamic release with turning anchor type 10
- Pantelyat M.G., Kuzmin A.O.* A multiphysics model of processes in electromagnets and actuators of vacuum switching devices taking into account interaction of structural elements 15

ELECTRIC MACHINES

- Vaskovskiy Yu.N., Geraskin A.A., Tatarinov K.M.* Research of damper system damage physical processes of synchronous machines rotor 19
- Kortunov V.I., Masliennikov A.M., Yehorov A.V., Duniev O.O.* Experimental investigation of the generator mode for a brushless dc motor at an increased rotational speed 25

POWER STATIONS AND GRIDS

- Zolotarev V.V., Golik O.V., Moskvitin E.S., Zykov M.B., Shurupova A.A., Shchebeniuk L.A., Vasilieva O.V.* Model of deformation growth dynamics during filled polymer materials mechanical tests under cable production conditions 30
- Kalinchik V.P., Pobigaylo V.A., Kalinchik V.V., Skosirev V.G.* Reactive power control 36
- Kim E.D., Korostelev I.E.* Voltage characteristic as a parameter for surge arrester diagnosing 40
- Kostiukov I.* Absorption methods of control of technical condition of electrical insulation 45
- Mokhnach R.E.* Improvement of technology of production of compensation copper and copper steel current ducts 51

COMPUTER SIMULATION

- Andrienko P. D., Vasilevskij V. V., Vittsivsky I. Y.* Experience of implementation in educational process modern technologies of FDM 3D printing 55

INFORMATION, HYPOTHESES, OPINIONS

- Honcharov Ye. V., Kriukova N.V., Markov V. S., Polyakov I. V.* A human body as an energy source 60

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

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

Збірник наукових праць

№ 2 (6) 2021

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

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

Підп. до друку 26.11.2021 р. Формат 60×90 1/8. Папір офсетний.
Друк лазерний. Умов. друк. арк. 9,25.
Тираж 300 пр. Зам. № . Ціна договірна.

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