

Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ДІДУШОК ОЛЕГ ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 621.316.542.9.032.11:681.518.5

ДИСЕРТАЦІЯ
МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ
ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ

05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

О. В. Дідушок

Науковий керівник

Грабко Володимир Віталійович
доктор технічних наук, професор

Вінниця – 2020

АНОТАЦІЯ

Дідушок О. В. Методи та засоби діагностування технічного стану вакуумних вимикачів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи». – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2020.

У дисертації запропоновано методи діагностування контактної системи та електромагнітного приводу на основі аналізу вебер-амперних характеристик вакуумного вимикача.

Виконано аналіз методів і засобів діагностування технічного стану комутаційних апаратів. В даний час, в складі електричного обладнання енергетичних підприємств використовують різні типи комутаційних апаратів. Організація системи моніторингу для кожного типу комутаційних апаратів має свої спеціальні особливості і потребує застосування часто унікальних методів діагностування. Особливу увагу приділено діагностуванню залишкового ресурсу головних контактів, технічного стану приводу та контролю ізоляційної системи комутаційного апарату. Універсальними методами є використання тепловізійної діагностики та вібродіагностики. Перевагою застосування даних засобів діагностування є безпека персонала при проведенні обстеження обладнання, відсутність необхідності відключення досліджуваного обладнання та можливість застосування пристроїв діагностування на інших типах електрообладнання.

Однією із причин відмов надійної роботи вакуумного вимикача є некоректна робота приводу. Більша частина вакуумних вимикачів має електромагнітний привод. Основними методами діагностування приводу є: контроль швидкісних і часових параметрів контактної системи, контроль вібраційних процесів, контроль форми струму управління електромагніта вимикача.

Для реалізації задачі діагностування електромагнітного приводу проведені дослідження на основі аналізу вебер-амперних характеристик. Форма

нелінійної кривої змінюється протягом усього циклу роботи приводу. Відомі методи та моделі діагностування вебер-амперних характеристик не використовуються у задачах діагностування технічного стану електроприводу вакуумного вимикача. Вирішення цієї проблеми потребує застосування методів, які врахують ступінь відхилення між еталонною та вимірною вебер-амперною характеристикою обмоток електромагніту вимикача. Перспективним є аналіз вебер-амперних характеристик електромагніту вакуумного вимикача та встановлення їх взаємозв'язку з дефектами в електромагнітному приводі.

При комутації вимикача відбувається знос силових контактів. Під зносом контактів розуміють руйнування робочих поверхонь силових контактів, що приводить до зміни їх форми, розміру, маси і до зменшення провалу. Основними методами діагностування технічного стану контактів вимикачів є: вимірюванні величини відключеною фазами потужності короткого замикання, контроль стану головних контактів по величині струму, контроль стану головних контактів, який визначається за видом і тривалістю горіння дуги.

Існуючі методи дослідження залишкового ресурсу вимикачів використовують у задачах діагностування технічного стану вимикачів. Проте запропоновані рішення не дозволяють охопити весь спектр комутаційних апаратів та підходів, оскільки виробники не завжди надають ресурсну характеристику на вимикач і існує обмеженість інформації щодо співвідношень між кількістю комутацій та значеннями комутуваного струму.

В роботі розроблено математичну модель діагностування технічного стану електромагнітного привода вакуумного вимикача на основі порівнянні еталонної вебер-амперної характеристики із поточною та визначенні коефіцієнта відхилення, що дозволяє оцінити поточний технічний стан електромагніту вимикача в процесі експлуатації. Запропонована математична модель яка дозволяє визначати знос контактної системи, спричинений дуговими процесами та механічними перенапруженнями, при ввімкненні та вимкненні вакуумного вимикача, що дозволяє визначити ступінь наближення технічного стану контактної системи вимикача до аварійного. При ввімкненні знос силових контактів визначається на основі порівняння діючого тягового

зусилля ввімкнення із загальною електродинамічною силою відкиду по усіх полюсах 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. Розроблена математична модель оцінки синхронної роботи контактної системи вимикача, що на відміну від існуючих, дозволяє розраховувати відхилення від допустимого значення часу ввімкнення вимикача та формувати сигнали керуючої дії для оперативного персоналу щодо регулювання рухомих контактів полюсів вимикача. Для кожного полюса формується інформативний сигнал на зближення або віддалення його рухомих контактів від нерухомих для забезпечення синхронної роботи контактної системи вимикача.

На основі математичної моделі порівняння вебер-амперних характеристик електромагнітного приводу розроблено алгоритм та мікропроцесорний пристрій, який має розширені функціональні можливості і може легко інтегруватись в загальну систему діагностування комутаційного обладнання та забезпечує достатню швидкодію в процесі його експлуатації. З використанням математичної моделі діагностування електромагнітного приводу розроблена структурна схема пристрою, застосування якої, на відміну від відомих, дозволяє здійснювати діагностування електромагнітного приводу в процесі роботи вакуумного вимикача. На основі математичних моделей для визначення неузгодження одночасності ввімкнення полюсів вимикача та визначення допустимого відхилення положення рухомих контактів полюсів вимикача розроблені структурні схеми пристроїв, які легко реалізується на програмованих логічних інтегральних схемах будь-яких виробників. З використанням математичної моделі для визначення неузгодження одночасності ввімкнення полюсів вимикача запропоновано реалізацію пристрою визначення неузгодження одночасності ввімкнення полюсів вимикача із використанням ПЛІС на базі мікросхеми Altera марки MAXII EPM570T100C5. Програму було розроблено в середовищі Quartus II 15.0. Така реалізація дозволяє суттєво підвищити швидкодію пристрою, зменшити його

енергоспоживання та розміри. На основі математичної моделі виявлення зносу контактної системи розроблено мікропроцесорний пристрій та алгоритм роботи, який з високою достовірністю дозволяє визначати знос контактної системи має розширені функціональні можливості і може легко інтегруватись у загальну систему діагностування комутаційного обладнання.

Розроблено комп'ютерну модель електромагнітного привода вакуумного вимикача ВР0-10-12,5/630 У2 в програмі FEMM. Проведено розрахунок його магнітної системи. Визначено потокозчеплення обмоток вимикача при його ввімкненні та вимкненні. Отримані результати моделювання сили утримання якоря електромагніту у програмі FEMM відповідають паспортним даним на вимикач. Результати моделювання підтверджують доцільність застосування запропонованого методу визначення магнітної характеристики обмоток вимикача. Створено у ППП Matlab Simulink 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. 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. Проведено натурний експеримент із імітацією несправності вимикача для перевірки адекватності роботи запропонованого методу діагностування електромагнітного приводу вакуумного вимикача ВР0-10-12,5/630 У2. При ввімкненні було розрегульовано блок-контакти положення вимикача, що призвело до раннього відключення живлення від обмотки ввімкнення. При вимкненні вакуумного вимикача було зміщено напрямок руху осі приводної тяги, що призвело до додаткового навантаження при вимкненні вимикача. Отримані результати потокозчеплення для обмоток електромагніту вакуумного вимикача підтверджуються моделюванням у програмі FEMM.

Наведений спосіб отримання вебер-амперної характеристики може бути використаний для діагностування електромагнітного приводу вакуумного вимикача на основі аналізу вебер–амперних характеристик обмоток.

Здійснено оцінку похибок помилок першого і другого роду при визначенні часу неодноразовості комутації полюсів вимикача та проведено оцінку точності синтезованих пристроїв за критерієм мінімального ризику.

Ключові слова: вакуумний вимикач, діагностування, технічний стан, привод, електромагніт, контактна система, знос, пристрій, алгоритм, мікроконтролер, комп'ютерна модель.

ABSTRACTS

Didushok O. V. Methods and means of diagnosing the technical condition of the vacuum circuit breakers. – Qualification research paper, manuscript copyright.

The dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of engineering sciences in speciality 05.09.03 “Electrotechnical complexes and systems”. – Vinnitsya National Technical University, 2020.

In the dissertation methods of diagnosing the contact system and the electromagnetic drive on the basis of the analysis of weber-ampere characteristics of the vacuum switch are offered.

The analysis of methods and means of diagnosing the technical condition of switching devices is considered in the work. Currently, as part of the electrical equipment of energy companies use different types of switching devices. The organization of the monitoring system for each type of switching devices has its own special features and requires the use of often unique diagnostic methods. Particular attention is paid to diagnosing the residual life of the main contacts, the technical condition of the drive and control of the isolation system of the switching apparatus. Universal methods are the use of thermal imaging diagnostics and vibration diagnostics. The advantage of using these diagnostic tools is the safety of personnel during the inspection of equipment, the absence of the need to turn off the test

equipment and the possibility of using diagnostic devices on other types of electrical equipment.

One of the reasons for failure of reliable operation of the vacuum switch is incorrect operation of the drive. Most vacuum circuit breakers have an electromagnetic drive. The main methods of diagnosing the drive are: control of speed and time parameters of the contact system, control of vibration processes, control of the shape of the control current of the switch electromagnet.

To implement the task of diagnosing the electromagnetic drive, research was conducted based on the analysis of weber-ampere characteristics. The shape of the nonlinear curve changes throughout the drive cycle. Known methods and models for diagnosing of weber-ampere characteristics are not used in problems of diagnosing the technical condition of the electric drive of a vacuum switch. The solution to this problem requires the use of methods that take into account the degree of deviation between the reference and measured weber-ampere characteristics of the windings of the electromagnet of the switch. A promising task is the analysis of the weber-ampere characteristics of the electromagnet of the vacuum switch and the establishment of their relationship with defects in the electromagnetic drive.

The power contacts wear out when the switch is switched. Under the wear of the contacts understand the destruction of the working surfaces of the power contacts, which leads to a change in their shape, size, weight and to reduce failure. The main methods of diagnosing the technical condition of the contacts of switches are: measuring the value of the disconnected phases of short-circuit power, monitoring the state of the main contacts by current, monitoring the state of the main contacts, which is determined by the type and duration of arc burning.

Existing methods of research of residual resource of switches are used in problems of diagnosing a technical condition of circuit breakers. However, the proposed solutions do not cover the full range of switching devices and approaches, as manufacturers do not always provide a resource characteristic per switch and there is limited information on the relationship between the number of switches and the values of the switched current.

The paper develops a mathematical model for diagnosing the technical condition of the electromagnetic drive of a vacuum switch based on comparing the reference weber-ampere characteristic with the measured and determining the deviation coefficient, which allows to assess the current technical condition of the breaker electromagnet during operation. A mathematical model is proposed to determine the wear of the contact system caused by arc processes and mechanical overvoltages when turning on and off the vacuum switch, which allows to determine the degree of approximation of the technical condition of the contact system of the switch to the emergency. At switching on wear of power contacts is defined on the basis of comparison of operating traction force of switching on with the general electrodynamic force of a throw on all poles of contact system. When switching off, the wear of the power contacts is determined on the basis of a comparison of the current drive traction switch-off force with the minimum permissible traction force for the process of switching off the vacuum switch. The developed mathematical model for estimating the synchronous operation of the switch contact system, which, in contrast to the existing ones, allows to calculate deviations from the allowable value of the switch on time and generate control signals for operating personnel to adjust the moving contacts of the switch poles. For each pole, an informative signal is generated to bring its moving contacts closer or further away from the fixed ones to ensure the synchronous operation of the switch contact system.

Based on a mathematical model comparing the weber-ampere characteristics of the electromagnetic drive, an algorithm and a microprocessor device have been developed that has advanced functionality and can be easily integrated into the overall system for diagnosing switching equipment and provides sufficient speed during its operation. Using a mathematical model for diagnosing an electromagnetic drive, a block diagram of the device has been developed, the use of which, in contrast to the known ones, allows diagnosing an electromagnetic drive during the operation of a vacuum switch. On the basis of mathematical models for determining the mismatch of the simultaneous switching on of the switch poles and determining the allowable deviation of the position of the moving contacts of the switch poles developed structural diagrams of devices that are easily implemented on

programmable logic integrated circuits of any manufacturers. Using a mathematical model to determine the mismatch of the switching pole of the switch, it is proposed to implement a device for determining the mismatch of the switching poles of the switch using PLD based on the Altera chip brand MAXII EMP570T100C5. The program was developed in Quartus II 15.0. This implementation allows you to significantly increase the speed of the device, reduce its power consumption and size. Based on the mathematical model of contact system wear detection, a microprocessor device and algorithm have been developed, which with high reliability allows to determine contact system wear has advanced functionality and can be easily integrated into the general system for diagnosing switching equipment.

The computer model of the electromagnetic drive of the vacuum switch BP0-10-12,5 / 630 U2 in the FEMM program is developed. In the computer model the magnetic system of the electromagnetic drive of the switch is calculated. The model calculates the flux linkage of the switch windings when it is turned on and off. The obtained results of modeling the holding force of the armature of the electromagnet in the FEMM program correspond to the passport data on the switch. The simulation results confirm the feasibility of the proposed method for determining the magnetic characteristic of the switch windings. A computer model for detecting and preventing the wear of a vacuum circuit breaker contact system has been created at Matlab Simulink, which allows you to receive a signal about the wear of the circuit breaker contacts when you turn on and off the circuit breaker. It is established that, unlike the existing methods, the developed computer model allows to describe arc processes during switching, to change network parameters and to reflect the reaction of the contact system of the vacuum switch to these changes. Since the experimental verification of the proposed method of detecting wear, taking into account changes in parameters (network, electromagnetic drive, physical state of contacts) is a difficult task to implement, the use of the developed computer model solves this problem. A field experiment with simulation of circuit breaker failure to verify the adequacy of the proposed method of diagnosing the electromagnetic drive of the vacuum circuit breaker BP0-10-12,5 / 630 U2. When switched on, the block contacts of the switch position were adjusted, which led to the early disconnection of power from the

switching winding. When the vacuum switch was switched off, the direction of movement of the drive rod axis was shifted, which led to an additional load when the switch was switched off. The obtained results of flux coupling for the windings of the electromagnet of the vacuum switch are confirmed by simulation in the FEMM program. The above method of obtaining the weber-ampere characteristic can be used to diagnose the electromagnetic drive of the vacuum switch based on the analysis of weber-ampere characteristics of the windings.

The error of errors of the first and second kind at determination of time of non-simultaneity of switching of poles of the switch is estimated and the estimation of accuracy of the synthesized devices on a criterion of the minimum risk is carried out.

