

Інститут електродинаміки
Національна академія наук України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ПАНОВ АНАТОЛІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 681.518.22 : 621.316.57

ДИСЕРТАЦІЯ

Методи і система моніторингу елегазових вимикачів на
напругу 330-750 кВ

Спеціальність 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

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

А. В. Панов
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник

Стогній Борис Сергійович
доктор технічних наук, професор,
академік НАН України

Київ – 2019

АНОТАЦІЯ

Панов А. В. Методи і система моніторингу елегазових вимикачів на напругу 330-750 кВ. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.14.02. «Електричні станції, мережі і системи». – Інститут електродинаміки НАН України, Київ, 2019.

Дисертація присвячена розв'язанню важливого для електроенергетичної галузі країни наукового завдання розвитку науково-технічних основ побудови системи моніторингу високовольтних елегазових вимикачів на напругу 750 кВ шляхом розроблення нових методів моніторингу параметрів і технічного стану елегазових вимикачів та вдосконалення моделі оцінювання їх залишкового комутаційного ресурсу, що забезпечує підвищення надійності, безпеки та ефективності експлуатації цих апаратів і електроенергетичних систем в цілому.

В роботі на основі огляду та аналізу закордонних і вітчизняних публікацій в галузі функціонування, технічного обслуговування та моніторингу елегазових вимикачів сформовано повний перелік актуальних питань моніторингу їх параметрів і технічного стану.

Виконано аналіз статистики пошкоджень і відмов елегазових високовольтних вимикачів, їх наслідків економічного та безпекового характеру, а також ефективності використовуваних в експлуатації методів та засобів технічного діагностування та моніторингу цих апаратів.

Показано, що побудова систем онлайн моніторингу є найважливішою умовою впровадження прогресивних систем технічного обслуговування цього надто відповідального електричного обладнання енергосистем і запорукою його надійного та ефективного функціонування.

Визначено актуальні задачі побудови системи моніторингу елегазових вимикачів, а саме: вибір контрольованих параметрів і характеристик вимикача та відповідних їм показників моніторингу; розробка, вибір і наукове обґрунтування ефективних методів обробки та аналізу сигналів різного роду

давачів інформації про параметри і технічний стан вимикача; реалізація системного, комплексного підходу до побудови системи моніторингу, охоплення нею максимальної кількості елементів вимикача і усіх вимикачів підстанції та розширення функціональних можливостей систем.

На основі проведеного аналізу вітчизняної нормативної бази обґрунтовано необхідність оновлення та гармонізації нормативного забезпечення високовольтних вимикачів з міжнародними стандартами; розроблення відповідно до вимог чинних галузевих документів нормативного забезпечення моніторингу вимикачів; актуальність і значимість впровадження в електроенергетичній галузі міжнародних стандартів щодо вибору систем моніторингу вимикачів, дослідження, аналізу та звітності про їх відмови. Впровадження зазначених нормативних документів сприятиме успішній реалізації технічної політики в галузі, дасть змогу вдосконалити моніторинг і підвищити керованість електроенергетичних об'єктів і систем.

В результаті розгляду структури, фізичних процесів і функціонування кіл керування та приводного механізму елегазового вимикача оцінено можливості окремих складових (етапів) процесів його вимкнення/вмикання і відповідних їм параметрів і характеристик в отриманні моніторингових даних про технічний стан вимикача.

Показано, що математична обробка одержуваних за допомогою різного роду давачів інформації синхронізованих сигналів, що характеризують комутаційні операції вимикача, а саме: сигналів ініціації розмикання та замикання основних контактів і кривої їх переміщення, сигналів про положення додаткових контактів, напруги батареї живлення вторинних кіл підстанції та струмів котушок вимикання/вмикання дозволяє отримувати значний перелік корисної інформації про технічний стан вимикача у вигляді показників моніторингу, подальша обробка яких дозволяє не тільки виявляти можливі пошкодження окремих частин вимикача, але й заздалегідь прогнозувати можливі відмови без виведення його з експлуатації.

Розроблено метод неперервного комплексного онлайн моніторингу технічного стану механічних елементів елегазових вимикачів, реалізація якого

на відміну від відомих методів, забезпечує одержання значно більшої кількості важливих показників моніторингу, які стосуються практично усіх механічних елементів кожного з усіх вимикачів підстанції, що підвищує достовірність результатів моніторингу вимикача в цілому.

Виконано комплекс досліджень, спрямованих на підвищення точності оцінювання залишкового комутаційного ресурсу елегазового вимикача. За результатами порівняння реальної ресурсної характеристики вимикача, яка задана табличними даними та її апроксимаціями різними способами: поліномом третього степеню з визначенням коефіцієнтів апроксимації чисельним методом розв'язання системи лінійних рівнянь; поліномом третього степеню з визначенням коефіцієнтів апроксимації за допомогою методу найменших квадратів та інтерполяційним кубічним сплайном для випадків, коли ресурсна характеристика задана 4-ма, 6-ма та 8-ма точками встановлено, що її точна апроксимація можлива лише за умов, якщо вона буде виконуватися інтерполяційним кубічним сплайном, а ресурсна характеристика буде задана не менш, ніж вісьмома рівномірно розміщеними вздовж всієї ресурсної характеристики точками.

За результатами виконаних з використанням різних формул розрахунків діючого значення ряду можливих і найбільш характерних за складом і формою струмів вимкнення, включно і струмів короткого замикання, за вибірками їх миттєвих значень без урахування похибок трансформаторів струму і з їх урахуванням доведена правомірність застосування для таких розрахунків класичної моделі визначення середньо-квадратичного значення струму та дискретних перетворень Фур'є як для симетричних і квазістаціонарних струмів усталених режимів, так і несиметричних струмів перехідних режимів електроенергетичних систем. Показано актуальність розв'язання задачі пошуку точного методу визначення діючого значення нестационарних струмів, якими є приведені до первинної обмотки вторинні струми трансформатора струму у випадку насичення магнітопроводу трансформатора струму аперіодичною складовою струму короткого замикання.

Виходячи з одержаних результатів вдосконалено відому модель оцінювання залишкового комутаційного ресурсу елегазового вимикача шляхом використання більш точніших способу представлення ресурсної характеристики і формули визначення діючого значення струму вимкнення та урахування тривалості горіння дуги і кількості теплоти, яку вона виділяє при вимкненні струмів усталених та перехідних режимів енергосистем. Це забезпечує підвищення точності визначення комутаційного ресурсу, запобігання невиправданого передчасного виведення вимикача з експлуатації для ремонту і заміни його контактної системи, підвищення надійності та економічності експлуатації елегазових вимикачів.

За розробленою моделлю виконано розрахунки тривалості життєвого циклу елегазового вимикача типу HPL 362 B1 фірми ABB, що складається з 24-х відключень струмів нормальних режимів з випадковими діючими значеннями в діапазоні 20-120% від номінального струму та 6-ти відключень струму короткого замикання з випадковими значеннями амплітуд (кратністю 1.2-10 номінального струму), сталими часу 0.05-0.3 с і фазами виникнення пошкодження з діапазону 0-180° за умов неврахування похибок трансформатора струму і з їх урахуванням.

Одержано залежності значення комутаційного ресурсу від точності апроксимації ресурсної характеристики, точності вимірювання струму вимкнення і точності визначення його діючого значення. Показано, що залишковий комутаційний ресурс вимикача після виконання ним 30 циклів відключення, якщо не враховуються похибки трансформатора струму, є на 8.5% є більшим його фактичного значення.

Виходячи з результатів розрахунків зроблено висновок, що для підвищення точності оцінювання комутаційного ресурсу вимикача за умов відключення ним струмів короткого замикання, що викликають насичення магнітопроводу трансформатора струму, необхідно підвищувати точність вимірювання таких струмів або ж вносити поправки до комутаційного ресурсу, що враховують похибки трансформатора струму.

Визначені і обґрунтовані показники та фактори моніторингу елегазових вимикачів напругою 750 кВ, що стосуються параметрів та стану їх газової суміші. Розроблено метод моніторингового контролю параметрів газової суміші елегазових вимикачів на напругу 750 кВ, що полягає у вимірюванні та фіксації тиску і температури газової суміші в дугогасильній камері до і після кожної комутаційної операції, фіксації часу розмикання головних контактів і розрахунку часу горіння дуги кожного полюса вимикача, порівнянні отриманих даних з уставками контролю і формуванні на цій основі висновку про стан газової суміші в дугогасних камерах вимикача.

