

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Кременчуцький національний університет  
імені Михайла Остроградського**

**Інститут електромеханіки, енергозбереження  
і систем управління**

**ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ  
І ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ  
СИСТЕМИ**

**№ 1/2020 (49)**

**Кременчук – 2020**

**Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2020. – Вип. 1/2020 (49). – 74 с.**

**ISSN 2072-2052**

**e-ISSN 2074-9937**

**DOI: 10.30929/2072-2052.2020.1.49**

**Головний редактор**

**М. В. Загірняк**, дійсний член (академік) Національної Академії педагогічних наук України, д.т.н., проф.

**РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ**

**Ю. І. Дорофєєв**, д.т.н., проф.  
(НТУ «ХП», м. Харків);  
**Б. Б. Кобилянський**, к.т.н., доц.  
(ННППІ УПА, м. Бахмут);  
**В. І. Корнієнко**, д.т.н., проф.  
(НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро);  
**А. І. Купин**, д.т.н., проф.  
(КНУ, м. Кривий Ріг);  
**Л. І. Мазуренко**, д.т.н., проф.  
(ІЕД НАН України, м. Київ);  
**О. Ю. Михайленко**, к.т.н., доц.  
(КНУ, м. Кривий Ріг);  
**Н. В. Моркун**, д.т.н., проф.  
(КНУ, м. Кривий Ріг);  
**Д. Й. Родькін**, д.т.н., проф.  
(КрНУ, м. Кременчук);

**О. В. Садовой**, д.т.н., проф.  
(ДДТУ, м. Кам'янське);  
**О. М. Сінчук**, д.т.н., проф.  
(КНУ, м. Кривий Ріг);  
**О. І. Толочко**, д.т.н., проф.  
(НТУУ КПІ ім. І. Сікорського, м. Київ);  
**В. К. Титюк**, к.т.н., доц.  
(КНУ, м. Кривий Ріг);  
**О. П. Чорний**, д.т.н., проф.  
(КрНУ, м. Кременчук);  
**В. П. Щокін**, д.т.н., проф.  
(КНУ, м. Кривий Ріг);  
**Miralem Hadziselimovic**, DSc.  
(University of Maribor, Slovenia);  
**Sebastijan Seme**, CandSc., Assoc. Prof.  
(University of Maribor, Slovenia).

**Науковий редактор – Д. Й. Родькін**

**Відповідальний за випуск – О. П. Чорний**

**Технічний редактор – Є. В. Бурдільна**

Науково-виробничий журнал внесений до Переліку фахових видань, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук, затвердженого наказом МОН України від 18 грудня 2018 року №1412. Журнал належить до категорії «Б», спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

Журнал надсилається до провідних наукових бібліотек України, реферується у Національній бібліотеці України імені В. І. Вернадського. Журнал індексується у загальнодержавній базі даних «Україніка наукова» (реферативний журнал «Джерело»), реферативному журналі та базі даних ВІНІТІ (Російська академія наук), міжнародних наукометричних базах даних «Ulrich's Periodicals Directory», «Index Copernicus», «Polish Scholarly Bibliography», «Info Base Index», «Google Scholar», «Universal Impact Factor», «Research Bible» та науковій електронній бібліотеці eLIBRARY (РИНЦ).

Друкується за рішенням Вченої ради Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського (протокол № 6 від 14.05.2020 р.). Свідоцтво про державну реєстрацію друкованих засобів масової інформації серії КВ № 18236–7036 ПР від 05.09.2011 р.

Журнал публікує після рецензування, редагування та перевірки на оригінальність статті, які містять результати досліджень з питань розвитку науки, освіти і виробництва, впровадження нових результатів фундаментальних і прикладних досліджень у галузі технічних, природничих і гуманітарних наук.

© Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2020 р.

**ISSN 2072-2052**

**e-ISSN 2074-9937**

---

Адреса редакції: вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук Полтавської обл., Україна, 39600.  
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, ІЕЕСУ, к. 2302.  
Телефон: +3805366 31147. E-mail: journal.eess@gmail.com, journal.eess@kdu.edu.ua

---

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE**

**Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University**

**Institute of Electromechanics, Energy Saving  
and Control Systems**

**ELECTROMECHANICAL  
AND ENERGY SAVING  
SYSTEMS**

**№ 1/2020 (49)**

**Kremenchuk – 2020**

**Electromechanical and energy saving systems. Quarterly research and production journal.**  
– Kremenchuk: KrNU, 2020. – № 1/2020 (49). – 74 p.

ISSN 2072-2052

e-ISSN 2074-9937

DOI: 10.30929/2072-2052.2020.1.49

**Editor-in-chief**

**M. Zagirnyak** – Full Member of National Academy of Pedagogic Sciences of Ukraine,  
Doctor of Sciences (Engineering), Professor.

**EDITORIAL BOARD**

**Yu. Dorofiev**, D.Sc. (Eng.), Professor;  
(NTU "KhPI", Kharkiv);

**B. Kobilyanskiy**, Cand.Sc. (Eng.), Associate Professor;  
(ESPPI UEPA, Bahmuth);

**V. Kornienko**, D.Sc. (Eng.), Professor;  
(NTU "Dniprovskaya Polytechnic", Dnipro);

**A. Kupin**, D.Sc. (Eng.), Professor;  
(KNU, Kryvyi Rih);

**L. Mazurenko**, D.Sc. (Eng.), Professor;  
(IE NASU, Kyiv);

**O. Mikhaylenko**, Cand.Sc. (Eng.), Associate Professor;  
(KNU, Kryvyi Rih);

**N. Morkun**, D.Sc. (Eng.), Professor;  
(KNU, Kryvyi Rih);

**D. Rodkin**, D.Sc. (Eng.), Professor;  
(KrNU, Kremenchuk);

**O. Sadovoy**, D.Sc. (Eng.), Professor;  
(DSTU, m. Kamyanske);

**O. Sinchuk**, D.Sc. (Eng.), Professor;  
(KNU, Kryvyi Rih);

**O. Tolochko**, D.Sc. (Eng.), Professor;  
(NTUU "Igor Sikorsky Kyiv  
Polytechnic Institute", Kyiv);

**V. Tytiuk**, Cand.Sc. (Eng.), Associate Professor;  
(KNU, Kryvyi Rih);

**O. Chorny**, D.Sc. (Eng.), Professor;  
(KrNU, Kremenchuk);

**V. Shhokin**, D.Sc. (Eng.), Professor;  
(KNU, Kryvyi Rih);

**Miralem Hadziselimovic**, DSc.  
(University of Maribor, Slovenia);

**Sebastijan Seme**, Cand.Sc., Assoc. Prof.  
(University of Maribor, Slovenia).

**Science Editor – D. Rodkin**

**Commissioning Editor – O. Chorny**

**Technical Editor – E. Burdilna**

The scientific and production journal is included in the List of Professional Publications, in which the results of dissertation works for the degree of Doctor and Candidate of Technical Sciences may be published, approved by the order of the Ministry of Education and Science of Ukraine of 18 December, 2018 №1412. The journal belongs to the category "B", specialty 141 "Electricity, Electrical Engineering & Electromechanics" and 151 "Automation and Computer Integrated Technologies".