Keywords: vacuum circuit breaker, diagnostics, technical condition, drive, electromagnet, contact system, wear, device, algorithm, microcontroller, computer model.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- [1] В. В. Грабко, та О. В. Дідушок, “Метод діагностування електромагнітного привода вакуумного вимикача на основі вебер-амперних характеристик”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 53 – 61, 2018. doi: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2018-141-6-53-61>
- [2] О. В. Дідушок, “Мікропроцесорний пристрій для діагностування електромагнітного привода вакуумного вимикача”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 31 – 36, 2019. doi: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-147-6-31-36>
- [3] В. В. Грабко, О. В. Дідушок, “Дослідження роботи електромагнітного привода вакуумного вимикача як об'єкта діагностування”, *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика*, № 9 (1334), с. 57 – 62, 2019. doi: [10.20998/2079-8024.2019.9.11](https://doi.org/10.20998/2079-8024.2019.9.11)
- [4] В. В. Грабко, О. В. Дідушок, “Математична модель виявлення зносу контактної системи при комутації вакуумного вимикача”, *Вісник*

Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика, № 4 (1358), с. 12 – 19, 2020. doi: 10.20998/2079-8024.2020.4.01

- [5] В. В. Грабко, О. В. Дідушок, “Комп’ютерна модель виявлення зносу контактної системи вакуумного вимикача”, *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, Випуск 1 (49), с. 38 – 44, 2020. doi: 10.30929/2072-2052.2020.1.49.38-44
- [6] В. В. Грабко, В. В. Грабко, та О. В. Дідушок, “Пристрій для діагностування електричного привода високовольтного вимикача”, *МПК G07C 3/10 (2006.01). № 137512*, Жов. 25, 2019.
- [7] В. Грабко, та О. Дідушок, “Математична модель діагностування технічного стану електромагнітного приводу вакуумного вимикача”, на *XIV Міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах»*, Вінниця, 2018, с.95.
- [8] О. Дідушок, “Математична модель діагностування технічного стану контактної системи вакуумного вимикача”, на *5-ій Міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах»*, Вінниця, 2019, с.90.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	Error! Bookmark not defined.
ВСТУП.....	14
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАНЬ ДІАГНОСТУВАННЯ	
ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ	Error! Bookmark not defined.
1.1 Аналіз методів діагностування комутаційних апаратів	Error! Bookmark not defined.
1.2 Аналіз засобів діагностування приводів вимикачів	Error! Bookmark not defined.
1.3 Аналіз засобів діагностування контактної системи вимикачів	Error! Bookmark not defined.
1.4 Узагальнення результатів аналізу і постановка задачі дослідження	Error! Bookmark not defined.
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ	
ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ	Error! Bookmark not defined.
2.1 Математична модель діагностування технічного стану електромагнітного приводу на основі аналізу вебер-амперних характеристик.....	Error! Bookmark not defined.
2.2 Математична модель системи виявлення зносу контактної системи вакуумного виимикача.....	Error! Bookmark not defined.
2.3 Математична модель оцінки та налаштування синхронної роботи контактної системи вакуумного вимикача	Error! Bookmark not defined.
2.4 Висновки по розділу 2.....	Error! Bookmark not defined.
РОЗДІЛ 3 СИНТЕЗ ПРИСТРОЇВ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО	
СТАНУ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ	Error! Bookmark not defined.
3.1 Мікропроцесорна реалізація засобу для діагностування електромагнітного приводу вакуумного вимикача на основі аналізу вебер- амперних характеристик.....	Error! Bookmark not defined.
3.2 Пристрій діагностування електричного приводу вакуумного вимикача	Error! Bookmark not defined.
3.3 Пристрій для визначення неузгодження одночасності ввімкнення полюсів вимикача.....	Error! Bookmark not defined.
3.4 Пристрій для формування керуючої дії налаштування синхронної роботи контактної системи	Error! Bookmark not defined.

3.5 Реалізація пристрою діагностування неузгодження одночасності ввімкнення полюсів вимикача із застосуванням програмованих логічних інтегральних мікросхем	Error! Bookmark not defined.
3.6 Мікропроцесорний пристрій для виявлення зносу контактної системи вакуумного вимикача	Error! Bookmark not defined.
3.7 Інтеграція реалізованих схем	Error! Bookmark not defined.
3.8 Висновки по розділу 3	Error! Bookmark not defined.
РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВАКУУМНОГО ВИМИКАЧА	Error! Bookmark not defined.
4.1 Комп'ютерна модель електромагнітного приводу вакуумного вимикача	Error! Bookmark not defined.
4.2 Комп'ютерна модель системи виявлення зносу контактної системи вакуумного вимикача	Error! Bookmark not defined.
4.3 Обробка експериментальних даних	Error! Bookmark not defined.
4.4 Оцінка похибок помилок першого і другого роду при визначенні часу неодноразовості комутації полюсів вимикача	Error! Bookmark not defined.
4.5 Оцінка точності синтезованих пристроїв діагностування неодноразовості комутації полюсів вимикача за критерієм мінімального ризику	Error! Bookmark not defined.
4.6 Висновки по розділу 4	Error! Bookmark not defined.
ВИСНОВКИ	Error! Bookmark not defined.
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	20
ДОДАТКИ	Error! Bookmark not defined.31
Додаток А Довідки про впровадження результатів досліджень	35
Додаток Б Комп'ютерне моделювання електромагнітного приводу Е-10 вакуумного вимикача ВР0-10-12,5/630 У2 у програмі FEMM	Error! Bookmark not defined.
Додаток В Оцінка похибок першого та другого роду	Error! Bookmark not defined.
Додаток Д Оцінка точності синтезованих пристроїв діагностування за критерієм мінімального ризику	Error! Bookmark not defined.
Додаток Е Список опублікованих праць за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	Error! Bookmark not defined.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Надійне електропостачання споживачів можливе лише у випадку надійної роботи усього обладнання енергосистеми. При цьому особлива увага приділяється вимикачам, за допомогою яких здійснюється комутація в електричних мережах [1]. Вони належать до найбільш важливих комутаційних апаратів, від надійності функціонування яких, залежить стійкість забезпечення електропостачання споживачів. За допомогою вимикачів здійснюється відключення аварійних струмів короткого замикання, операції комутації номінального робочого струму, а також комутації, пов'язані зі зміною напрямку потоків потужностей в електроенергетичних системах.

Світова тенденція розвитку електротехнічного устаткування свідчить про заміну поширених у минулому масляних та маломасляних вимикачів напругою 6-35 кВ на вакуумні вимикачі [2]. Вакуумні комутаційні апарати мають найбільшу динаміку розвитку і є найбільш перспективними в розподільчих установках середньої номінальної напруги. Вакуумні дугогасильні пристрої мають високу надійність і зносостійкість [3]. Але є також певні недоліки: перенапруги, викликані неодноразовою комутацією полюсів вимикача; розрегулювання контактної системи в процесі довготривалої роботи, висока вартість даного типу комутаційного обладнання.

Для оцінки технічного стану вакуумного вимикача використовуються різні засоби діагностування [4]. Особливу увагу в процесі діагностування технічного стану вакуумного вимикача приділяють дослідженню роботи його приводу [5]. Від технічного стану приводу залежить надійність роботи усього комутаційного апарату, його технічна можливість здійснити замикання/розмикання головних і допоміжних контактів із заданими швидкісними та динамічними параметрами. В процесі роботи вакуумного вимикача дугові процеси під час комутації призводять до зношення контактної системи (зміна форми, розміру, маси робочих поверхонь силових контактів, зменшення їх провалу). Існуючі засоби діагностування контактної системи

вакуумних вимикачів зводяться до виявлення існуючих відхилень від заводських параметрів, але виявлення прихованих дефектів або тих, що зароджуються, потребує застосування нових методів діагностування.

Вказані проблеми обумовлюють актуальність наукової задачі, спрямованої на підвищення надійної роботи вакуумного комутаційного апарату шляхом розробки нових методів діагностування його технічного стану.

Дослідженню та створенню засобів діагностування технічного стану вимикачів присвячена велика кількість робіт, авторами яких є: В. В. Кутін, О. Є. Рубаненко, Б. С. Стогній, М. Ф. Сопель, Є. М. Танкевич, А. В. Панов, В. І. Паньків, Г. М. Міхеєв, В. А. Шахнін, В. І. Прівалов, Н. І. Овчаренко, А. І. Ящура та багато інших.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Основний зміст роботи складають результати досліджень, що проводились на кафедрі електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті Вінницького національного технічного університету у відповідності до наукового напрямку «Розробка математичних моделей процесів, що протікають в електричних та енергетичних системах, інформаційно-вимірювальних систем та систем автоматичного та автоматизованого керування цими процесами», зокрема дисертаційне дослідження пов'язане з кафедральною науково-дослідною темою № 29 КЗ «Діагностика, захист від аварійних режимів та методи експлуатації електрообладнання автоматизованих та автоматичних систем промислових підприємств і транспорту».