Сформульовано вимоги до системи моніторингу, подано перелік та опис виконуваних нею функцій, перелік контрольованих параметрів і технічних характеристик вимикача, наведено структурні схеми організації моніторингу одного вимикача і усіх вимикачів підстанції, подано інформацію про склад програмного забезпечення системи та призначення його окремих складових, розглянуто роботу функціональних модулів системи.

Результати роботи впроваджено у виробництво системи моніторингу елегазових вимикачів на МПП «АНІГЕР». Система інваріантна щодо типів вимикачів та їх фірм-виробників, адаптована до використання сигналів будь-яких датчиків, підтримує різні протоколи передачі даних, а також забезпечує можливість інтеграції в інші системи автоматизації електроенергетичних об'єктів, включно і автоматизовану систему керування технологічними процесами.

Використання системи моніторингу дозволяє оперативному та ремонтно-експлуатаційному персоналу підстанцій отримувати достовірну інформацію про основні технологічні параметри вимикачів та їх технічний стан і на цій основі приймати обґрунтовані рішення про необхідність проведення ремонтно-профілактичних робіт.

Широке впровадження розробленої системи (на усіх 9-ти підстанціях напругою 750 кВ ОЕС України, якими охоплено більш як 160 вимикачів) практично виключає можливість відмов у спрацюванні вимикачів або їх вихід з

ладу, сприяє підвищенню надійності та ефективності функціонування електроенергетичного комплексу країни в цілому.

Ключові слова: елегазовий вимикач, онлайн моніторинг, нормативна база, методи, комутаційний ресурс, механічні елементи, система.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Панов А. В., Паньків В. І., Сопель М. Ф., Стогній Б. С., Танкевич Є. М. Актуальні питання моніторингу і технічного обслуговування високовольтних вимикачів. *Технічна електродинаміка*. 2018. №2. С.75-85.

2. Сопель М. Ф., Панов А. В., Паньків В. І. Танкевич Є. М. Нормативне забезпечення моніторингу високовольтних вимикачів електроенергетичних систем. *Праці ІЕД НАНУ*. 2018. Вип. 49. С. 17-27.

3. Панов А. В., Паньків В. І., Сопель М. Ф., Танкевич Є. М. Вдосконалення моніторингу технічного стану механічних елементів високовольтних вимикачів. *Праці ІЕД НАНУ*. 2018. Вип. 51. С. 99-109.

4. Стогній Б. С., Сопель М. Ф., Третьякова Л. Д., Танкевич Є.М., Панов А. В., Паньків В. І. Визначення комутаційного ресурсу високовольтних вимикачів. *Технічна електродинаміка*. 2017. №1. С. 71-80.

5. Stognii B., Voitov D. Panov. A. Automated system for gathering data from IEDs - implementation specifics in Ukrainian power engineering : Cigre session, France 22-26 August 2016. B5-113.

6. Панов А. В., Войтов Д. В., Нестриженний М. О. Деякі практичні питання моніторингу елегазових вимикачів. *Праці ІЕД НАНУ*. 2013. Вип. 36. С. 71-74.

7. Приступчук А., Мовчан С., Панов А. Автоматизированные системы управления MICROSCADA PRO с применением удаленных терминалов RTU как надежное решение для всех уровней автоматизации. Электрические сети и системы. 2012. №3. С. 95-105.

8. Максимчук В. Ф., Стогній Б. С., Сопель М. Ф., Тутик В. Л., Михайлевський О. С., Панов А. В. Мікропроцесорна система моніторингу і

прогнозу залишкового ресурсу елегазових високовольтних вимикачів: пат. 73398 України: МПК G 07 C 3/10. № 2012 02069; заявл. 23.02.12; опубл. 25.09.2012, Бюл. №18.

9. Тутик В. Л., Максимчук В. Л., Панов А. В., Камінський Р. Б., Тарасевич П. Й., Невечеря І. В. Засоби моніторингу на електроенергетичних об'єктах. *Праці ІЕД НАНУ. Спец випуск*. 2011. С. 157-162.

10. Сопель М. Ф., Тутик В. Л., Панов А. В., Ущатовський К. В. Аналіз типових схем з'єднань мікропроцесорних пристроїв в станційній мережі за стандартом ІЕС61850. *Технічна електродинаміка*. 2008. № 1. С. 42-46.

11. Сопель М. Ф., Тутик В. Л., Панов А. В., Пилипенко Ю. В. До визначення залишкового ресурсу елегазових високовольтних вимикачів 750 кВ. *Праці ІЕД НАНУ*. 2007. Вип. 16. С. 136-139.

12. Стогній Б. С. Сопель М. Ф., Тутик В. Л., Панов А. В. Методика контролю параметрів газової суміші в елегазових вимикачах 750 кВ. Зб. наук. ст. за результатами, отриманими в 2004-2006 рр. Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин». К., 2006. С. 269-272.

13. Сопель М. Ф., Тутик В. Л., Панов А. В., Пилипенко Ю. В. Робочі алгоритми системи моніторингу режимів роботи електричних мереж та силових вимикачів. *Праці ІЕД НАНУ*. 2006. Вип. 14. С. 22-25.

ANNOTATION

Panov A. V. Methods and monitoring system for SF6 circuit breakers for 330-750 kV voltage rating. – Qualifying scientific work published as manuscripts.

The thesis for the degree of a candidate of technical sciences (doctor of philosophy) in specialty 05.14.02. "Electric power stations, networks and systems". – Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, Kyiv, 2019.

The thesis is devoted to solving important for the country power industry the scientific task of development of scientific and technical bases for the design of monitoring system of high-voltage SF6 circuit breakers on a voltage of 330-750 kV by developing new methods for monitoring parameters and technical condition and updating the model of evaluation of their residual interruption resource, which ensures the increase of reliability, safety and efficiency of operation of these devices and electric power systems in general.

Based on the review and analysis of foreign and national publications in the field of operation, maintenance and monitoring of SF6 circuit breaker, a complete list of relevant monitoring issues their parameters and technical condition has been generated in the work.

The analysis of statistics of fault and failures of high-voltage SF6 circuit breaker, their consequences of economic and security nature, as well as the efficiency of the methods and means used of technical diagnostics and monitoring of these devices were done.

It has been shown that the construction of on-line monitoring systems is the most important condition for the introduction of progressive maintenance systems of this too responsible electric equipment of power systems and a guarantee of its reliable and efficient functioning.

The topical issues of design of monitoring systems are determined, among which the most important are recognized: the choice of controlled parameters and characteristics of circuit breaker and their corresponding monitoring indicators; development, selection and scientific basis for effective methods of processing and analysis of information signals from different sensors about the parameters and

technical condition of a circuit breaker; implementation of a system-based and complex approach for monitoring, reaching the maximum number of elements of the circuit breaker and all circuit breakers of the substation, and dilatating the functionality of the systems.

Based on the analysis of the regulatory framework, the necessity of updating and harmonizing the normative base of high-voltage circuit breaker with international standards; development in accordance with the requirements of the valid industry regulatory documents of circuit breaker monitoring; relevance and significance of introduction in the electric power industry of international standards regarding the choice of circuit breaker monitoring systems; research, analysis and reporting on their failures were substantiated. The implementation of the indicated regulatory framework will contribute to the successful implementation of technical policy in the industry, improve the monitoring and the manageability of the power facilities and systems.

As a result of examining of the structure, physical processes and operation of the control circuit of the drive mechanism of SF6 circuit breaker, the possibilities of separate components (stages) of the switch-off process and their corresponding parameters and characteristics in the receipt of monitoring data on the technical condition of the circuit breaker are estimated.

It is shown that the mathematical processing of the received synchronized signals by various kinds of information sensors characterizing the switching operations of the circuit breaker, namely: the initiation signals of the opening and closing of the main contacts and their moving curves, the signals about the position of additional contacts, the voltage of the battery of the substation secondary circuits and switching on/off coil currents allows you to receive a significant list of useful information about the technical condition of the circuit breaker in the form of monitoring indicators, the further processing of which allows not only to detect possible failures of individual parts of the circuit breaker, but also to predict possible failures in advance without removing it from the service.

The method of automatic complex on-line monitoring of the mechanical elements technical condition of the SF6 circuit breakers was developed, the

implementation of which, unlike the known methods, provides a much larger number of important monitoring indicators relating to practically all mechanical elements of each of the circuit breakers on the substation, and the monitoring system of the entire complex necessary for this procedure and operations, including the recording, storage and accumulation of monitoring data in the database, their analysis of the waste irrigation from nominal values. This increases the reliability of the monitoring results of the circuit breaker as a whole.