The journal is indexed by national database «**Ukrainika Naukova**» («**Dzherelo**» abstract journal), **VINITI** abstract journal and database (Russian Academy of Science), international databases «**Ulrich's Periodicals Directory**», «**Index Copernicus**», «**Polish Scholarly Bibliography**», «**Google Scholar**», «**Universal Impact Factor**», «**Info Base Index**», «**Research Bible**» and research electronic library **eLIBRARY** (Russian Science Citation Index).

The journal is published by the decision of the Scientific Council of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University (Record № 6 of 14 May, 2020). Registration Certificate № 18236–7036 of 05 September, 2011.

The journal publishes only original and peer-reviewed articles, which cover theoretical and experimental aspects of research outcomes in the fields of Engineering Sciences, Natural Sciences, and Humanities.

The journal has been published since 2007.

© Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 2020.

ISSN 2072-2052

e-ISSN 2074-9937

---

Office address: vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, Ukraine, 39600. Institute of Electromechanics, energy saving and automatic control systems, Mykhailo Ostrohradskyi National University.

Tel: +3805366 31147. E-mail: journal.eess@gmail.com, journal.eess@kdu.edu.ua

---

## ЗМІСТ

### **ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ, МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ТА МОДЕЛЮВАННЯ**

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЯГОВОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ З ДВОМА СИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ, ЩО ЖИВЛЯТЬСЯ ВІД ОДНОГО ІНВЕРТОРА <i>Воронов Р.В.</i> .....	8
--	---

АЛГОРИТМ ПОЗИЦІЮВАННЯ СТРИЛИ І СПРЕДЕРА ДЛЯ ПАЛУБНИХ КРАНІВ <i>Шестака А.І., Мельнікова Л.В.</i> .....	20
---	----

### **ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ І АПАРАТИ**

ДОСЛІДЖУВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СХЕМ ІСКРОБЕЗПЕЧНИХ ПРИСТРОЇВ ДИСТАНЦІЙНОГО УПРАВЛІННЯ ГІРНИЧИМИ МАШИНАМИ <i>Загірняк М.В., Дзюбан В.С., Артёмов П.В.</i> .....	30
---	----

КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ ВИЯВЛЕННЯ ЗНОСУ КОНТАКТНОЇ СИСТЕМИ ВАКУУМНОГО ВИМИКАЧА <i>Грабко В.В., Дідушок О.В.</i> .....	38
--	----

### **ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ**

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПРИЕМНИКАМИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ КОМБИНАТОВ (ШАХТ) <i>Синчук И.О., Касаткина И.В., Яловая А.Н., Козакевич И.А., Кенне Канке Мориаль Константин</i> .....	46
--	----

МОДЕЛЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРИ НЕСИНУСОЇДАЛЬНОСТІ НАПРУГИ <i>Жежеленко І.В., Папайка Ю.А., Лисенко О.Г., Рогоза М.В., Якимець С.М.</i> .....	56
--	----

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ ДО НАУКОВО-ВИРОБНИЧОГО ЖУРНАЛУ «ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ І ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ СИСТЕМИ» .....	68
---	----

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ .....	71
-----------------------------	----

ПЕРЕЛІК АВТОРІВ .....	73
-----------------------	----

## TABLE OF CONTENT

### ***ELECTROMECHANICAL SYSTEMS, OPTIMIZATION TECHNIQUES AND SIMULATION***

RESEARCH OF TRACTIVE ELECTROMECHANICAL SYSTEM WITH  
TWO SYNCHRONOUS MOTORS WITH PERMANENT MAGNETS POWERING  
FROM BY ONE INVERTER

*Voronov R.* ..... 8

JIB AND SPREADER POSITIONING ALGORITHM FOR DECK CRANES

*Shestaka A., Melnikova L.* ..... 20

### ***ELECTRIC MACHINES AND DEVICES***

THE RESEARCH OF THE MEASURING CIRCUITS OF THE SPARK-SAFE DEVICES  
FOR MINING MACHINE REMOTE CONTROL

*Zagirnyak M., Dziuban V., Artomov P.* ..... 30

COMPUTER MODEL OF IDENTIFICATION OF WEAR OF THE CONTACT SYSTEM  
OF THE VACUUM CIRCUIT BREAKER

*Grabko V., Didushok O.* ..... 38

### ***ENERGY AND ELECTRICITY INDUSTRY. ENERGY MANAGEMENT***

MODELING OF OPTIMAL LEVELS OF CONSUMPTION OF ELECTRIC ENERGY  
BY ELECTRIC RECEIVERS OF IRON-COMBINED COMBINES (MINES)

*Sinchuk I., Kasatkina I., Yalovaya A., Kozakevich I., Kengne Kankeu Morial Constantin* ..... 46

MODELING OF RELIABILITY INDICATORS OF ELEMENTS OF POWER SUPPLY  
SYSTEMS WITH UNSINUSOIDAL VOLTAGE

*Zhezhelenko I., Papaika Yu., Lysenko O., Rogoza M., Yakimets S.* ..... 56

GUIDELINE FOR AUTHORS ..... 68

INFORMATION ABOUT AUTHORS ..... 71

LIST OF AUTHORS ..... 73

---

---

**ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ,  
МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ТА МОДЕЛЮВАННЯ**

---

---

---

---

**ELECTROMECHANICAL SYSTEMS,  
OPTIMIZATION TECHNIQUES AND SIMULATION**

---

---

**КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ ВИЯВЛЕННЯ ЗНОСУ КОНТАКТНОЇ СИСТЕМИ  
ВАКУУМНОГО ВИМИКАЧА****В. В. Грабко, О. В. Дідушок**