Мета і завдання дослідження

Метою роботи є підвищення надійності роботи вакуумних вимикачів, а отже, і електричних мереж в цілому шляхом вдосконалення методів і засобів діагностування електромагнітного приводу та контактної системи вакуумного вимикача.

Об'єктом дослідження в дисертаційній роботі є процеси зміни технічного стану вакуумних вимикачів в процесі їх експлуатації.

Предметом дослідження є методи та засоби визначення технічного стану системи електроприводу вакуумних вимикачів та їх діагностичні ознаки під час експлуатації.

Відповідно до вказаної мети необхідно розв'язати такі **основні задачі**:

– провести аналіз існуючих засобів діагностування комутаційних апаратів;

– розробити математичні моделі діагностування електромагнітного приводу та контактної системи вакуумних вимикачів;

– за математичними моделями розробити структурні схеми пристроїв для діагностування електромагнітного приводу та контактної системи вакуумного вимикача, що далі реалізуються на базі промислових компонентів, які виробляються серійно, або інтегрувати їх в існуючі системи діагностування електричного обладнання;

– шляхом комп'ютерного моделювання дослідити адекватність запропонованих математичних моделей та реалізованих пристроїв.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених задач та аналізу прийнятих схемотехнічних та алгоритмічних рішень використані такі методи дослідження: теорії загальної електротехніки для опису електричних процесів під час комутації вимикача, теорії магнетизму, для опису магнітних процесів в електромагніті, метод скінченних елементів, для побудови комп'ютерної моделі електромагніта, теорії термогазодинаміки, для опису дугових процесів у вакуумній камері, методи комп'ютерного моделювання для дослідження перехідних процесів, що протікають в процесі комутації вимикача та для підтвердження адекватності розроблених математичних моделей, теорії ймовірностей для знаходження помилок першого і другого роду, аналітичні можливості комп'ютерної алгебри для здійснення розрахунків математичних моделей.

Наукова новизна отриманих результатів:

– вперше розроблено математичну модель діагностування технічного стану електромагнітного привода вакуумного вимикача на основі порівняння еталонної вебер-амперної характеристики із поточною та визначенні

коефіцієнта відхилення, що дозволяє оцінити поточний технічний стан електромагніту вимикача в процесі експлуатації.

– вперше розроблено математична модель, яка дозволяє визначати знос контактної системи, спричинений дуговими процесами та механічними перенапруженнями, при ввімкненні та вимкненні вакуумного вимикача, що дозволяє визначити ступінь наближення технічного стану контактної системи вимикача до аварійного.

– удосконалено математичну модель оцінки синхронної роботи контактної системи вимикача, що на відміну від існуючих, дозволяє розраховувати відхилення від допустимого значення часу ввімкнення вимикача та формувати сигнали керуючої дії для оперативного персоналу щодо регулювання рухомих контактів полюсів вимикача. Для кожного полюса формується інформативний сигнал на зближення або віддалення його рухомих контактів від нерухомих для забезпечення синхронної роботи контактної системи вимикача.

Практичне значення отриманих результатів:

- на основі математичної моделі порівняння вебер-амперних характеристик електромагнітного приводу розроблено алгоритм та мікропроцесорний пристрій, який має розширені функціональні можливості і застосування якого, на відміну від відомих, дозволяє діагностувати електромагнітний привід, а саме окремо обмотку ввімкнення та обмотку вимкнення вимикача;

- з використанням математичної моделі діагностування електромагнітного приводу розроблена структурна схема пристрою, застосування якої, на відміну від відомих, дозволяє здійснювати діагностування електромагнітного приводу в процесі роботи вакуумного вимикача;

- на основі математичних моделей для визначення неузгодження одночасності ввімкнення полюсів вимикача та визначення допустимого відхилення положення рухомих контактів полюсів вимикача розроблені структурні схеми пристроїв, які легко реалізуються на програмованих логічних інтегральних схемах;

- з використанням математичної моделі для визначення неузгодження одночасності ввімкнення полюсів вимикача запропоновано реалізацію пристрою визначення неузгодження одночасності ввімкнення полюсів вимикача із використанням ПЛІС на базі мікросхеми Altera марки MAXII EMP570T100C5. Програму розроблено в середовищі Quartus II 15.0. Така реалізація дозволяє суттєво підвищити швидкодію пристрою, зменшити його енергоспоживання та розміри.

- на основі математичної моделі виявлення зносу контактної системи розроблено мікропроцесорний пристрій та алгоритм роботи, який з високою достовірністю дозволяє визначати знос контактної системи, має розширені функціональні можливості і може легко інтегруватись у загальну систему діагностування комутаційного обладнання.

Використання одержаних результатів дало можливість розробити та впровадити підхід та математичну модель діагностування електромагнітного привода вакуумного вимикача на основі аналізу вебер-амперних характеристик та математичну модель оцінки синхронної роботи контактної системи вакуумного вимикача, що дозволяє визначати поточний технічний стан електромагніта та здійснити налаштування синхронної роботи полюсів вакуумного вимикача, що в свою чергу, підвищує надійність роботи вакуумного комутаційного апарату. Впровадження здійснено у СО "ВВЕМ" ПАТ "Вінницяобленерго" та в навчальний процес Вінницького національного технічного університету.

Підтвердженням впровадження результатів дисертаційної роботи є наявність відповідних актів (додаток А).

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні та розрахункові результати з формулюванням відповідних висновків отримані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать: [6] – метод діагностування електромагнітного привода вакуумного вимикача на основі аналізу вебер-амперних характеристик; [7] – структура схеми та алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою для діагностування електромагнітного привода вакуумного вимикача; [8] – розробка моделі

магнітної системи електромагнітного приводу вакуумного вимикача у програмі FEMM; [8] – математична модель виявлення зносу контактної системи при комутації вакуумного вимикача; [10] – розробка структури моделі виявлення зносу контактної системи при ввімкненні вакуумного вимикача; [11] – розробка блока розрахунку відносного квадрата відхилення; [12] – обґрунтування розрахунку вебер-амперної характеристики; [13] – опис дугових процесів при комутації вимикача.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення роботи та її результати доповідались, обговорювались та були схвалені на таких науково-технічних конференціях: III Міжнародній науково-практичній Інтернет-конференція «Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи», м. Вінниця, (м. Вінниця 2017 р.); XIV Міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах», (м. Вінниця, 2018 р.); XXIV Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика», (м. Одеса, 2019 р.); 5-й Міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (м. Вінниця, 2019 р.); щорічних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області на базі ВНТУ в 2015-2019 роках.

Публікації. Основний зміст роботи опублікований в 8 друкованих працях, з яких 5 входять до переліку наукових фахових видань України [6] – [10], 3 статті, що входять до НМБ Copernicus [6], [7] та [10]. Також опубліковано двоє тез доповідей за результатами виступів на міжнародних конференціях [12], [13]. За результатами дисертаційної роботи отримано один патент України на корисну модель [11].