A complex of investigations aimed at improving the accuracy of the assessment of residual interruption resource of SF6 circuit breaker is executed. By comparison of the real resource curve of circuit breaker, which is given by the table data and its approximations in different ways: a polynomial of the third degree with the definition of approximation coefficients by a numerical method for solving the system of linear equations; the polynomial of the third degree with the definition of the approximation coefficients using the least squares method and the interpolation cubic spline for cases where the resource characteristic is given by 4, 6, and 8 points, it is established that its exact approximation is possible only if it is executed by interpolating cubic spline, and the resource characteristic will be given not less than eight uniformly spaced along the entire resource curve points.

According to the results of various calculations made using the various calculation formulas of root mean square value for a number of possible and most characteristic of the composition and form interruption currents, including fault currents, by sampling their instantaneous values taking and not taking into account the errors of current transformers, the legitimacy of application for such calculations of the classical model of evaluation of the root mean square value of current and discrete Fourier transforms for both symmetric and substitutionary currents of the steady-state condition, and asymmetric transients current of power system. The actuality of the solution of the problem of searching for an accurate method for determining the current value of non-stationary currents, which is the secondary current of the current transformer in the case of saturation of the iron core of the current transformer by DC component of the fault current.

Based on the obtained results, a well-known model for estimating the residual interruption resource of SF6 circuit breaker has been improved by using a more accurate method of representing the resource curve and the formula for determining the root mean square value of the interrupted current and taking into account the burning duration of the arc and the amount of heat it allocates when the currents are interrupted of the steady-state and transient conditions of the power systems. It is ensuring an increase in the accuracy of the interruption resource determination, the prevention of unnecessary premature removal circuit breaker from the operation for repair and replacement of its contact system, and the increase of reliability and efficiency of operation of the SF6 circuit breakers.

According to the developed model, calculations of the life cycle of an HPL 362 B1 SF6 circuit breaker of the ABB type, consisting of 24 interruption of steady-state currents with random operating values in the range of 20-120% of rated current and 6 fault current interruption with random values of amplitudes (multiplicity of 1.2-10 of rated current), time constants in range 0.05-0.3 s, and fault angle in range of 0-180° in the condition of taking and not taking into account the errors of current transformers were made.

Dependences of the value of the residual interruption resource on the accuracy of the approximation of the resource curve, the accuracy of the measurement of the interruption current and the accuracy of determining its root mean square value are obtained. It is shown that the residual interruption resource of the circuit breaker after performing 30 disconnection cycles in the condition of taking and not taking into account the errors of current transformers is 8.5% higher than its actual value.

Based on the results of the calculations, it is concluded that in order to increase the accuracy of the estimation of residual interruption resource of the circuit breaker in the conditions of interruption fault currents causing the saturation of the magnetic core of current transformer, it is necessary to increase the accuracy of the measurement of such currents or to make corrections to the residual interruption resource taking into account the errors of the current transformer.

The indicators and factors for the monitoring of 750 kV SF6 circuit breaker, which are related to the parameters and state of their gas mixture are determined and

substantiated. A method for monitoring the parameters of a gas mixture of sulfur hexafluoride circuit breaker for a voltage of 750 kV is developed, which consists in measuring and holding the pressure and temperature of the gas mixture in the arc chamber prior to and after each interruption operation, holding the opening time of the main contacts and calculating the burning time of the arc of each pole of the circuit breaker, comparing the received data with the threshold values and the formation on this basis of the conclusion about the state of the gas mixture in the arc chamber of the circuit breaker.

The requirements for the monitoring system are formulated, the list and description of functions performed by it and the list of monitored parameters and technical characteristics of the circuit breaker are given. The structural schemes of the monitoring of one circuit breaker and all circuit breakers of the substation are given. The information on the composition of the software of the system and the appointment of its separate components and functional system modules are given.

The results of the thesis have been introduced into the production of the monitoring system of the SF₆ circuit breakers on MPP "ANIGER". The system is invariant with respect to the types of circuit breakers and their manufacturers, adapted to the use of the signals of any sensors, supports various data transfer protocols, and also provides the possibility to integrate into other systems of automation of electric power objects, including automated control system of technological processes.

The use of the monitoring system allows operational and maintenance staff of the substations to receive information on the main technological parameters of the circuit breakers and on this basis make valid decisions about the need for repair and maintenance works.

The widespread implementation of the developed system (at all 9 substations of 750 kV UES of Ukraine, which covers more than 160 circuit breakers) virtually eliminates the possibility of failures in the operation of circuit breakers or their failure, contributes to increasing the reliability and efficiency of the functioning of the country's electric power industry as a whole.

Key words: SF₆ circuit breaker, online monitoring, regulatory framework, methods, interruption resource, mechanical elements, system.

PUBLICATION

1. Panov A. V., Pankiv V. I., Sopel M. F., Stognii B. S., Tankevych E. M. Topical issues of high-voltage circuit breaker monitoring and maintenance. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. №2. C.75-85.
2. Sopel M. F., Panov A. V., Pankiv V. I. Tankevych E. M. Regulatory maintenance of power system high-voltage circuit breaker monitoring. *Pratsi IED NAN Ukrainy*. 2018. Vyp. 49. C. 17-27.
3. Panov A. V., Pankiv V. I., Sopel M. F., Tankevych E. M. Monitoring improvement of technical condition of high-voltage circuit breaker mechanical elements. *Pratsi IED NAN Ukrainy*. 2018. Vyp. 51. C. 99-109.
4. Stognii B. S., Sopel M. F., Tretyakova L. D., Tankevych E. M., Panov A. V., Pankiv V. I. Evaluation of high-voltage circuit breaker interruption resource. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2017. №1. C. 71-80.
5. Stognii B., Voitov D. Panov. A. Automated system for gathering data from IEDs - implementation specifics in Ukrainian power engineering : Cigre session, France 22-26 August 2016. B5-113.
6. Panov A. V., Voitov D. V., Nestryzhennyy M. O. Some practical issues for monitoring SF6 circuit breakers. *Pratsi IED NAN Ukrainy*. 2013. Vyp. 36. C. 71-74.
7. Prystupchuk A., Movchan S., Panov A. V. Automated control systems MICROSCADA PRO using remote terminals RTU as a reliable solution for all levels of automation. *Elektricheskiye seti i sistemy*. 2012. №3. C. 95-105.
8. Maksymchuk V. L., Stognii B. S., Sopel M. F., Tutyk V. L., Mykhaylevs'kyi O. S., Panov A. V. Microprocessor monitoring system forecasting a residual interruption resource for high-voltage SF6 circuit breakers. Patent UA No 73398, 2012.
9. Tutyk V. L., Maksymchuk V. L., Panov A. V., Kamins'kyi R. B., Tarasevych P. Y., Nevecherya I. V. Means of monitoring at electric power facilities. *Pratsi IED NAN Ukrainy. Spec vyp.* 2011. C. 157-162.

10. Sopel M. F., Tutyk V. L., Panov A. V., Uschapovsky K. V. Analysis of typical schemes of connections of microprocessor devices in the network according to the standard IEC61850. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2008. № 1. C. 42-46.

11. Sopel M. F., Tutyk V. L., Panov A. V., Pylypenko Yu. V. By definition of the residual resource of 750 kV high-voltage SF6 circuit breakers. *Pratsi IED NAN Ukrainy*. 2007. Vyp. 16. C. 136-139.

12. Stognii B. S., Sopel M. F., Tutyk V. L., Panov A. V. Method of control of parameters of a gas mixture in 750 kV insulating circuit breakers. Collection of scientific articles on the results obtained in 2004-2006. Target complex program of NAS of Ukraine "Problems of resource and safety of the exploitation of structures, buildings and machines". K., 2006. C. 269-272.