Вінницький національний технічний університет

вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна. E-mail: grabko@vntu.edu.ua, didushokov@gmail.com

У роботі розглянуто застосування вакуумних вимикачів та роль контактної системи у роботі вакуумної комутаційної техніки. Комп'ютерна модель побудована відповідно до математичної моделі виявлення зносу контактної системи вакуумного вимикача. Отримана модель дозволяє імітувати ввімкнення та вимкнення вакуумного вимикача та аналізувати процеси, що проходять під час його комутації. Окремо представлено опис для процесів ввімкнення та вимкнення контактної системи вимикача. При замиканні силових контактів вимикача розраховується загальна електродинамічна сила відкиду контактів по кожному із полюсів контактної системи. Електродинамічна сила відкиду розраховується за допомогою математичної моделі горіння дуги Майра. Модель дуги представлена для кожного полюсу вимикача окремо. При ввімкненні знос силових контактів визначається на основі порівняння діючого тягового зусилля ввімкнення із загальною електродинамічною силою відкиду по усіх полюсах контактної системи. При досягненні різниці діючої сили тяги та загального електродинамічного зусилля протидії порогового значення, комп'ютерна модель сигналізує про знос контактної системи. При вимкненні знос силових контактів визначається на основі порівняння діючого приводного тягового зусилля вимкнення із мінімально допустимим тяговим зусиллям для процесу вимкнення вакуумного вимикача. При досягненні різниці діючої сили тяги та мінімально допустимого тягового зусилля розмикання порогового значення, комп'ютерна модель сигналізує про знос контактної системи. Розрахунок рівнянь математичної моделі та візуалізація отриманих результатів виконана в середовищі MATLAB/Simulink. Комп'ютерна модель дозволяє імітувати ввімкнення/вимкнення вакуумного вимикача при різних струмах, змінювати технічні параметри контактної системи та інформувати про зношення контактної системи. Результати розробленої комп'ютерної моделі можуть бути використані у задачах діагностування технічного стану контактних систем вакуумних вимикачів.

**Ключові слова:** комп'ютерна модель, контакт, знос, комутація, дуга, вакуумний вимикач.**КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ВЫЯВЛЕНИЯ ИЗНОСА КОНТАКТНОЙ СИСТЕМЫ  
ВАКУУМНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ****В. В. Грабко, О. В. Дидушок**

Винницкий национальный технический университет

ул. Хмельницкое шоссе, 95, г. Винница, 21021, Украина. E-mail: grabko@vntu.edu.ua, didushokov@gmail.com

В работе рассмотрено применение вакуумных выключателей и роль контактной системы в работе вакуумной коммутационной техники. Компьютерная модель построена в соответствии с математической моделью выявления износа контактной системы вакуумного выключателя. Полученная модель позволяет имитировать включение и выключение вакуумного выключателя и анализировать процессы, происходящие во время его коммутации. Отдельно представлено описание для процессов включения и выключения контактной системы выключателя. При замыкании силовых контактов выключателя рассчитывается общая электродинамическая сила отталкивания контактов по каждому из полюсов контактной системы. Электродинамическая сила отталкивания рассчитывается с помощью математической модели горения дуги Майра. Модель дуги представлена для каждого полюса выключателя отдельно. При включении износ силовых контактов определяется на основе сравнения действующего тягового усилия включения с общей электродинамической силой отталкивания по всем полюсам контактной системы. При достижении разницы действующей силы тяги и общего электродинамического усилия противодействия порогового значения, компьютерная модель сигнализирует об износе контактной системы. При отключении износ силовых контактов определяется на основе сравнения действующего приводного тягового усилия выключения с минимально допустимым тяговым усилием для процесса отключения вакуумного выключателя. При достижении разницы действующей силы тяги и минимально допустимого тягового усилия размыкания порогового значения, компьютерная модель сигнализирует об износе контактной системы. Расчет уравнений математической модели и визуализация полученных результатов выполнена в среде MATLAB/Simulink. Компьютерная модель позволяет имитировать включения/выключения вакуумного выключателя при различных токах, изменять технические параметры контактной системы и информировать об износе контактной системы. Результаты разработанной компьютерной модели могут быть использованы в задачах диагностирования технического состояния контактных систем вакуумных выключателей.

**Ключевые слова:** компьютерная модель, контакт, износ, коммутация, дуга, вакуумный выключатель.



**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** У мережах середніх класів напруг (до 35 кВ) вакуумні вимикачі є найбільш перспективним напрямком розвитку комутаційних апаратів. Основними перевагами є висока надійність, безпечна експлуатація, зменшення часу на монтаж та обслуговування. Одним із основних факторів, що знижує застосування вакуумних комутаційних апаратів є схильність металів до зварювання у вакуумі та труднощі розробки вакуумної дугогасильної камери через необхідність отримання особливого сплаву контактних матеріалів.

Важливим елементом вакуумних вимикачів вважається вакуумна дугогасильна камера. У вакуумних вимикачах на напругу 6, 10 і 35 кВ використовують одну дугогасильну камеру на полюс. В таких вимикачах приводний механізм з'єднаний із контактним пристроєм за допомогою ізоляційної тяги. На ізоляційній тязі монтується спеціальний розриваючий пристрій, який забезпечує необхідний провал контактів. Контактний натиск у вакуумній дугогасильній камері має бути достатнім для створення низького перехідного опору; за-безпечення надійного ввімкнення на струм короткого замикання; утримування контактів замкнутими при струмах короткого замикання.

Електродинамічні сили відкиду, що виникають між торцевими контактами при комутації у вакуумі більші від електромагнітних сил відкиду звичайних торцевих контактів інших типів вимикачів. Це зумовлено складною формою комутуючих контактів вакуумних вимикачів. Під час комутації на роботу вакуумних вимикачів впливають додаткові сили відштовхування контактів, обумовлені тиском в плазмовому стовпі дуги, але порівняно із силами електродинамічного відкиду вони незначні. При коротких замиканнях присутня небезпека зварювання контактів при знаходженні їх у замкнутому положенні (у випадку наскрізного струму короткого замикання) і тим більше в момент замикання (включення на коротке замикання). При ввімкненні на коротке замикання вірогідність зварювання контактів зростає як за рахунок можливої вібрації, так і меншого приводного зусилля.