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (144 найменувань) і 5 додатків. Основний зміст викладений на 114 сторінках друкованого тексту, містить 42 рисунки, 7 таблиць. Загальний обсяг роботи – 148 сторінок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] K. Niayesh, and M. Runde, *Power Switching Components: Theory, Applications and Future Trends*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2017.
- [2] P. Gill, *Electrical Power Equipment Maintenance and Testing. Second Edition*. Bosa Roca, United States: Taylor & Francis Inc, 2009.
- [3] R. Smeets, L. Sluis, M. Kapetanovic, D. Peelo, and A. Janssen, *Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems*. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd, 2015.
- [4] D. F. Peelo, *Current Interruption Transients Calculation*. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd, 2014.
- [5] S.G. Jeyaraj, and Y.Habtay, “Effective and efficient circuit breaker analysis”, in *IET Conference on reliability of transmission and distribution networks (RTDN 2011)*, London, 2011, pp. 157-162.
- [6] В. В. Грабко, та О. В. Дідушок, “Метод діагностування електромагнітного привода вакуумного вимикача на основі вебер-амперних характеристик”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 53 – 61, 2018. doi: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2018-141-6-53-61>
- [7] О. В. Дідушок, “Мікропроцесорний пристрій для діагностування електромагнітного привоу вакуумного вимикача”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 31 – 36, 2019. doi: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-147-6-31-36>
- [8] В. В. Грабко, О. В. Дідушок, “Дослідження роботи електромагнітного привоу вакуумного вимикача як об'єкта діагностування”, *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Проблеми автоматизованого електропривоу. Теорія і практика*, № 9 (1334), с. 57 – 62, 2019. doi: 10.20998/2079-8024.2019.9.11
- [9] В. В. Грабко, О. В. Дідушок, “Математична модель виявлення зносу контактної системи при комутації вакуумного вимикача”, *Вісник*

Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика, № 4 (1358), с. 12 – 19, 2020. doi: 10.20998/2079-8024.2020.4.01

- [10] В. В. Грабко, О. В. Дідушок, “Комп’ютерна модель виявлення зносу контактної системи вакуумного вимикача”, *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, Випуск 1 (49), с. 38 – 44, 2020. doi: 10.30929/2072-2052.2020.1.49.38-44
- [11] В. В. Грабко, В. В. Грабко, та О. В. Дідушок, “Пристрій для діагностування електричного привода високовольтного вимикача”, *МПК G07C 3/10 (2006.01). № 137512*, Жов. 25, 2019.
- [12] В. Грабко, та О. Дідушок, “Математична модель діагностування технічного стану електромагнітного приводу вакуумного вимикача”, на XIV Міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах», Вінниця, 2018, с.95.
- [13] О. Дідушок, “Математична модель діагностування технічного стану контактної системи вакуумного вимикача”, на 5-ій Міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах», Вінниця, 2019, с.90.
- [14] В. М. Кутін, М. О. Ілюхін, та М. В. Кутіна, *Діагностика електрообладнання: навчальний посібник*. Вінниця: ВНТУ, 2014.
- [15] В. Я. Кучер, *Основы технической диагностики и теории надежности*. Санкт-Петербург, Россия: СЗТУ, 2004.
- [16] В. М. Казак, *Основы контролю та технічної діагностики*. Київ, Україна: НАУ, 2013.
- [17] А. И. Хальясма, С. А. Дмитриев, С. Е. Кокин, и Д. А. Глушков, *Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций: учебное пособие*. Екатеринбург: Издательство Урал. Ун-та, 2015.
- [18] W. Hauschild, and E. Lemke, *High-Voltage Test and Measuring Techniques*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2019.

- [19] Г. М. Михеев, *Цифровая диагностика высоковольтного оборудования*. М.: Изд. дом “ДОДЭКА”, 2009.
- [20] ПУЭ-2017. *Правила устройства электроустановок*. Київ: Міненерговугілля України, 2017.
- [21] СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. *Норми випробування електрообладнання*. Харків: Мінпаливенерго України норми, 2009.
- [22] В. И. Григорьев и др., *Приборы и средства диагностики электрооборудования и измерений в системах электроснабжения: Справочное пособие*. М.: Колос. - 2006.
- [23] Е. Е. Привалов, *Диагностика электроэнергетического оборудования: учебное пособие*. М.: Директ-Медиа, 2015.
- [24] Е. Е. Привалов, *Диагностика электроэнергетического оборудования*. Ставрополь: Параграф, 2014.
- [25] В. М. Левин, *Диагностика и эксплуатация оборудования электрических сетей*. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011.
- [26] Г. М. Михеев, *Электростанции и электрические сети. Диагностика и контроль оборудования*. М.: Изд. дом “Додэка-XXI”, 2010.
- [27] В. Н. Кольцов, и Ю. М. Миронюк, “Современные мобильные комплексы для диагностики объектов электроснабжения”, *Контроль. Диагностика*. № 12. с. 39-43, 2014.
- [28] Н. И. Овчаренко, *Автоматизированный анализ состояния высоковольтного оборудования*. М.: Изд. Дом МЭИ, 2009.
- [29] В. А. Шахнин, *Методы и средства диагностики высоковольтного оборудования: учеб. пособие*. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2018
- [30] Обзор отечественных и импортных приборов для контроля высоковольтных выключателей, 2020. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://skbpribor.ru/info/reviews/5746>. Дата обращения: Июн. 1, 2020.
- [31] Прибор контроля высоковольтных выключателей ПКВ/М7, 2020. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://skbpribor.ru/instrument/pkv-m7/>. Дата обращения: Июн. 1, 2020.

- [32] Б. Г. Стогній, М. Ф. Сопель, О. І. Стасюк, В. В. Сорочинський, та О. С. Михайлевський “Інформаційно-діагностичний комплекс РЕГІНА”, *МПК G06F 11/00 (2014.01). № 88652*, Бер. 25, 2015.
- [33] “BDM” – система моніторинга и діагностики дефектов коммутационного обладнання, 2020. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://dimrus.ru/manuals/bdm.pdf>. Дата звернення: Іюн. 1, 2020.
- [34] О. Ф. Буткевич, та В. Л. Тутик, “Моніторинг та діагностування електроенергетичних об’єктів та систем України на базі комплексів “Регіна””, *Гідроенергетика України*, № 3, с. 46-49, 2010.
- [35] Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, О. Ф. Буткевич, М. Ф. Сопель, О. Б. Рибіна, та В. Л. Тутик, “Система збору та обробки інформації, що реєструється комплексами “Регіна-Ч””, *Праці Інституту електродинаміки НАН України*, Вип. 29, с. 35-46, 2011.
- [36] О. Є. Рубаненко, *Вдосконалення методів і засобів діагностування високовольтних вимикачів: монографія*. Вінниця: ВНТУ, 2012.
- [37] В. М. Кутін, О. Є. Рубаненко, та С. В. Мисенко, “Вдосконалення методів діагностування високовольтних вимикачів”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №1, с. 109-113, 2012.
- [38] В. М. Кутін, О. Є. Рубаненко, та С. В. Мисенко, “Досвід впровадження та забезпечення надійності елегазових вимикачів в умовах експлуатації”, *Наукові праці ВНТУ*, №1, с. 1-7, 2013.
- [39] В. М. Кутін, О. Є. Рубаненко, та С. В. Мисенко, “Визначення діагностичних параметрів оцінки технічного стану високовольтного вимикача”, *Енергетика: економіка, технології, екологія*, № 3, с. 33-39, 2014.
- [40] В. М. Кутін, О. Є. Рубаненко, та С. В. Мисенко, “Визначення технічного стану елегазових високовольтних вимикачів в умовах експлуатації”, *Вісник НТУ «ХПІ»*, №60 (1102), с. 57-68, 2014.
- [41] О. Є. Рубаненко, Ю. Г. Ведміцький, та С. В. Мисенко, “Вдосконалення методів визначення технічного стану