13. Sopel M. F., Tutyk V. L., Panov A. V., Pylypenko Yu. V. Working algorithms of the monitoring system of operating modes of electric networks and power switches. *Pratsi IED NAN Ukrainy*. 2006. Vyp. 14. C. 22-25.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	3
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ПРАКТИЧНИХ ЗАДАЧ В ГАЛУЗІ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА МОНІТОРИНГУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ.....	11
1.1 Високовольтні вимикачі як об’єкти моніторингу.....	11
1.2 Нормативна база.....	20
1.2.1 Нормативне забезпечення високовольтних вимикачів.....	20
1.2.2 Нормативні документи з моніторингу високовольтних вимикачів..	24
1.3 Стратегії технічного обслуговування високовольтних вимикачів....	33
1.4 Пристрої та системи моніторингу високовольтних вимикачів.....	35
1.5 Методи обробки даних моніторингу параметрів і технічного стану вимикачів.....	41
1.6 Висновки до розділу.....	48
РОЗДІЛ 2 ВДОСКОНАЛЕННЯ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МЕХАНІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕГАЗОВИХ ВИМИКАЧІВ.....	50
2.1 Джерела інформації про технічний стан механічних елементів вимикача.....	50
2.2 Структура, фізичні процеси та функціонування блоку керування та привідного механізму вимикача.....	52
2.3 Показники моніторингу механічних елементів вимикача.....	57
2.4 Розробка методу та алгоритмів визначення показників моніторингу за даними моніторингу.....	63
2.5 Висновки до розділу.....	71
РОЗДІЛ 3 МОНІТОРИНГ КОМУТАЦІЙНОГО РЕСУРСУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ.....	75
3.1 Моделі та засоби оцінювання комутаційного ресурсу.....	76

3.2	Вибір та обґрунтування методу апроксимації ресурсної характеристики вимикача.....	78
3.3	Вибір та обґрунтування математичної моделі для визначення діючого значення струму вимкнення.....	81
3.4	Моделювання життєвого циклу вимикача з використанням ресурсної характеристики.....	88
3.5	Висновки до розділу.....	94
РОЗДІЛ 4 ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МОНІТОРИНГУ ЕЛЕГАЗОВИХ ВИМИКАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПІДСТАНЦІЙ НАПРУГОЮ 750 КВ.....		96
4.1	Щодо обґрунтування необхідності, основних чинників вибору та переваг застосування систем моніторингу вимикачів.....	96
4.2	Вимоги до систем моніторингу вимикачів.....	101
4.3	Мікропроцесорна система моніторингу вимикачів.....	103
4.3.1	Функції та структура системи моніторингу вимикачів.....	104
4.3.2	Програмне забезпечення системи.....	112
4.3.3	Функціонування системи.....	114
4.4	Результати реалізації методу моніторингу стану газової суміші елегазових вимикачів.....	116
4.4	Висновки до розділу.....	121
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....		124
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....		127
ДОДАТОК А Список опублікованих праць за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....		139
ДОДАТОК Б Документи, що засвідчують метрологічну атестацію, сертифікацію та високу якість розробленої системи моніторингу.....		141
ДОДАТОК В Довідка про впровадження.....		148

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АПВ	– автоматичне повторне вмикання;
АСК ТП	– автоматизована система керування технологічними процесами;
ВВ	– високовольтний вимикач;
ВП	– вейвлет перетворення;
ДПФ	– дискретні перетворення Фур'є
ЕВ	– елегазовий вимикач;
ЕЕО	– електроенергетичний об'єкт;
ЕЕС	– електроенергетична система;
КЗ	– коротке замикання;
КР	– комутаційний ресурс;
МЕК	– Міжнародна електротехнічна комісія;
МНК	– метод найменших квадратів;
НД	– нормативний документ;
НЕК	– Національна енергетична компанія;
ОЕС	– Об'єднана енергетична система;
ПВК	– первинний вимірювальний канал;
ПЗ	– програмне забезпечення;
ПМ	– показник моніторингу;
ПС	– електрична підстанція;
РЗ	– релейний захист;
РП	– розподільчий пристрій;
РХ	– ресурсна характеристика;
СВ	– струм вимкнення;
СМ	– система моніторингу;
ТО	– технічне обслуговування;
ТС	– трансформатор струму;
ANSI	– American national standards institute;

ARM	– acorn risk machine;
CBM	– condition-based maintenance;
FPGA	– field-programmable gate array;
IEEE	– Institute of electrical and electronics engineers;
RCM	– reliability-based maintenance;
RTU	– remote terminal unit;
SCADA	– supervisory control and data acquisition;
TBM	– time-based maintenance;

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Високовольтні елегазові вимикачі (ЕВ) належать до основного і найбільш важливого електрообладнання електроенергетичних систем (ЕЕС) і значною мірою впливають на надійність, безпеку та економічну ефективність їх роботи. Технології виробництва елегазового обладнання з'явилися відносно недавно і відразу стали пануючими. На сьогодні у світі встановлено більше 40 тисяч ЕВ, а 90% вимикачів, що встановлюються – елегазові. В Україні за останні 7 років введено в експлуатацію більше 60 ЕВ на напругу 750 кВ та понад 200 таких вимикачів на напругу 330 кВ.

Функціонування цього високотехнологічного і дорогого обладнання, здатного розривати електричне коло потужністю сотні МВт всього за 20 мс, у зв'язку з його характерною колонковою типом конструкцією, виконуваними функціями та місцем розміщення в ЕЕС супроводжується значними механічними напруженнями, а також небажаними електричними, тепловими та хімічними ефектами. Це зумовлює старіння, зношення окремих компонентів вимикачів, зниження їх робочих характеристик та надійності і з часом може стати причиною повної відмови у виконанні ними своїх функцій, що в свою чергу може привести до системної аварії з втратами сотень мільйонів гривень.

Тому постала проблема діагностики та моніторингу цих апаратів і організації на цій основі їх раціональної експлуатації [10, 11, 18, 26, 53, 58, 80, 82 та ін.]. Оскільки створені фірмами-виробниками ЕВ (ABB, Siemens, Areva) проприетарні підсистеми моніторингу лише частково вирішують цю проблему, то в експлуатації продовжується використання застарілих, економічно мало життєздатних за теперішніх умов в електроенергетиці стратегії і практики технічного обслуговування (ТО) ЕВ.

Для контролю технічного стану ЕВ експлуатаційний персонал до цього часу використовує методи та засоби технічного діагностування під час їх планових періодичних обстежень (ремонтів) без обґрунтованої потреби в цьому, а в багатьох випадках виконується лише візуальний контроль стану елегазу і

положення контактної системи вимикача. Як показує досвід експлуатації цього недостатньо для надійної, безпечної та економічної роботи цих апаратів і ЕЕС в цілому. Отже, за таких умов особливого значення набуває розробка методів і засобів комплексного онлайн моніторингу параметрів та стану ЕВ, як найважливішої умови реалізації нової прогресивної, технічно досконалої і ефективної системи їх ТО і запоруки надійної та безпечної експлуатації цього відповідального обладнання і ЕЕС в цілому, що є актуальною для електроенергетики задачею.

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

Теоретичні дослідження за темою дисертаційної роботи і практична розробка системи моніторингу здійснювалися в процесі виконання у відділі автоматизації електричних систем Інституту електродинаміки НАН України планів таких науково-дослідних робіт: теми «Скада», №ДР0103U00378, 2003-2007 р.р.; «Монід», №ДР0104U006383, 2004-2006 р.р.; «Монітор», №ДР0107U002702, 2007-2009 р.р.; «Діамант-2», №ДР0108U001113, 2007-2011 р.р.; «Монітор-К», №ДР0109U007911, 2010-2012 р.р.; «Монітор-2», №ДР0112U008205, 2013-2015 р.р.; «Інтелмер», №ДР0112U002291, 2012-2016 р.р.; «Синхрон-2», №ДР0112U008206, 2013-2017 р.р., «Метеор», №ДР0117U007712, 2018-2020 р.р., в усіх з яких здобувач був виконавцем;

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розвиток науково-технічних основ побудови системи моніторингу ЕВ електричних підстанцій напругою 330-750 кВ в напрямку розробки нових методів моніторингу їх параметрів і технічного стану та моделі оцінювання залишкового комутаційного ресурсу.

Для досягнення вказаної мети необхідно вирішити наступні завдання:

- дослідити ЕВ як об'єкти моніторингу, специфіку вимог національних та міжнародних документів до їх параметрів, характеристик та режимів роботи;
- виконати аналіз сучасних теоретичних та практичних задач в галузі функціонування, ТО та моніторингу ЕВ;

- з'ясувати причини зниження параметрів та надійності ЕВ в умовах експлуатації, провести аналіз статистики відмов та аварій ЕВ та їх наслідків економічного та безпекового характеру;

- виконати аналіз методів виявлення пошкоджень і відмов різних елементів ЕВ і використовуваних в них показників моніторингу (ПМ);

- дослідити структуру, фізичні процеси і функціонування блоку керування і привідного механізму ЕВ і оцінити можливості отримання ПМ від окремих складових (етапів) процесів вимкнення/вмикання і відповідних їм параметрів і характеристик;

- розробити метод моніторингу технічного стану механічних елементів ЕВ, що ґрунтується на використанні ПМ, що пов'язані зі струмом котушки вимкнення/вмикання і кривою руху його основних контактів;

- дослідити існуючі підходи, моделі і засоби оцінювання комутаційного ресурсу (КР) ЕВ, визначити їх переваги та недоліки;

- оцінити вплив точності апроксимації ресурсної характеристики (РХ) ЕВ, точності вимірювання миттєвих значень і точності розрахунку діючого значення різних за складом та характером струмів вимкнення (СВ) вимикача на точність визначення його КР в процесі експлуатації;

- вдосконалити математичну модель оцінювання залишкового КР ЕВ;

- обґрунтувати необхідність, основні чинники вибору та переваги застосування системи моніторингу (СМ) ЕВ;

- сформулювати вимоги до СМ параметрів і технічного стану ЕВ;

- впровадити результати роботи у виробництво СМ.