Основною причиною зносу комутуючих контактів вакуумного вимикача є електрична ерозія їх поверхні під впливом дугового розряду. Знос контактів від механічних багаторазових комутацій вимикача значно менший від впливу зносу спричиненим електричною ерозією [1]. Тому діагностування зносу контактної системи вакуумного вимикача є задачею актуальною.

У роботі [2] розроблена комп'ютерна модель вакуумного вимикача, яка використовується для моделювання процесів комутації ємнісного навантаження. Даною моделлю враховуються контактні відмови вимикача, переривання струму, описуються перенапруги та їх вплив на процес

комутації, але її застосування обмежене ємнісним навантаженням вакуумного вимикача. Запропонована трифазна тестова комп'ютерна модель високовольтного вимикача у роботі [3] дозволяє оцінювати ефективність роботи вимикача під час комутації струмів короткого замикання та зміни параметрів електричної мережі. Модель відображає процеси комутації високовольтного вимикача при зміні різних параметрів, але не може бути застосована у задачах діагностування вимикача. Автор у роботі [4] наводить математичну та комп'ютерну модель впливу індуктивного обмежувача струму на процес комутації вимикача струмів короткого замикання. Запропонована модель застосовується лише у випадку використання індуктивного обмежувача струму разом із вимикачем. У роботі [5] представлено математичний апарат розрахунку та моделювання напруги відновлення перехідних процесів післякомутаційних процесів у вакуумних вимикачах. Автор у роботах [6, 7] описує модель розрахунку граничного струму та сили зварювання контактів вакуумного вимикача. Отримана модель зручна для розрахунку струму та сили зварювання, але не застосовується для аналізу технічного стану контактної системи вакуумного вимикача. Автори у роботах [8–12] розглядають електричну дугу, що виникає під час комутації вимикача. Представлені варіанти математичних моделей електричної дуги, комп'ютерне моделювання дугових процесів у комутаційних апаратах. Запропоновані моделі описують дугові процеси і можуть бути застосовані у задачах діагностування технічного стану контактної системи вимикачів.

Метою роботи є перевірка запропонованої математичної моделі виявлення та попередження зносу контактної системи вакуумного вимикача шляхом комп'ютерного моделювання у програмі MATLAB процесу комутації вакуумного апарату.

**МАТЕРІАЛ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Важливими умовами надійної роботи вакуумних вимикачів є відсутність зварювання або відкиду контактів при ввімкненні вимикачів на струми короткого замикання. Для дослідження цієї проблеми необхідно отримати механічні параметри (швидкість руху контактів, час зіткнення контактів, час горіння дуги) та теплові параметри (нагрів контактної поверхні, зміну середовища розплавленої області тощо). Вибір моделі виявлення зносу залежить від багатьох факторів, але найважливішими є контактний натиск (тягове зусилля привода), струм комутації, матеріали із яких виготовленні контакти вимикача.

Особливу увагу необхідно приділити контролю швидкості комутації силових контактів вимикачів. Швидкість ввімкнення контактів має задовільняти одночасно дві протилежні вимоги. З однієї сторони, швидкість в момент зіткнення контактів має бути не великою, щоб не викликати надмірне механічне напруження в момент удару контактів. Крім того,

мала швидкість забезпечує зниження коливань сильфона та зменшує вібрацію контактної камери вакуумного вимикача. В іншому випадку збільшення швидкості ввімкнення контактів зменшує тривалість дугового розряду в дугогасильній камері, що призводить до зменшення ерозії комутуючих контактів.

В роботі [13] автори представляють математичну модель виявлення зносу при комутації вакуумного вимикача:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\Psi_{об.вим}}{dt} &= u_{об.вим} - i_{об.вим} R_{об.вим}; \\ V_{вим} &= \frac{dx}{dt}; \\ F_{т.вим} &= \frac{i_{об.вим}}{2V_{вим}} \frac{d\Psi_{об.вим}}{dt}; \\ \frac{d\Psi_{об.ввім}}{dt} &= u_{об.ввім} - i_{об.ввім} R_{об.ввім}; \\ V_{ввім} &= \frac{dx}{dt}; \\ F_{т.ввім} &= \frac{i_{об.ввім}}{2V_{ввім}} \frac{d\Psi_{об.ввім}}{dt}; \\ F_{ед.заг} &= 10^{-7} i_A^2 \ln \frac{r_{к.А}}{r_{о.А}} + 10^{-7} i_B^2 \ln \frac{r_{к.В}}{r_{о.В}} + 10^{-7} i_C^2 \ln \frac{r_{к.С}}{r_{о.С}}; \\ K &= 0, \text{ якщо } (F_{т.ввім} - F_{ед.заг} > \delta) \vee (F_{т.вим} - F_{т.вим}^{дон} > \sigma); \\ K &= 1, \text{ якщо } (F_{т.ввім} - F_{ед.заг} \leq \delta) \vee (F_{т.вим} - F_{т.вим}^{дон} \leq \sigma), \end{aligned} \right. \quad (1)$$

де  $\frac{d\Psi_{об.вим}}{dt}$ ,  $\frac{d\Psi_{об.ввім}}{dt}$  – швидкості зміни потокозчеплення для обмоток вимкнення та ввімкнення;  $i_{об.вим}$ ,  $i_{об.ввім}$  – миттєві значення струму в обмотках вимкнення та ввімкнення;  $u_{об.вим}$ ,  $u_{об.ввім}$  – напруги живлення обмоток вимкнення та ввімкнення;  $R_{об.вим}$ ,  $R_{об.ввім}$  – активні опори обмоток вимкнення та ввімкнення;  $V_{вим}$ ,  $V_{ввім}$  – швидкості руху якоря електромагніту при вимкненні та ввімкненні вимикача;  $F_{т.вим}$ ,  $F_{т.ввім}$  – тягове зусилля при вимкненні та ввімкненні вакуумного вимикача;  $F_{ед.заг}$  – загальна електродинамічна сила відкиду для усієї контактної системи із врахуванням кожного полюсу (полюси А, В, С);  $x$  – переміщення якоря електромагніту;  $i_A$ ,  $i_B$ ,  $i_C$  – миттєві значення струму, який протікає через полюси А, В, С вакуумного вимикача відповідно;  $r_{к.А}$ ,  $r_{к.В}$ ,  $r_{к.С}$  – радіуси комутуючих контактів у кожному із полюсів А, В, С вакуумного вимикача відповідно;  $r_{о.А}$ ,  $r_{о.В}$ ,  $r_{о.С}$  – радіуси металевого перешийку контакту у кожному із полюсів А, В, С вакуумного вимикача відповідно;  $\delta$  – порогове значення різниці діючої сили тяги та загального електродинамічного зусилля протидії при ввімкненні вимикача;  $\sigma$  – порогове значення різниці діючої сили тяги та мінімально допустимого

тягового зусилля розмикання при вимкненні вимикача;  $F_{т.вим}^{дон}$  – мінімально допустиме тягове зусилля розмикання при вимкненні вимикача (визначається експериментальним шляхом);  $K$  – логічна змінна, що характеризує виявлення зносу контактної системи вакуумного вимикача.