- високовольтних вимикачів”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 78-86, 2016.
- [42] Є. І. Удод, Р. М. Горбей, та В. Ф. Чернов, *Діагностування електроустановок 0,4–750 кВ засобами інфрачервоної техніки*. К.: “КВЦ”, 2007.
- [43] В. М. Кутін, О. О. Шпачук, М. В. Нікітчук, та В. М. Світко, “Автоматизація аналізу теплового стану електрообладнання”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 51-56, 2018.
- [44] В. В. Грабко, та В. В. Грабко, “Пристрій для безконтактного вимірювання температури”, *МПК G 01 K 13 / 00. № 19737*, Груд. 15, 2006.
- [45] В. В. Грабко, та В. В. Грабко, “Пристрій для безконтактного вимірювання температури”, *МПК G 01 K 13 / 00. № 20999*, Лют. 15, 2007.
- [46] В. П. Вавилов, и А. Н. Александров, *Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике*. М.: Энергопрогресс, 2014.
- [47] С. А. Бажанов, *Инфракрасная: диагностика электрооборудования РУ*. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2000.
- [48] Е. Е. Привалов, *Диагностика и тепловизионный контроль электроэнергетического оборудования: учебное пособие*. Ставрополь: Изд-во ПАРАГРАФ, 2014.
- [49] Д. Ю. Уразов, “О преимуществах тепловизионного метода анализа работы электрооборудования”, *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. № 3 (53), с. 51-53, 2012.
- [50] А. Ю. Хренников, и М. Г. Сидоренко, “Тепловизионное обследование электрооборудования подстанций и промышленных предприятий и его экономическая эффективность”, *Рынок Электротехники*, № 2 (14), с. 96-100, 2009.

- [51] H. Tianshu, L. Bo, W. Yaowei, L. Tianci, S. Yuanlin, S. Yang, H. Yang, H. Wenfeng, L. Chenyang, and H. Lin, "Research and application of infrared leak detection technology for SF6 equipment", in *2018 6th International Conference on Machinery, Materials and Computing Technology (ICMMCT 2018)*, Jinan, 2018, pp. 189-193.
- [52] Y. Kang, Y. Li, T. Wang, L. Guo, G. Yang and N. Zhang, "Detection and analysis of internal abnormal heating for high voltage switchgear based on infrared thermometric technology", in *2017 2nd International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*, Chengdu, 2017, pp. 199-203.
- [53] B. A. Freer, S. P. Iannce, J. M. Manahan, R. Rothenberger, and J. Bonaccio, "Infrared sensor array circuit breaker monitoring", *U.S Patent Appl. US10371576B2*, Aug. 6, 2019.
- [54] M. Landry, F. Leonard, C. Landry, R. Beauchemin, O. Turcotte and F. Brikci, "An Improved Vibration Analysis Algorithm as a Diagnostic Tool for Detecting Mechanical Anomalies on Power Circuit Breakers" in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 4, 2008, pp. 1986-1994.
- [55] J. V. Anjaneyulu, and G. K. Mohan Rao, "Analysis and Vibration Behavior of a Medium Voltage Spring Operated Switch Gear Mechanism used for Circuit Breaker" in *16th National Conference on Machines and Mechanisms (iNaCoMM2013)*, IT Roorkee, India, 2013, pp. 972-979.
- [56] О. Є. Рубаненко, С. В. Мисенко, та О. О. Рубаненко, "Вплив вібрації на подальшу роботу високовольтних вимикачів", *Вібрації в техніці та технологіях*, № 1 (69), с. 72-77, 2013.
- [57] П. М. Сви, *Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения*. М.: Энергоатомиздат, 1992.
- [58] А. И. Ящура, *Система технического обслуживания и ремонта общепромышленного оборудования: справочник*. М.: Энас, 2012.
- [59] С. И. Чичев, В. Ф. Калинин, и Е. И. Глинкин, *Система контроля и управления электротехническим оборудованием подстанций*. М.: Спектр, 2011.

- [60] Стабилизированный источник постоянного тока РИП-2. Руководство по эксплуатации, 2020. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.elizpribor.ru/files/products/rip-2.pdf>. Дата обращения: Июн. 1, 2020.
- [61] B10E AC/DC Voltage Power Supply, 2020. [Online]. Available: http://www.stevoelectric.be/user/image/megger-b10e_ds_en_v03.pdf. Accessed on: June 1, 2020.
- [62] A. Gadyuchko, and E. Kallenbach, “Magnetische Messung - Neue Wege der Funktionsprüfung bei der Herstellung von Magnetaktoren”, in *Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik*, Würzburg, 2010, pp. 59-64.
- [63] M. Ruderman, and A. Gadyuchko, “Phenomenological Modeling and Measurement of Proportional Solenoid with Stroke-dependent Magnetic Hysteresis Characteristics”, *IEEE International Conference on Mechatronics*, Takamatsu, 2013, pp. 180-185.
- [64] Д. В. Шайхутдинов, С. Г. Январев, К. М. Широков, и Р. И. Леухин, “Метод технической диагностики межвитковых замыканий электромагнитных устройствах на базе их вебер-амперных характеристик”, *Современные наукоемкие технологии*, № 8, с. 69–71, 2014.
- [65] Д. В. Шайхутдинов, С. Г. Январев, К. М. Широков, и Ш. В. Ахмедов, “Метод технической диагностики нарушений геометрических параметров магнитной системы электромагнитных устройств на базе их вебер-амперных характеристик”, *Международный журнал экспериментального образования*, № 8, с. 84–86, 2014.
- [66] К. М. Широков, “Алгоритм определения магнитных характеристик электротехнических изделий”, *Известия вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки.*, № 1, с. 70-73, 2013.
- [67] Е. В. Комаров и др., *Испытание магнитных материалов и систем*. М.: Энергоатомиздат, 1984.
- [68] Н. И. Горбатенко, М. В. Ланкин, и Н. Д. Наракидзе, “Прибор для определения магнитных характеристик образцов и деталей из

- магнитомягких материалов”, на *Металлургия. Машиностроение. Станкоинструмент – 2006*, Ростов-на-Дону, 2006, с. 77- 80.
- [69] Н. И. Горбатенко, М. В. Ланкин, Д. В. Шайхутдинов, и К. М. Широков, “Устройство для измерения характеристик магнитомягких материалов”, *МПК G01R33/12. № 20091121158/28*, Май 27, 2010.
- [70] В. Г. Сергеев, и А.Я. Шихин, *Магнитоизмерительные приборы и установки*. М.: Энергоатомиздат, 1982.
- [71] U. Glet, “Verfahren und Vorrichtung zum Ermitteln von magnetischen Kenngrößen,” *Patent DE 102005011227A1*, Br. 11, 2005.
- [72] J. Baumbach, E. Kallenbach, U. Kucera, and K. Neumann, “MagHyst®–modular — ein universelles Gerät zur Messung magnetischer Größen und Kennlinien an Materialien, Halbzeugen und Magnetaktoren,”. *Messeartikel für die Sensor+Test*, 2009.
- [73] А. М. Ланкин, и М. В. Ланкин, “Метод измерения вебер-амперной характеристики электротехнических устройств”, *Современные проблемы науки и образования*, № 1, с. 246-258, 2014.
- [74] А. М. Ланкин, М. В. Ланкин, В. В. Гречихин, и Д. В. Шайхутдинов, “Определение гистерезисных магнитных характеристик методом решения обратной задачи гармонического баланса”, *Фундаментальные исследования*, № 8 (часть 2), с. 303-306, 2015.
- [75] А. М. Гречко, “Экспериментальное исследование влияния вихревых токов в сердечнике магнитопровода на динамические характеристики электромагнитного привода”, *Вісник НТУ «ХПИ»*, № 49 (955), с. 9-17, 2012.
- [76] Б. В. Клименко, и А. М. Гречко, “Электромагнитный привод с двухпозиционной магнитной защелкой для вакуумного выключателя среднего напряжения”, *Електротехніка і Електромеханіка*, № 6, с. 40-43, 2007.
- [77] Е. И. Байда, “Расчет динамики двухпозиционного электромагнита постоянного тока с магнитной защелкой”, *Електротехніка і Електромеханіка*, № 4, с. 10-12, 2010.