Об'єкт дослідження – моніторинг ЕВ електричних підстанцій напругою 330-750 кВ.

Предмет дослідження – методи і СМ параметрів технічного стану ЕВ.

Методи дослідження. При виконанні поставлених задач використовувалися теоретичні та експериментальні методи досліджень:

- інтерполяція дискретних значень струмів котушок вимкнення/вмикання кубічним сплайном для визначення чисельними методами неперервних першої та другої похідних при пошуках їх локальних і глобального екстремумів;
- метод найменших квадратів при знаходженні постійної часу затухання вільної складової струмів котушок вимкнення/вмикання;
- апроксимація таблично заданих даних при оцінюванні впливу точності апроксимації РХ на точність визначення КР та визначенні умов точної апроксимації РХ вимикача;
- генератор випадкових величин для вибору множини значень параметрів досліджуваних СВ при моделюванні життєвого циклу ЕВ з використанням його РХ;
- лінійна екстраполяція еквівалентного тиску газової суміші при 20⁰ С при довгостроковому прогнозуванні значення її густини (побудова лінії тренду).

Наукова новизна отриманих результатів міститься в наступних положеннях:

- вперше розроблено метод неперервного комплексного онлайн моніторингу технічного стану механічних елементів ЕВ, що полягає в синхронній реєстрації напруги живлення вторинних кіл підстанції, сигналів ініціалізації комутаційної операції, сигналів про положення додаткових контактів, струмів котушок вимкнення/вмикання та кривої переміщення основного контакту вимикача, визначенні ПМ шляхом цифрової обробки зареєстрованих сигналів і кривої та їх порівнянні з допустимими чи еталонними значеннями, що підвищує достовірність результатів моніторингу, забезпечує можливість оцінювання стану вимикача без виведення його з експлуатації та значно покращує ефективність і економічність ТО;
- розроблено модель оцінювання залишкового КР ЕВ вимикачів шляхом урахування параметрів СВ, тривалості горіння дуги і кількості теплоти, яку вона виділяє при вимкненні струмів усталених та перехідних режимів, що забезпечує підвищення точності визначення КР, запобігання невиправданого передчасного

виведення вимикача з експлуатації для ремонту і заміни його контактної системи, підвищення надійності та економічності експлуатації ЕВ;

- вперше розроблено метод моніторингу параметрів газової суміші ЕВ на напругу 750 кВ, який полягає в одночасних вимірюваннях тиску газової суміші в різних полюсах одного вимикача та порівнянні їх результатів між собою і зі значеннями, які зафіксовані на момент введення вимикача в експлуатацію, що дає змогу адекватно визначати існування загрози відмови вимикача та своєчасно приймати обґрунтовані рішення про необхідність проведення ремонтно-профілактичних робіт.

Практичне значення отриманих результатів визначається їхнім спрямуванням на розв'язання на сучасному світовому рівні актуальної для електроенергетики України задачі побудови і впровадження систем комплексного онлайн моніторингу високовольтних ЕВ (моніторинг технічного стану механічних елементів вимикача, параметрів його газової системи та залишкового КР). Результати роботи у вигляді технічних вимог, методів моніторингу і відповідних алгоритмів, моделі КР впроваджені у МПП «АНІГЕР», яке використовує їх у виробництві СМ параметрів і технічного стану ЕВ. На сьогодні ці системи функціонують на усіх 9-ти підстанціях напругою 750 кВ НЕК «Укренерго» (довідка про впровадження). Ними охоплено понад 160 вимикачів.

Впровадження СМ забезпечило підвищення надійності та безпеки функціонування комутаційного обладнання підстанцій напругою 330-750 кВ, технічної досконалості їх систем автоматизації, склало основу для успішної реалізації нової прогностичної стратегії ТО ЕВ, а відтак надійності та ефективності їх функціонування і ОЕС України в цілому.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення і теоретичні результати, що увійшли до дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. В роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать такі результати: у [22] – визначення і аналіз недоліків існуючих в світі СМ високовольтних ЕВ; у [32] – аналіз основних вимог міжнародних нормативних документів щодо вибору та

застосування СМ ЕВ; у [23] – розроблення методу автоматичного комплексного визначення ПМ ЕВ, які стосуються струмів його котушок вимкнення /вмикання і кривої руху основних контактів; у [41] – вдосконалення моделі оцінювання залишкового КР ЕВ; у [21] – визначення основних чинників вибору СМ ЕВ кінцевим замовником; у [25] – порівняння нових технологій візуалізації, інтерфейсів користувача для відображення даних моніторингу, принципи обробки, зберігання і передачі даних; у [44] – опис та аналіз функціональних можливостей СМ ЕВ; у [35] – аналіз можливих проектних схем з’єднання мікропроцесорних пристроїв керування вимикачами в інформаційній мережі ПС за стандартом IEC61850; у [34] – опис функцій модулів розробленої СМ ЕВ; у [39] – встановлення аналітичних залежностей зміни параметрів елегазу вимикача від впливу експлуатаційних та зовнішніх факторів; у [33] – розрахунок електричного зношення контактної групи ЕВ і часу горіння дуги за кожної комутаційної операції; у [104] – аналіз алгоритмів передачі даних контролерів різних виробників; у [17] – розроблення структурної схеми та алгоритму роботи СМ ЕВ.

Апробація результатів дисертації здійснювалась шляхом їх опублікування в Бюлетні Державної служби інтелектуальної власності України та оприлюднення на засіданні International council on large electric system (CIGRE-2016).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 13 праць, з них 11 статей у наукових фахових виданнях України, з яких 2 включено до міжнародних науко-метричних баз, 1 патент на корисну модель, 1 доповідь у збірнику доповідей CIGRE-2016.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 149 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 110 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 12 таблицями, 26 рисунками. Список використаних джерел містить 112 найменування, з них 46 кирилицею та 66 латиницею.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ПРАКТИЧНИХ ЗАДАЧ В ГАЛУЗІ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА МОНІТОРИНГУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ

1.1 Високовольтні вимикачі як об'єкти моніторингу

Високовольтні вимикачі, як один з основних компонентів передачі генерація-споживання електричної енергії і остання ступінь захисту ЕЕС в аварійних ситуаціях відіграють визначальну роль в забезпеченні їх надійного та безпечного функціонування в нормальних та аварійних умовах, якості і стабільності енергопостачання споживачів. Вони використовуються для конфігурування ЕЕС і керування потоками електроенергії, відключення пошкоджених частин ЕЕС і обмеження розвитку подальших аварій.

ВВ є складним за своєю конструкцією механіко-електричним обладнанням, для якого притаманний ряд особливостей. Серед них: двоякість нормального режиму роботи, коли ВВ перебуває в увімкненому чи вимкненому положенні за умов нормального режиму електричного кола, в якому він знаходиться; часто досить тривале знаходження ВВ в статичному стані та нерегулярність здійснюваних ним процесів комутації кола; специфічність вимог до характеристик і параметрів при вмиканні на КЗ і його відключенні [43, 100].