Принцип роботи закладений у математичну модель полягає у порівнянні діючого тягового зусилля та загальної електродинамічної сили відкиду контактів при ввімкненні і діючого тягового зусилля із мінімально допустимим тяговим зусиллям для процесу вимкнення. Якщо величина діючого тягового зусилля при ввімкненні відрізняється менше, ніж на задане значення  $\delta$  від загального електродинамічного зусилля відкиду контактів або величина діючого тягового зусилля при вимкненні відрізняється менше, ніж на задане значення  $\sigma$  від мінімально допустимого тягового зусилля вимкнення, то формується сигнал виявлення зносу силових контактів контактної системи вимикача.

Для моделювання системи виявлення зносу важливим є врахування впливу електричної дуги на процес комутації. Електрична дуга є завершальною стадією пробою газу при досить малому опорі джерела напруги, що забезпечує баланс енергії, яка виділяється в дузі у результаті протікання струму та розсіюється у навколишній простір [14]. Аналіз і розрахунок дугових процесів в дугогасильній камері залежить від спільного розгляду термогазодинамічних, електричних, дугових та механічних процесів. Перелічені умови значно ускладнюють пошук універсальних моделей і тому зараз не існує загальноприйнятих моделей, які б враховували усі процеси. Проте в деяких випадках можливо отримати прості вирази для розрахунку характеристики дуги, ґрунтуючись на аналізі важливості членів вихідних рівнянь та враховуючи результати теоретичних і експериментальних досліджень властивостей плазми. В перехідних процесах для формування моделей враховуються результати експериментальних досліджень і їх поєднання з вихідними загальними теоретичними передумовами дозволяє побудувати адаптивні моделі дуги. Однією із таких моделей є модель дуги Майра. Принцип моделі Майра полягає у описі електричної дуги між контактами вимикача у вигляді нелінійного опору  $R_e$ . Модель дуги Майра дозволяє проаналізувати процеси переходу струму через нуль в електричних апаратах змінного струму при комутації. Математичну модель дуги Майра можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{1}{G} \frac{dG}{dt} &= -\frac{1}{R_e} \frac{dR_e}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left( \frac{U_D I}{P_{роз}} - 1 \right) = \\ &= \frac{U_D}{I} \left( \frac{1}{U_D} \frac{dI}{dt} - \frac{1}{U_D^2} \frac{dU_D}{dt} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

де  $G$  – провідність дуги;  $\tau_m$  – постійна часу дуги Майра;  $U_D$  – напруга дуги;  $I$  – струм дуги;  $P_{роз}$  – потужність розсіювання дуги.

Стала часу дуги Майра запишеться:

$$\tau_m = \frac{H_0}{P_{роз}}, \quad (3)$$

де  $H_0$  – постійна теплоємність дуги.

Рівняння (2) є математичним виразом динамічної вольт-амперної характеристики дуги. Модель Майра дозволяє визначити гасіння або негасіння дуги в залежності від зовнішніх умов (параметрів схеми заміщення мережі) та внутрішніх (взаємодія дуги із охолоджуючим середовищем, властивостей середовища та параметрів дугогасильного пристрою).

Побудуємо комп'ютерну модель виявлення зносу контактної системи при ввімкненні вакуумного вимикача (рис. 1) відповідно до математичної моделі (1).

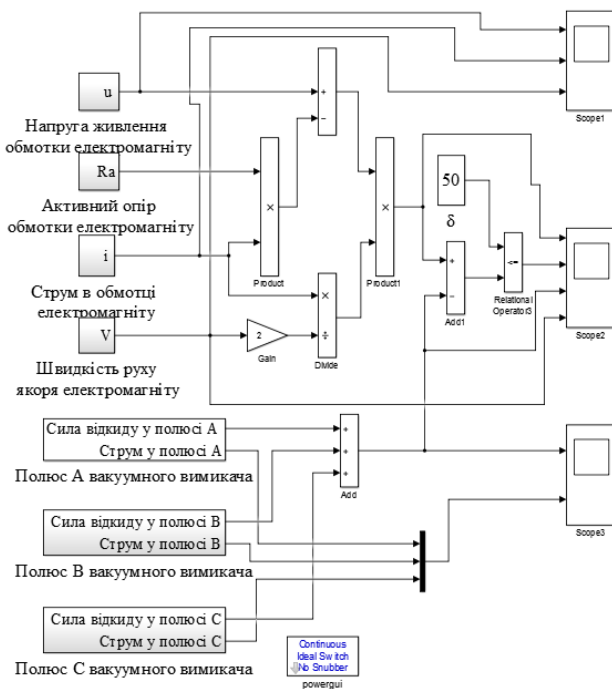


Рисунок 1 – Комп'ютерна модель виявлення зносу контактної системи при ввімкненні вакуумного вимикача

Дана комп'ютерна модель описує процес ввімкнення вакуумного вимикача на струми короткого замикання. Модель складається із розрахунку тягового зусилля електромагнітного приводу та визначення сили відкиду по кожному полюсу вакуумного вимикача. Тягове зусилля електромагніту розраховується за електричними параметрами обмотки ввімкнення (напруга живлення обмотки, струм який протікає через обмотку, активний опір обмотки) та механічними параметрами (швидкість руху якоря електромагніту в процесі ввімкнення вимикача). Для моделювання

використовуються чисельні величини перелічених параметрів (струму, напруги, активного опору обмотки, швидкості руху якоря електромагніту) з осцилограм, які надані заводом-виробником вакуумного комутаційного обладнання при нормальному режимі роботи вимикача. Сили відкиду у кожному із полюсів розраховуються відповідно до формули (1). Фізичні параметри контактів для кожного полюсу задаються окремо. В якості миттєвого значення струму, який протікає через полюси вимикача прийнято величину струму дуги математичної моделі Майра. Модель горіння дуги Майра представлена окремо для кожного полюса. Загальна сила відкиду визначається враховуючи силу відкиду в кожному із полюсів вакуумного вимикача. Детальна комп'ютерна модель розрахунку сили відкиду для полюсу А зображена на рисунку 2, моделі для інших полюсів (полюси В, С) мають аналогічну структуру.