- [78] Е. И. Байда, “Динамика нечеткого срабатывания бистабильного электромагнитного актуатора на базе высококоэрцитивных постоянных магнитов”, *Електротехніка і Електромеханіка*, № 5, с. 18-20, 2012.
- [79] R. Alexandru, M. Mihai, V. N. Iosif, and C. Radu, “New solution of linear DC actuator with additional permanent magnets: Working principle, design and testing”, *Revue Roumaine des Sciences Techniques – Serie Électrotechnique et Énergétique*, no. 62, pp. 3-7, 2017.
- [80] Y. Yong-Min, K. Dae-Kyung, and K. Byung-II, “Optimal Design of a Permanent Magnetic Actuator for Vacuum Circuit Breaker using FEM”, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, no. 1, pp. 92-97, 2006.
- [81] W. A. Zhenxing, S. Liqiong, H. Sainan, G. Yingsan, and L. Zhiyuan, “Permanent Magnetic Actuator for 126 kV Vacuum Circuit Breakers”, *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, vol. 50, no. 3, pp. 129-135, 2014.
- [82] А. В. Панов, В. І. Паньків, М. Ф. Сопель, Б. С. Стогній та Є. М. Танкевич, “Актуальні питання моніторингу і технічного обслуговування високовольтних вимикачів”, *Технічна електродинаміка*, № 2, с. 75-85, 2018. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.02.075>
- [83] А. В. Панов, В. І. Паньків, М. Ф. Сопель, Б. С. Стогній та Є. М. Танкевич, “Вдосконалення моніторингу технічного стану механічних елементів високовольтних вимикачів”, *Праці ІЕД НАНУ*, Вип. 51, с. 99-109, 2018. doi: <https://doi.org/10.15407/publishing2018.51.099>
- [84] Y. Fan, and H. Xiaoquang, “Research on the mechanical state parameter extraction method of high voltage circuit breakers”, in *10th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, Beijing, China, 2012, pp. 1062-1066.
- [85] М.-Н. Kim, А. Smajkic, М. Kapetanovic, and М. Muratovic, “Influence of contact erosion on the state of SF6 gas in interrupted chambers of HV

- SF6 circuit breakers”, in *2014 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference*, Santa Fe, New Mexico, 2014, pp. 466-469.
- [86] I. Manea, C. Chiciu, F. Balasiu, and N. Tulici, “Complex method to diagnose the technical state of the medium and high voltage circuit breakers after short-circuit events”, in *16th International conference and exhibition on electricity distribution*. Amsterdam, Netherlands, 2001, pp. 1-5.
- [87] F. Mei, K. Zhu, J. Zheng, and M. Zhu, “Design of high voltage vacuum circuit breaker's on-line monitoring and fault diagnosis system”, in *2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference*, Xi`an, China, 2016, pp. 408-413.
- [88] L. Wenhua, Y. Xiaoquang, L. Jun, Y. Man, and Z. Sheng, “Study on the comprehensive test technology of circuit breaker mechanical life and its accessories based on virtual instrument”, in *26th International Conference on Electrical Contacts*, Beijing, China, 2012. pp. 465-470. doi: <http://doi.org/10.1049/cp.2012.0698>
- [89] Е. И. Байда, “Мультифизическая модель расчета граничного тока сваривания контактов вакуумного выключателя”, *Вісник НТУ «ХПИ»*, № 41, с. 3-9, 2014.
- [90] А. А. Перцев, В. П. Белотелов, и Л. А. Рыльская, “Способ испытаний вакуумных выключателей на стойкость при сквозных токах короткого замыкания”, *МПК G01R 31/327 (2006.01)*. № 2269140, Янв. 1, 2006.
- [91] В. С. Деева, и С. М. Слободян, “Модель коагуляции контакта вакуумного выключателя”, *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*, № 4, с. 39-42, 2013.
- [92] О. А. Аношин, П. В. Петров, и С. И. Малаховский, “О возможности использования силы удержания привода как критерия оценки основных характеристик вакуумных выключателей”, *Электрические сети и системы*, № 6, с. 10-12, 2005.

- [93] X. Wang, M. Rong, Y. Wu, F. Yang, and S. Jia, “Analyses of mechanical characteristics of vacuum circuit breaker during the closing process taking electrodynamic force into account”, *IET Sci. Meas. Technol.*, no. 6. pp. 323-328, 2007.
- [94] M. Rong, X. Wang, W. Yang, and S. Jia, “Theoretical and experimental analyses of the mechanical characteristics of a medium–voltage circuit breaker”, *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.* vol. 152, no. 2, pp. 45–49, 2005.
- [95] J. Kang, S. Choi, D. En, H. Kim, and H. Jung, “Development and Analysis of New Type of Switchgear for High Voltage Gas Circuit Breaker”, in *Proceedings of the 6th WSEAS/IASME Int. Conf. on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines*, Tenerife, Spain, 2006, pp. 80-84.
- [96] X. Zhan, X. Liu, L. Li, G. Zhu, and P. Li, “Experimental research on arc characteristics for a 40.5-kV vacuum circuit breaker”, in *The 14th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2018)*. J., Eng., 2018, pp. 2777-2780.
- [97] A. Soloot, A. Gholami, and K. Niayesh, “Study on Post Arc Current and Transient Recovery Voltage in Vacuum Circuit Breaker”, *International Review of Modeling and Simulation*, vol. 4, no. 2, pp. 1-11, 2011.
- [98] Г. М. Михеев, *Цифровая диагностика высоковольтного оборудования*. М.: Изд. дом “ДОДЭКА-XXI”, 2008.
- [99] Ю. А. Федоров, Г. М. Михеев, и В. М. Шевцов, “Способ контроля характеристик высоковольтных выключателей и устройство для его осуществления”, *МПК G01R 31/327 (2006.01)*. № 2330302, Июнь 27, 2008.
- [100] Б. С. Стогній, М. Ф. Сопель, Л. Д. Третьякова, Є. М. Танкевич, А. В. Панов, та В. І. Паньків, “Визначення комутаційного ресурсу високовольтних вимикачів”, *Технічна електродинаміка*, № 1, с. 71-80, 2017.
- [101] И. С. Минкина, и А. А. Романов, “Алгоритм оценки остаточного ресурса выключателя”, *Электрические станции*, № 12, с. 58-62, 2004.

- [102] М. Ф. Сопель, В. Л. Тутик, А. В. Панов, та Ю.В. Пилипенко, “До визначення залишкового ресурсу елегазових високовольтних вимикачів 750 кВ”, *Праці інституту електродинаміки Національної академії наук України. Збірник наукових праць*, №1(16), с.136-139, 2007.
- [103] В. В. Грабко, та Б. І. Мокін, *Моделі та системи технічної діагностики високовольтних вимикачів*. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999.
- [104] В. В. Грабко, “До питання побудови ресурсних характеристик повітряних високовольтних вимикачів”, *Вісник ВПІ*, № 4, с. 61-65, 2001.
- [105] В. В. Грабко, “Синтез структури інформаційно-вимірювальної системи для діагностики групи високовольтних вимикачів”, *Наукові вісті Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут»*, № 3, с. 22-28, 2001.
- [106] В. В. Грабко, В. В. Грабко, А. Л. Поліщук, та І. А. Співак “Пристрій для контролю ресурсу комутаційних апаратів”, *МПК G 07 C 3 / 10. № 104059*, Січ. 1, 2016.
- [107] В. В. Грабко, В. В. Грабко, А. Л. Поліщук, та І. А. Співак, “Пристрій для контролю ресурсу повітряних високовольтних вимикачів ”, *МПК G 07 C 3 / 10. № 104057*, Січ. 1, 2016.
- [108] В. В. Грабко, В. В. Грабко, А. Л. Поліщук, та І. А. Співак, “Пристрій для контролю ресурсу групи повітряних високовольтних вимикачів”, *МПК G 07 C 3 / 10. № 104055*, Січ. 1, 2016.
- [109] L. Muyl, H. Jian, and H. Xiaoguang, “Insulative condition monitoring of high voltage circuit breaker”, in *2010 the 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Taichung, Taiwan, 2010, pp. 94-98.
- [110] A. A. Razi-Kazemi, M. Vakilian, K.Niayesh, and M. Lehtonen, “Data mining of online diagnosed waveforms for probcondition assessment of