Технічні характеристики ВВ повинні задовольняти вимогам НД та ЕЕС щодо номінальних значень напруги, струмів і потужності відключення. ВВ повинні мати комутаційний і механічний ресурси, які за звичайних умов експлуатації забезпечували б міжремонтний період не менше 20 років (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Технічні вимоги до ЕВ 750 кВ

Технічні характеристики (найменування параметра)				Вимоги (значення параметра)
1				2
Номінальна робоча напруга, кВ				750
Найбільша робоча напруга, кВ				787
Номінальна частота, Гц				50
Номінальний струм, А. не менше				3150
Номінальний струм відключення, кА				40
Вміст аперіодичної складової, %, не більше				45
Параметри наскрізного струму КЗ:				
- найбільший пік (струм електродинамічної стійкості), кА				102
- початкове діюче значення періодичної складової, кА				40
- середньоквадратичне значення струму за час його протікання (струм термічної стійкості), кА				40
- час протікання струму термічної стійкості, с, не менше				2
Параметри струму включення:				
- початкове діюче значення періодичної складової, кА				40
- найбільший пік, кА				102
Вимоги до комутаційної здатності:				
- нормовані характеристики власної ПВН				
Параметри	необхідні	необхідні	необхідні	
I_o , кА	40	24	12	
$S = U_1/t_1$, кВ/мкс	2,0	3,0	5,0	
U_1 , кВ	849	849	849	
t_1 , мкс	424	283	170	
U_c , кВ	1189	1174	1274	
t_2 , мкс	1272	1274	1274	

Продовж. табл. 1.1

1	2
- ємнісний струм ненавантажених ліній, що відключається без повторних пробіїв, А, не менше	620
- вимикач повинен відключати робочі струми реакторів при амплітуді ПВН аж до 1500 кВ з часом досягнення амплітуди ПВН 600 мкс	Так
- припустимий струм відключення шунтуючого реактора, А	
- нормований струм відключення при розугодженні фаз, кА	10
Випробовувальна напруга грозового імпульсу	
- відносно землі	1950
- між контактами	1950
Випробовувальна напруга комутаційного імпульсу	
- відносно землі	1425
- між контактами	2000
Короткочасна (одноразовий) випробовувальна напруга промислової частоти, кВ	
- відносно землі	830
- між контактами	1250
Питома довжина шляху витоку зовнішньої ізоляції, см/кВ	1.6
Нормовані комутаційні цикли	O-0.3-BO- 180 c-BO
Знеструмлена пауза при швидкодіючому АПВ, с, не більше	0.3
Власний час відключення, с, не більше	0.025
Повний час відключення, с, не більше	0.05
Власний час вмикання, с, не більше	0.1
Різниця в часі вмикання полюсів, с, не більше	0.01
Різниця в часі вимикання полюсів, с, не більше	0.05

Продовж. табл. 1.1

1	2
Конструктивне виконання:	
- однополюсний	
- колонковий	
Вид приводу (пружинний, гідравлічний)	
Кількість дугогасних розривів на полюс, не більше	4
Дугогасне та ізолювальне середовище (SF ₆ або суміш)	SF ₆
Надлишковий тиск газу (суміші), приведений до +20 ⁰ C, МПа	
Маса вимикача, кг	
Маса елегазу, кг	
Витрата елегазу на витоки на рік, %, не більше	1
Номінальні значення кліматичних факторів зовнішнього середовища:	
- верхнє значення температури оточення, °C	+40
- абсолютна мінімальна температура оточення, °C	-45
- середній із щорічних абсолютних мінімумів, °C	-34
- максимальна швидкість вітру, м/с	40
- товщина стінки ожеледі, мм	20
- припустима швидкість вітру при наявності ожеледі, м/с	15
- припустима швидкість вітру за відсутності ожеледі, м/с	40
Кліматичне виконання (У, ХЛ) та категорія розміщення	У1
Висота встановлення над рівнем моря, м, не більше	1000
Сейсмічність району, балів за шкалою MSK	6
Вимоги до надійності:	
- гарантійний термін експлуатації, місяців, не менше	
- ресурс по механічній стійкості, циклів В-t _п -О, не менше	5000

Продовж. табл. 1.1

1	2
- ресурс по комутаційній стійкості:	
сумарне число операцій відключення (включення) при струмах КЗ в діапазоні $(0,6 \dots 1,0) I_{0,ном}$, не менше	20 (20)
сумарне число операцій О (В) при номінальному струмі навантаження, не менше	2500 (2500)
Припустима величина механічного навантаження в горизонтальному напрямку на вивід від тяжіння проводів, Н, не менше	1500
Термін служби до списання, років	30

На рис. 1.1 подано схематичне зображення ЕВ GL318 колонкового типу з автокомпресійним гасінням дуги виробництва компанії Alstrom.

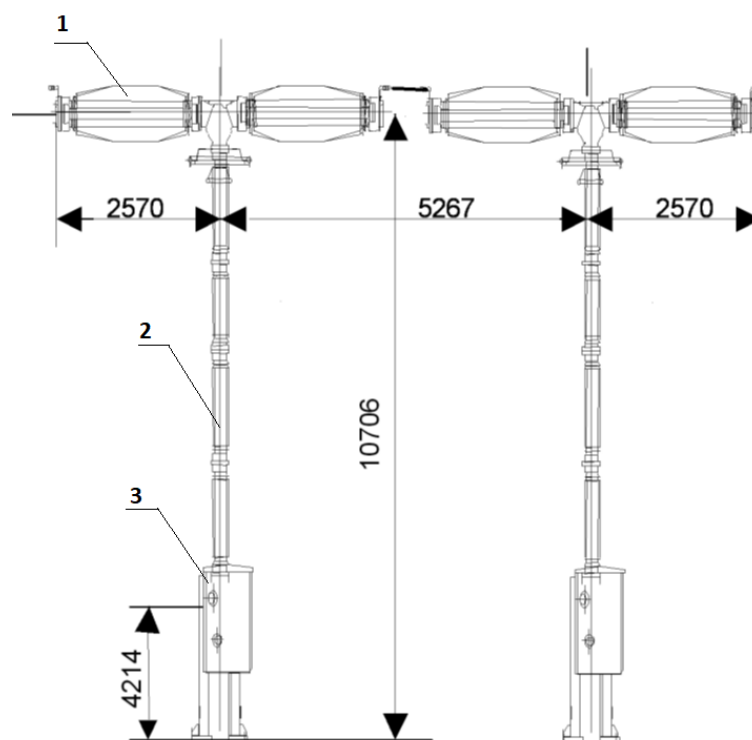


Рис. 1.1. Конструктивна схема полюса високовольного ЕВ
1 – дугогасна камера; 2 – колонка; 3 – привідний механізм

Основним недоліком елегазового обладнання є надзвичайна чутливість до хімічної чистоти. Зрозуміло, що зміна щільності та тиску газової суміші в залежності від її температури призводять до зміни електричної міцності ізоляції та комутаційних якостей вимикача. Тому виникає необхідність постійного моніторингу елегазової системи вимикача. До параметрів контролю необхідно включити тиск та щільність газової суміші в дугогасній камері, температуру в камері та температуру зовнішнього середовища.

До ВВ усіх класів напруги ставляться вимоги максимально можливого зниження маси і габаритів та зменшення об'єму ТО за одночасного забезпечення високої надійності функціонування.

Через знос та старіння, що відбуваються в процесі експлуатації, вплив робочих струмів в різних режимах ЕЕС та навколишнього середовища, неякісне чи несвоєчасне ТО в цьому надто складному за конструкцією обладнанні виникають різного роду пошкодження. Сукупна кумулятивна дія зазначених факторів спричиняє ослаблення механічних кріплень, розкладання різних продуктів і погіршення ізоляційних властивостей, поломки котушки вмикання/вимикання, ерозію та (або) поломки основних контактів, воронки і розширення сопел дугогасних камер та інші пошкодження. Це приводить до зниження робочих характеристик та надійності вимикачів, що з часом може стати причиною повної відмови у виконанні ними своїх функцій, зменшення строку служби і передчасного виведення з експлуатації.

Згідно даних, отриманих від енергопостачальних компаній різних країн та організацій, які займаються дослідженнями статистики відмов вимикачів [58, 80, 97, 100 та ін.], приблизно (50-60)% з них відбуваються через пошкодження в механічній частині вимикачів, (20-30)% пов'язані з їх колами керування, (20-30)% – електричної та діелектричної природи і стосуються контактної системи та дугогасної камери вимикачів. Отже, найбільш важливими елементами ВВ, які визначають його успішну та надійну роботу в усіх можливих режимах ЕЕС, є контакти та привід, що їх рухає.

Причинами погіршення стану робочого механізму чи механічного пошкодження вимикача може бути старіння матеріалів і зміна робочого ходу штока (плунжера) котушки вмикання/вимикання, зношення поверхні та недостатнє змащування замкового з'єднання, розпад підшипників, застосування дешевих місцевих замінників консистентних мастил, відмова механізму зв'язку між приводним механізмом та переривником, пошкодження важелів основних контактів, поломка пружин, неправильне розміщення нагрівачів та ін. [58]. До причин виникнення інших, можливих механічних пошкоджень, що складають біля третини від усіх, відносяться недостатні знання персоналу (помилкові налаштування, перекручування гвинтів), помилки проектування чи виготовлення (корозія фланців, тріщини корпусу) [80, 86].