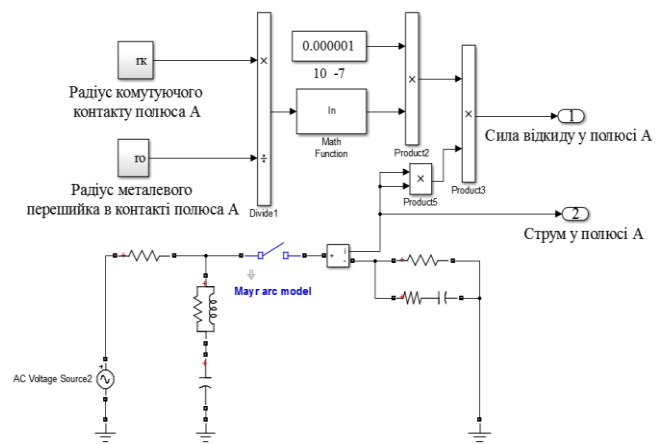


Рисунок 2 – Комп'ютерна модель визначення сили відкиду у полюсі А вакуумного вимикача

Комп'ютерна модель на рисунку 2 дозволяє розрахувати силу відкиду у полюсі А, отримати величину струму горіння дуги. Модель (2) дозволяє змінювати фізичні властивості технічного стану контактів полюса А та параметри електричної мережі. Величини радіусів комутуючих контактів полюсів  $r_{k.A}$ ,  $r_{k.B}$ ,  $r_{k.C}$  приймаємо 36 мм, а радіуси металевго перешийку в контактї полюсів  $r_{o.A}$ ,  $r_{o.B}$ ,  $r_{o.C}$  задаємо 16 мм для контактної системи вакуумного вимикача [14].

Процес визначення зносу контактної системи вакуумного вимикача передбачає визначення тягового зусилля електромагнітного приводу, загальну електродинамічну силу відкиду для усієї контактної системи та порівняння їх між собою. Оскільки для надійної роботи вакуумного вимикача необхідно забезпечити необхідне контактне натискання згідно паспортних даних на вимикач, тому величину  $\delta$  приймаємо 50 Н [15]. Результати моделювання електричних та механічних параметрів електромагнітного приводу при ввімкненні вакуумного вимикача представлено на рисунку 3.

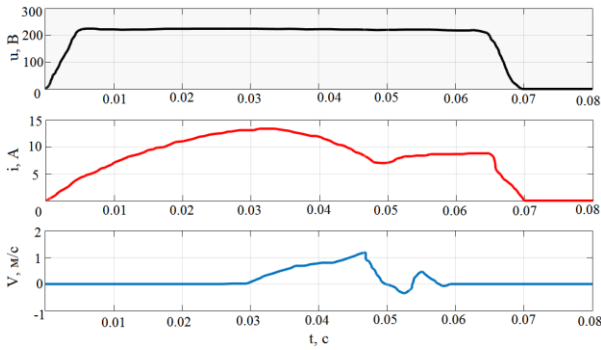


Рисунок 3 – Моделювання електричних параметрів (напруги і струму обмотки ввімкнення) та механічних (швидкості руху якоря) електромагнітного приводу при ввімкненні вакуумного вимикача

Варто зазначити, що для різних виробників та типів комутаційного обладнання величина  $\delta$  може бути різною.

На рисунку 4 зображено результати роботи комп'ютерної моделі виявлення зносу контактної системи.

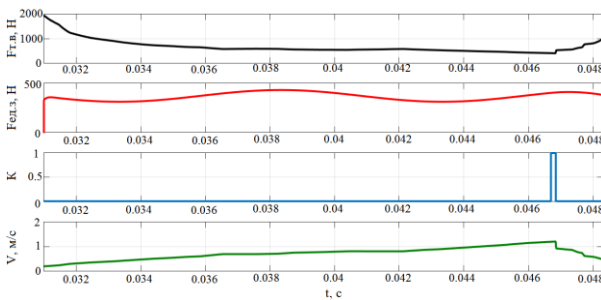


Рисунок 4 – Моделювання роботи комп'ютерної моделі виявлення та попередження зносу контактної системи при ввімкненні вакуумного вимикача

У моделі вимикача початок замикання контактів (ввімкнення вимикача) було задано при  $t = 0,465$  с. Комп'ютерна модель зафіксувала знос контактів (перевищення допустимої умови) протягом  $t = 0,467...0,468$ . Таким чином, подальша експлуатація в майбутньому може призвести до недовмикання вакуумного вимикача (відкид силових контактів). На графіку рис. 6 величина  $K$  змінила свою величину із  $K=1$  на  $K=0$ , але фактично контактна система залишилась у зношеному стані.

Комп'ютерна модель для режиму вимкнення вимикача складається із розрахунку діючого тягового зусилля електромагніту та порівняння його із мінімально допустимим тяговим зусиллям протидії. На рисунку 5 зображена комп'ютерна модель виявлення зносу контактної системи при вимкненні вакуумного вимикача.

У випадку перевищення умови, яка описана у рівнянні (1) система формує сигнал зношення контактної системи.

На рисунку 6 представлено результати моделювання при вимкненні вакуумного вимикача.