- SF6 circuit”, *IEEE Transaction on power delivery*, vol. 30, no. 3, pp. 1354-1362, 2015.
- [111] M. S. Silva, J. A. Jardini, and L.C.Margrini, “On-line condition monitoring system for in-service circuit breaker”, in *Cired 18th International conference on electricity distribution*, Turin, 2005, pp. 1-7.
- [112] X. Jin, Z. LiuJun, H. Xiaoquang, L. Liang, and Z. Lei, “Development of on-line monitoring system for SF6 circuit breaker”, in *2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Beijing, China, 2011, pp. 537-541.
- [113] T. Suwanasri, S. Wattanawongpitak, T. Homkeanchan, and C. Suwanasri “Failure statistics and inventory management or high voltage circuit breaker using statistical distribution techniques”, in *2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Bali, Indonesia, 2012, pp. 513-516.
- [114] Е. В. Комаров, А. Д. Покровский, В. Г Сергеев, и А. Я. Шихин, *Испытание магнитных материалов и систем* М.: Энергоатомиздат, 1984.
- [115] А. Г. Сливинская, *Электромагниты и постоянные магниты*. М.: Энергия, 1972.
- [116] В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, та В. В. Грабко, *Основи метрології та електричних вимірювань: підручник*. Вінниця : ВНТУ, 2012.
- [117] Г. Н. Александров, Г. С.Борисов, и Г. С. Каплан, *Теория электрических аппаратов: Учебник для вузов*. СПб.: Издательство СПб ГТУ, 2000.
- [118] А. А. Перцев, и Л. А. Рыльская, *Вакуумные дугогасительные камеры. Сборник статей сотрудников ВЭИ*. Рязань: издательство «Рязанский издательство», 2008.
- [119] М. А. Любчик, *Силовые электромагниты аппаратов и устройств автоматики постоянного тока (Расчёт и элементы проектирования)*. М.: Энергия, 1968.

- [120] А. А. Чунихин, *Электрические аппараты*. М.: Энергоатомиздат, 1988.
- [121] А. А. Базавлук, А. Р. Бакиров, и Д. А. Шкитов, “Исследование перенапряжений при коммутациях вакуумных выключателей”, *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, № S4, с. 265-279, 2011.
- [122] Высоковольтный союз РЗВА, *Выключатели вакуумные серии ВР Техническая информация НКАИ.670049.011*. Ровно, Украина: Высоковольтный союз РЗВА, 2013.
- [123] 32-bit Atmel AVR Microcontroller, 2020. [Online]. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/doc32099.pdf>. Accessed on: June 1, 2020.
- [124] Сравнительный анализ применения ПЛИС и микропроцессоров при разработке информационно-управляющих систем, важных для безопасности АЭС, Научно-технический отчет. НАУ им. Н.Е. Жуковского ХАИ, НТСКБ Полисвит, ИПМЭ им. Г.Е. Пухова НАН Украины, ИПММС НАН Украины, 2005.
- [125] А.В. Попович, «ПЛИС Actel – платформа для «систем на кристалле» бортовой аппаратуры», *Электроника, Наука, Технология, Бизнес*, № 4, с. 34-37, 2004.
- [126] Altera corporation MAXII EPM570T100C5, 2020. [Online]. Available: <http://datasheet.buhieen.net/EPM570T100C5N.pdf>. Accessed on: June 1, 2020.
- [127] CC3200 SimpleLink Wi-Fi Wireless MCU Technical Reference Manual (Rev. D), 2020. [Online]. Available: http://www.ti.com/lit/ug/swru367d/swru367d.pdf?ts=1591632539362&ref_url=https://www.google.com/. Accessed on: June 1, 2020.
- [128] Б. Я. Советов, В. В.Цехановский, и В. Д. Чертовской, *Интеллектуальные системы и технологии: учебник*. М.: Академия, 2013.

- [129] О. Б. Буль, *Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Магнитные цепи, поля и программа FEMM*. М.: Академия, 2005.
- [130] M. Augustyniak, and Z. Usarek, “Finite Element Method Applied in Electromagnetic NDTE: A Review”, *Journal of Nondestructive Evaluation*, no. 35, 2016 doi: <https://doi.org/10.1007/s10921-016-0356-6>
- [131] Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User’s Manual [Online]. Available: <http://www.femm.info/wiki/Documentation/>.
- [132] Е.И.Байда, *Расчет электромагнитных и тепловых полей с помощью программы FEMM: Учебно-методическое пособие*. Х.: НТУ «ХПИ», 2015.
- [133] В. П. Дьяконов, *MATLAB. Полный самоучитель*. М.: ДМК Пресс, 2012.
- [134] В. И. Раховский, *Физические основы коммутации электрического тока в вакууме*. М.: Наука. Главная редакция физико–математической литературы, 1970.
- [135] J. Budzisz, “The model of a vacuum circuit breaker for switching on capacitor bank”, *Przeegląd Elektrotechniczny*, no. 2, pp. 140–145, 2019. doi: 10.15199/48.2019.02.31
- [136] N. Mahajan, K. Patil, and S. Shembekar, “Electric Arc model for High Voltage Circuit Breakers Based on MATLAB/SIMULINK”, *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENCE, SPIRITUALITY, BUSINESS AND TECHNOLOGY (IJSSBT)*, vol. 1, no. 2, pp. 15-21, 2013.
- [137] S. Pasumpon, R. Saravanan, A. Maruthu, A. Saravanan, and M. Muneeswaran, “Evaluation of High-Voltage Circuit Breaker Performance with Modified Schavemaker Arc Model”, *International Journal of Digital Communication and Networks (IJDCN)*. vol. 3, no. 2, pp. 18-23, 2014.
- [138] N. Markovic, S. Bjelic, J. Zivanic, and U. Jaksic, “Numerical simulation and analytical model of electrical arc impedance in the transient processes”, *Przeegląd Elektrotechniczny*, vol. 89, no. 2a, pp. 113–117, 2013.

- [139] Г. Н. Александров, Г. С. Борисов, Г. С. Каплан, *Теория электрических аппаратов: Учебник для вузов*. СПб.: Издательство СПб ГТУ, 2000.
- [140] В. О. Поджаренко, П. І. Кулаков, П. І. Ігнатенко, та О. П. Войтович, *Основи метрології та вимірювальної техніки. Навчальний посібник*. Вінниця: ВНТУ, 2006.
- [141] В. С. Королюк, Н. И. Портенко, А. В. Скороход, и А. Ф. Турбин, “Справочник по теории вероятностей и математической статистике”, М.: Наука, 1985.
- [142] Е. С. Венцель, и Л. А. Овчаров, *Теория случайных процессов и ее инженерные приложения*. М.: Наука, 1991.
- [143] Б. І. Мокін, та О. Б. Мокін, *Методологія та організація наукових досліджень : навчальний посібник*. Вінниця : ВНТУ, 2015.
- [144] М. В. Костерев, В. В. Літвінов, та К. А. Кільова “Оцінка впливу технічного стану обладнання електроенергетичної системи на імовірність його відмови на інтервалі часу”, *Вісник НТУ «ХП»*. Серія механіко-технологічні системи та комплекси, № 33(1255), с. 85-93, 2017.