Основними причинами аварій пов'язаних з втратою ізоляційних характеристик вимикача є пошкодження фарфору, ущільнювачів та прокладок, розгерметизація ізолюючого середовища, втрата тиску газу (повітря, елегазу), надмірна температура газу, відмова регулюючого клапану тиску повітря (для повітряних ВВ), надмірна вологість і зменшена щільність елегазу. Згідно [82] 38% пошкоджень електричної та діелектричної природи ЕВ, викликані витоком елегазу, включно і через ущільнення валу приводу [58]. Від стану газової суміші залежать майже всі основні вимикальні властивості вимикача такого типу. Вибір елегазу як дугогасного та ізолюючого матеріалу в комутаційних апаратах високої напруги обумовлений його фізико-хімічними властивостями. Елегаз (сульфатгексафторид) – це газ, який в своєму основному стані не має запаху, кольору та смаку. Він не токсичний та не підтримує горіння. Термічно стійкий та хімічно інертний, розчинний у воді (1.47 мл/100 г при 0°C). Важкий (приблизно в 5 разів важчий за повітря, абсолютна вага становить 6,14 кг/м³ при атмосферному тиску) та повільно розчиняється в повітрі. Елегазу властиві висока електрична міцність (7.5 МВ/м, це приблизно в 2.5 – 3 рази вище, ніж для повітря та майже дорівнює електричній міцності трансформаторної оливи), дугогасні та теплопровідні якості, відносно високий тиск насичених парів в діапазоні робочих температур. Із зниженням температури та підвищенням тиску

елегаз зріджується. В нормальному стані елегаз зберігається та транспортується в балонах під тиском 20 бар що відповідає стандарту міжнародної електротехнічної комісії (МЕК) IEC 376. Розмежуванням між газоподібним та рідкими фазами є крива конденсації, на якій відбувається різкий стрибок щільності елегазу. При спаді температури до $-58.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ та тиску 2.25 бар елегаз може знаходитись у трьох агрегатних станах – газ, рідина, лід (потрійна точка).

Такі температурні обмеження ускладнюють експлуатацію елегазового обладнання в холодних кліматичних зонах. Для запобігання перетворення у рідину до елегазу в рівних пропорціях додають тетрафторметан – (хладон 14 (фреон 14, FC 14) формула: CF_4) – газ, що немає кольору та не горить. Утворену суміш $-\text{SF}_6 + \text{CF}_4$ – заправляють в дугогасні камери ВВ.

Основним недоліком елегазового обладнання є надзвичайна чутливість до хімічної чистоти. Зрозуміло, що зміна щільності та тиску газової суміші в залежності від її температури призводять до зміни електричної міцності ізоляції та комутаційних якостей вимикача. Тому виникає необхідність постійного моніторингу елегазової системи вимикача. До параметрів контролю відносяться тиск та щільність газової суміші в дугогасній камері, температура в камері та температура зовнішнього середовища.

До пошкоджень кіл управління слід віднести можливі обрив кола або поява КЗ в колі котушки вмикання/вимикання, несправність котушок, втрата або недостатній рівень напруги живлення, відмова кіл релейного захисту (РЗ). У випадку використання пружинних приводів можливе недостатнє або надмірне накопичення енергії або зношування спускового механізму пружини. У випадку застосування гідравлічного приводу втрата накопиченої енергії, надмірний тиск в системі пневматичних або гідравлічних рідин.

Тривала експлуатація вимикача може спричиняти недостатнє розходження основних контактів, що також є однією з причин погіршення ізоляційних характеристик, а термічна дія електричної дуги, яка виникає в процесі вмикання/вимикання, призводить до таких наслідків як вигорання основних контактів, збільшення опору контактного з'єднання [86].

Перелічені пошкодження та відмови складових вимикача, які забезпечують його функціонування, можуть призводити до таких наслідків як: неможливість розірвання кола задля переривання струму; ненавмисного замикання кола; розривання кола, коли від вимикача це не очікується; неможливість замкнути коло, коли від нього це очікується. Як правило такі наслідки зумовлюють проблеми економічного та безпекового характеру. Зокрема, для прикладу, втрати Китаю, зумовлені пошкодженнями ВВ протягом 1984-1994 рр., за статистичними даними складають мільйон кВт/год і в тисячу разів перевищують вартість самих вимикачів [53, 54]. Це свідчить про те, що надійність і працездатність вимикачів може бути виражена кількісною оцінкою вартості їх роботи (в грошах).

Потрібний і достатній рівень надійності вимикачів в експлуатації забезпечується виконанням програм їх ТО, в основу яких покладено НД та рекомендації виробників, що витікають з досвіду експлуатації і, як буде показано нижче, потребують постійного оновлення. Однак, як витікає з наведеного вище, існуюча система ТО не завжди виявляється ефективною і тому потребує суттєвого вдосконалення. Важлива роль ВВ в надійній роботі ЕЕС, значна кількість факторів впливу на їх функціонування, а відповідно велике число можливих пошкоджень та відмов, а також великі витрати на неефективне ТО виправдовують необхідність вдосконалення стратегії ТО цього надто відповідального обладнання. Цінним внеском у розв'язання цієї задачі може стати побудова СМ параметрів і технічного стану вимикачів і створення на цій основі інноваційної системи ТО, що забезпечить оптимізацію строку служби та підвищення надійності функціонування ВВ. Однак моніторинг технічного стану ВВ слід розглядати не лише як потенціальну можливість вдосконалення та оптимізації їх ТО і зменшення загальних витрат протягом строку служби, а насамперед, як один з найвагоміших чинників підвищення надійності та покращення якості ЕЕС.

Отже, розвиток теоретичних і практичних питань побудови СМ ВВ, здатної здійснювати моніторинг стану критичних елементів вимикачів, фіксувати погіршення їх робочих характеристик і попереджати про можливу з

часом відмову є актуальною науково-технічною задачею, оскільки її розв'язання дозволить забезпечити впровадження технічно досконалої та ефективної системи ТО ВВ, підвищення надійності і безпеки їх експлуатації і ЕЕС в цілому.

1.2 Нормативна база

1.2.1 Нормативне забезпечення високовольтних вимикачів.

Актуалізація, розроблення, оновлення та гармонізація з міжнародними стандартами НД ОЕС України визначені в документах Міненерговугілля України [24, 36, 37] основним напрямком реалізації технічної політики (ТП) в галузі. Там же зазначено, що їх впровадження дасть змогу підвищити надійність та ефективність експлуатації електроенергетичних об'єктів (ЕЕО) і ЕЕС, вдосконалити їх моніторинг і підвищити керованість ними, забезпечивши таким чином стійке функціонування і розвиток електроенергетики країни.

Розроблення, перегляд та ведення реєстру чинних у сфері електроенергетики НД, створення і ведення їх повнотекстової об'єктно-орієнтованої бази розглядаються в цих документах як основні шляхи реалізації ТП. Згідно вказаних документів об'єктно-орієнтована система НД має складатися з системи стандартів, що містять лише вимоги та норми (НД 1-го рівня) і НД, які забезпечують виконання вимог стандартів (рекомендації, посібники, методики, методичні вказівки, інструкції, типові технічні рішення, тощо) (НД 2-го рівня). Кожний об'єкт (технічна система, обладнання, технологія) має бути забезпечений наступними типами стандартів: технічні вимоги; вимоги з організації експлуатації і ТО; методи випробувань; охорона праці і техніка безпеки. Показниками функціональної прогресивності технічних рішень у проектах будівництва, реконструкції та технічного переоснащення ПС є автоматизована ПС з телевимірюваннями і керування виробничими процесами без постійного обслуговуючого персоналу; застосування засобів автоматичного діагностування обладнання ПС в експлуатаційному режимі; застосування ЕВ в розподільчих пристроях (РП) напругою 110 кВ і вище. Для ВВ в складі ПС

такими показниками є наявність пружинного приводу на струм вимкнення $I_{\text{вим}}$ до 63 кА і автоматизованої СМ та діагностики; механічний ресурс – не менше 10000 циклів увімкнення- вимкнення; КР – 20-25 вимикань струму КЗ; власний час вимикання – не більше 0,02 с; автономність (відсутність необхідності стаціонарного обладнання газопідживлення); збереження номінальних параметрів за температури навколишнього повітря -45 С з впливом вітрового навантаження; річний витік електрики – не більше 0,1%.

На даний час нормативна база ВВ в Україні складається з НД [6-9, 12-14] і потребує поновлення, вдосконалення і гармонізації з міжнародними стандартами, що стосуються цих апаратів, відповідно до Технічної політики [24, 36, 37] щодо порядку розроблення та перегляду стандартів підприємства.