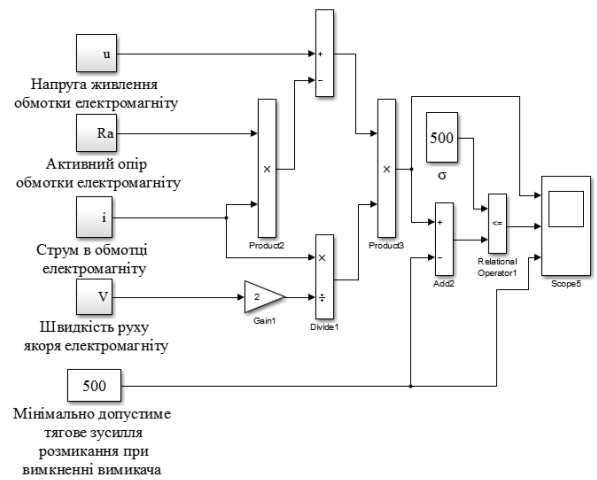


Рисунок 5 – Комп'ютерна модель виявлення зносу контактної системи при вимкненні вакуумного вимикача

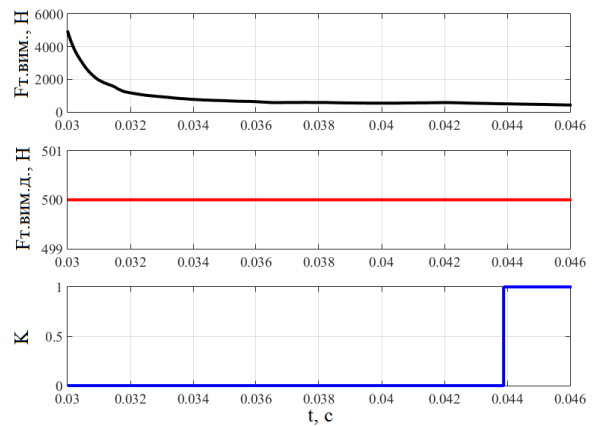


Рисунок 6 – Моделювання роботи комп'ютерної моделі виявлення та попередження зносу контактної системи при вимкненні вакуумного вимикача

Величину  $\sigma$  при вимкненні вимикача приймаємо 500 Н, згідно рекомендацій виробників комутаційного обладнання [15].

Проаналізувавши результати моделювання, можна зробити висновок, що розроблена комп'ютерна модель може бути застосована у задачах діагностування технічного стану комутаційної системи вакуумного вимикача. Застосування розробленої моделі дозволяє завчасно попереджувати оперативний персонал про критичний стан контактної системи вакуумного вимикача.

**ВИСНОВКИ.** Розроблено комп'ютерну модель виявлення та попередження зносу контактної системи вакуумного вимикача, яка дозволяє при ввімкненні та вимкненні вимикача отримати сигнал про зношення контактів вимикача. Встановлено, що на відміну від існуючих способів розроблена комп'ютерна модель дозволяє описувати дугові процеси під час комутації, змінювати параметри мережі та відображати реакцію контактної системи вакуумного вимикача на ці зміни. Врахування

параметрів роботи електромагнітного приводу вимикача та дугових процесів в контактній системі дозволяє ідентифікувати зношення контактної системи. Оскільки дослідно перевірка запропонованого методу виявлення зносу із врахуванням зміни параметрів (мережі, електромагнітного приводу, фізичного стану контактів) є задачею складною в реалізації то використання розробленої комп'ютерної моделі вирішує дану проблему.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Набатов К. А., Афонин В. В. Высоковольтные вакуумные выключатели распределительных устройств электрических аппаратов. Тамбов : Издательство ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. 96 с.
2. Budzisz J. The model of a vacuum circuit breaker for switching on capacitor bank. *Przełqd Elektrotechniczny*. 2019. № 2. P. 140–145. DOI: 10.15199/48.2019.02.31.
3. Haider M. A Three-phase Test Circuit Design for High Voltage Circuit Breaker Based on Modeling. *AL-Bahir Quarterly Adjudicated Journal for Natural and Engineering Research and Studies*. 2016. № 7. P. 39–51.
4. Tasdighi M. Inductive FCL's Impact on Circuit Breaker's Interruption Condition During Short-Line Faults. *2013 North American Power Symposium (NAPS)*. Manhattan. KS. USA. 2013. P. 1–5. DOI: 10.1109/NAPS.2013.6666875.
5. Soloot A., Gholami A., Niayesh K. Study on Post Arc Current and Transient Recovery Voltage in Vacuum Circuit Breaker. *International Review of Modeling and Simulation*. 2011. Vol. 4. № 2. P. 699–709.
6. Байда Е. И. Мультифизическая модель расчета граничного тока сваривания контактов вакуумного выключателя. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2014. № 41. С. 3–9.
7. Байда Е. И. Теоретический расчет сил сваривания контактов при их замыкании на аварийные сверхтоки. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2012. № 3. С. 11–13.
8. Nitu S., Nitu C., Mihalache P., Anghelita P., Pavelescu D. Comparison between model and experiment in studying the electric arc. *Journal of optoelectronics and advanced materials*. 2008. Vol. 10. № 5. P. 1192–1196.
9. Mahajan N., Patil K., Shembekar S. Electric Arc model for High Voltage Circuit Breakers Based on Matlab/Simulink. *International journal of science, spirituality, business and technology (IJSSBT)*. 2013. Vol. 1. № 2. P. 15–21.
10. Pasumpon S., Saravanan R., Maruthu A., Saravanan A., Muneeswaran M. Evaluation of High-Voltage Circuit Breaker Performance with Modified Schavemaker Arc Model. *International Journal of Digital Communication and Networks (IJDCN)*. 2014. Vol. 3. № 2. P. 18–23.
11. Hosseini S., Eshagh E., Edalatian A. The Modeling of Electric Arc in High Voltage Circuit Breakers with Use of Schavemaker Model and Negative Feedback. *International Journal of Science and Engineering Investigations*. 2013. Vol. 2. № 16. P. 19–22.
12. Markovic N., Bjelic S., Zivanic J., Jaksic U. Numerical simulation and analytical model of electrical arc impedance in the transient processes. *Przełqd Elektrotechniczny*. 2013. Vol. 89. № 2a. P. 113–117.
13. Грабко В. В., Дідушок О. В. Математична модель виявлення зносу контактної системи при комутації вакуумного вимикача. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія : Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. Харків : НТУ «ХПІ». 2020. № 4 (1358). С. 12–19.
14. Александров Г. Н., Борисов Г. С., Каплан Г. С. Теория электрических аппаратов: Учебник для вузов. СПб. : Издательство СПб ГТУ, 2000. 540 с.
15. Аношин О. А., Петров П. В., Малаховский С. И. О возможности использования силы удержания привода как критерия оценки основных характеристик вакуумных выключателей. *Электрические сети и системы*. 2005. № 6. С. 10–12.

## COMPUTER MODEL OF IDENTIFICATION OF WEAR OF THE CONTACT SYSTEM OF THE VACUUM CIRCUIT BREAKER

V. Grabko, O. Didushok

Vinnytsia National Technical University

vul. Khmel'nitsky shose, 95, Vinnytsia, Ukraine, 21021. E-mail: grabko@vntu.edu.ua, didushokov@gmail.com

**Purpose.** Checking the operation of the mathematical model for detecting wear of the contact system of a vacuum circuit breaker. Analysis of the processes taking place during switching and which affect the technical condition of the contact system of the vacuum circuit breaker, the detection of contact wear when the circuit breaker is turned on and off. **Methodology.** We used a computer model of the Mayr arc in MATLAB/Simulink to calculate the electrodynamic force of contact drop at each pole when turned on. The traction forces of the electromagnet of the switch at switching on and off on electric and mechanical parameters of the electromagnetic actuator were calculated. The effective tractive force and the total electrodynamic force of contact rejection when switched on and the effective tractive force with the minimum allowable tractive force for the shutdown process were compared. The numerical solution of the mathematical model equations and the visualization of the obtained results were performed in MATLAB®/Simulink. **Results.** We developed a computer model in the MATLAB/Simulink program to calculate the wear of the contact system of a circuit breaker according to a mathematical model. In case of exceeding the conditions for comparing

traction and opposing forces for switching on or off, a signal is generated for detecting wear of the power contacts of the contact system of the switch. The wear detection signal is generated separately for the on and off switch mode. **Originality.** For the first time, we conducted a computer simulation of the identification of the wear of the vacuum switch contact system. We analyzed the effect of electric erosion of the arc discharge on the contacts and the mechanical parameters of the contacts' movement on the wear of the contact system during the switching of the vacuum switch with the electromagnetic actuator. **Practical value.** The results of the computer simulation confirm the feasibility of applying the proposed mathematical model for the detection of wear of the contact system of the vacuum switch. The proposed method of calculating contact wear can be used to diagnose the technical condition of a contact system of a switch. The application of the model will allow timely warning of operational staff about the critical condition of the contact system, the need to have it repaired and to prevent damage to the vacuum switch. Figures 6, references 15.

**Key words:** computer model, contact, wear, switching, arc, vacuum circuit breaker.

#### REFERENCES

- Nabatov, K. A., & Afonin, V. V. (2010). *Vysokovol'nyye vakuumnyye vyklyuchatelyi raspredelitel'nykh ustroystv elektricheskikh apparatov* [High-voltage vacuum circuit breakers for switchgears of electrical apparatus]. Tambov: Izdatel'stvo GOU VPO TGTU. [in Russian]
- Budzisz, J. (2019). The model of a vacuum circuit breaker for switching on capacitor bank. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2, 140–145.
- Haider, M. A (2016). Three-phase Test Circuit Design for High Voltage Circuit Breaker Based on Modeling. *AL-Bahir Quarterly Adjudicated Journal for Natural and Engineering Research and Studies*, 7, 39–51.
- Tasdighi, M. (2013). Inductive FCL's Impact on Circuit Breaker's Interruption Condition During Short-Line Faults. *2013 North American Power Symposium (NAPS)*, (pp. 1–5). Manhattan, Kansas, USA.
- Soloot, A., & Gholami, A., & Niayesh, K. (2011). Study on Post Arc Current and Transient Recovery Voltage in Vacuum Circuit Breaker. *International Review of Modeling and Simulation*, 4 (2), 699–709.
- Bayda, E. I. (2014). Mul'tifizicheskaya model' rascheta granichnogo toka svarivaniya kontaktov vakuumnogo vyklyuchatelya [A multiphysical model for calculating the boundary current of welding the contacts of a vacuum circuit breaker]. *Visnik NTU «KhPI»*, 41, 3–9. [in Russian].
- Bayda, E. I. (2012). Teoreticheskiy raschet sil svarivaniya kontaktov pri ikh zamykanii na avariynye sverkhhtoki [Theoretical calculation of the welding forces of contacts when they are shorted to emergency overcurrents]. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*, 3, 11–13. [in Russian]
- Nitu, S., Nitu, C., Mihalache, P., Anghelita, P., & Pavelescu, D. (2018). Comparison between model and experiment in studying the electric arc. *Journal of optoelectronics and advanced materials*, 10 (5), 1192–1196.
- Mahajan, N., Patil, K., & Shembekar, S. (2013). Electric Arc model for High Voltage Circuit Breakers Based on Matlab/Simulink. *International journal of science, spirituality, business and technology (IJSSBT)*, 1 (2), 15–21.
- Pasumpon, S., Saravanan, R., Maruthu, A., Saravanan, A., & Muneeswaran, M. (2014). Evaluation of High-Voltage Circuit Breaker Performance with Modified Schavemaker Arc Model. *International Journal of Digital Communication and Networks (IJDCN)*, 3 (2), 18–23.
- Hosseini, S., Eshagh, E., & Edalatian, A. (2013). The Modeling of Electric Arc in High Voltage Circuit Breakers with Use of Schavemaker Model and Negative Feedback. *International Journal of Science and Engineering Investigations*, 2 (16), 19–22.
- Markovic, N., Bjelic, S., Zivanic, J., & Jaksic, U. (2013). Numerical simulation and analytical model of electrical arc impedance in the transient processes. *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2a), 113–117.
- Hrabko, V. V., & Didushok, O. V. (2020). Matematychna model vyiavlennia znosu kontaktnoi systemy pry komutatsii vakuumnogo vymykacha [Mathematical model of detection of wear of a contact systems when switching a vacuum switch]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiyi politekhnichnyi instytut». Ser.: Problemy avtomatyzovanoho elektropryvoda. Teoriia i praktyka - Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Problems of automated electrodrives. Theory and practice*, 4 (1358), 12–19 [in Ukrainian].
- Aleksandrov, G. N., Borisov, G. S., & Kaplan, G. S. (2000). *Teoriya elektricheskikh apparatov: Uchebnyk dlya vuzov* [Theory of Electrical Appliances: A Textbook for High Schools]. SPb.: Izdatel'stvo SPb GTU [in Russian].
- Anoshin, O. A., Petrov, P. V., & Malahovskij, S. I. (2005). O vozmozhnosti ispol'zovaniya sily uderzhanija privoda kak kriteriya ocenki osnovnykh harakteristik vakuumnykh vyklyuchatelej [On the possibility of using the drive holding force as a criterion for evaluating the main characteristics of vacuum circuit breakers]. *Jelektricheskie seti i sistemy*, 6, 10–12. [in Russian].

Стаття надійшла 24.03.2020.