Найбільш визнані в сучасному світі та важливими щодо ВВ і комутаційної апаратури стандарти МЕК і Американського національного інституту стандартів (ANSI). Стандарти США здебільшого є продуктом спільних або окремих зусиль ANSI, Інституту інженерів-електриків (IEEE) та Національної асоціації виробників електротехнічної продукції (National electrical manufacturers association). Стандарти є життєво необхідними документами і тому впродовж усього часу розвитку вимикачів процес їх стандартизації розвивався і вдосконалювався, до нього прилучалися все нові і нові країни. Документи ANSI розвиваються за політики відкритої участі, тоді як в МЕК цей процес обмежений лише державами – членами цієї організації. Сьогодні фактично усі ВВ, що продаються в усьому світі, відповідають стандартам МЕК. Стандарти ANSI застосовуються в США і в країнах, в яких США виказало сильний вплив на розвиток їх електротехнічної промисловості. Між стандартами цих двох організацій існують певні відмінності, насамперед у форматі та технічних вимогах, але вони не є значними і відносяться скоріше до урахування місцевих особливостей, ніж до фундаментальних положень. В зв'язку зі зростаючою глобалізацією торгівлі, а також через, що сьогодні розвиток ВВ відбувається головним чином за межами США, а усі провідні постачальники цього типу устаткування належать європейським або японським багатонаціональним

корпораціям існує проблема гармонізації цих двох систем стандартів, або ж злиття їх в єдину систему стандартів [100].

Основними або первинними стандартами ANSI щодо ВВ є наступні стандарти: ANSI C37.06 [47], IEEE C37.04-1999 (R2006) [71], IEEE C37.12-2008 [78] і IEEE C37.09 [72]. Основними стандартами МЕК є ІЕС 62271-1:2007 [66] та ІЕС 62271-100:2008 [67].

Оглянемо коротко основні положення цих стандартів, що стосуються номінальних значень вимикачів та їх експлуатаційних характеристик. Номінальними значеннями вимикача вважаються мінімально необхідні значення параметрів, за яких вимикач задовольняє вимогам стандарту при функціонуванні в межах визначених умов. Структура номінальних значень містить основні параметри частоти, напруги і струму, а також ряд інших параметрів, що отримуються з зазначених основних. Номінальне значення промислової частоти є важливим фактором під час переривання струму, оскільки для багатьох типів вимикачів швидкість зміни струму при його проходженні через нуль є більш значимим параметром ніж середньоквадратичне чи пікове значення струму [100]. До номінальних значень, пов'язаних з напругою відносяться: «номінальна максимальна робоча напруга» (ANSI) та «номінальна напруга» (МЕК); «номінальна електрична міцність»; «номінальна перехідна відновлювана напруга».

До структури номінальних значень і вимог, пов'язаних зі струмом входять: «номінальний тривалий струм» і «номінальний струм КЗ». Перше з них використовується для встановлення максимально допустимих температурних меж нагріву вимикача з метою запобігання виходу температури з під контролю. Максимальні значення нагріву подані в МЕК [66] і в [71] для вимикачів зовнішнього установа не відрізняються. Визначене обома стандартами номінальне значення струму КЗ відповідає максимальному значенню симетричного струму, який здатний відключити вимикач. Існує ряд відповідних здатностей, пов'язаних зі значенням симетричного струму, яке є основою номінальних значень. Це номінальний час відключення вимикача, що

складається з часу від моменту подачі живлення на котушку відключення до моменту згасання дуги та номінальний піковий несиметричний струм увімкнення, що встановлений з метою визначення механічної здатності вимикача, його контактів і механізму витримувати максимальні електромагнітні сили, які можуть виникнути, коли вимикач вмикається на КЗ.

З метою гарантування витримування струмопровідними частинами ВВ нагрівання струмом КЗ встановлена вимога у вигляді номінального значення короткотривалого струму, що є діючим значенням повного (несиметричного) струму, який вимикач повинен проводити в положенні «увімкнено» протягом встановленого часу. Цей час не може перевищувати допустимої затримки вимкнення і визначений ANSI для ВВ з номінальним значенням напруги нижче 100 кВ рівним 2 с, і 1 с для ВВ з напругою вище 100 кВ. В стандартах МЕК цей час складає 1 с для усіх ВВ і називається номінальною тривалістю КЗ.

Важливою вимогою, що пов'язана з номінальним струмом КЗ, є номінальний цикл робочого режиму (в ANSI), який в МЕК має назву «комутаційний цикл». Стандартний режим роботи ВВ визначений ANSI як послідовність наступних операцій: вимикання – 15 с – вмикавання/вимикання – 3 хв – вмикавання/вимикання. Для вимикачів призначених для автоматичного повторного вмикавання (АПВ) ця послідовність виглядає так: вимикання – 0.3 с – вмикавання-вимикання – 3 хв – вмикавання-вимикання. В МЕК додатково до зазначеного визначений комутаційний цикл з обома без струмовими паузами, рівними 3 хв.

Характерною лише для ANSI вимогою є здатність до обслуговування, що визначається мінімально прийнятною кількістю циклів вимикання ВВ номінального струму КЗ без необхідності заміни його контактів. Ця здатність встановлюється виходячи з сумарного відключеного струму i , наприклад, для сучасних елегазових і вакуумних ВВ вона складає 800% номінального струму КЗ. Стандартами МЕК ця характеристика не встановлена, однак для ВВ з номінальною напругою від 1кВ до 52 кВ стандартом [67] встановлено два типи ВВ, що характеризуються різним рівнем комутаційної зносостійкості: E_1 і E_2 .

Вимикач типу E_2 є такий, що не потребує ТО частин розриву силового кола впродовж очікуваного терміну служби і вимагає лише мінімального ТО інших його частин. Тобто вимикачу типу E_2 властива розширена комутаційна зносостійкість. Тип E_1 визначається як вимикач, який не потрапляє до типу E_2 .

Стандарти обох організацій визначають також додаткові вимоги до виконання ВВ інших, відмінних від комутацій струмів КЗ, комутаційних операцій – комутацій ємності. Серед них здатність комутації однієї батареї конденсаторів і зустрічно увімкнених батарей у вигляді номінального струму їх вимкнення, які не є обов'язковими для усіх вимикачів; вимоги щодо зарядних струмів ліній у вигляді номінального зарядного струму, які є обов'язковими для усіх ВВ зовнішнього встановлення з номінальними значеннями напруги 72,5 кВ і вище. Особливим випадком комутації ємності вважається комутація кабельної лінії, вимоги до якої встановлені у вигляді номінального значення зарядного струму і є обов'язковими для усіх ВВ з номінальними значеннями напруги не менш ніж 52 кВ. Додатковою вимогою у вигляді встановлення максимального коефіцієнта перенапруги при повторних запаленнях і пробоях під час комутації ємнісного струму гарантується, що їх дія за умов допустимого росту напруги підтримується в безпечних межах.

Визначені в стандартах механічні вимоги стосуються числа механічних операцій (одна механічна операція складається з одного увімкнення і одного вимкнення), які можуть бути виконані ВВ. Забезпечення цих вимог гарантує витривалість конструкції і функціональні характеристики робочого механізму ВВ. Усі вимикачі зовнішнього встановлення згідно ANSI мають загальну вимогу 2000 операцій. Стандартом [67] для ВВ типу E_1 встановлено вимогу 2000 операцій, типу E_2 – 10000 операцій.

1.2.2 Нормативні документи з моніторингу високовольтних вимикачів [32]. Нормативно-правова база щодо створення та використання СМ електротехнічного обладнання, включно і ВВ, в Україні поки що відсутня, але не зважаючи на це на високовольтних ПС з метою моніторингу параметрів вимикачів встановлюють певне обладнання.

Щодо нормативної бази міжнародного рівня найбільш цілеспрямованим, повним та корисним для розробників СМ ВВ є керівництво IEEE Std.C37.10.1-2000 [73]. В цьому досить глибоко проробленому інформативному документі подано керівні вказівки щодо вибору параметрів моніторингу та діагностики, які необхідно використовувати для ВВ напругою вище 1000 В різних технологій виготовлення, базовий перелік можливих характерних відмов вимикачів, їх причин і наслідків, характеристик розвитку відмов та доступних в кожному конкретному випадку опцій моніторингу. Представлені в керівництві декілька методологій вибору варіанту моніторингу враховують ризики відмов вимикачів та вигідність витрат при застосуванні моніторингу за умови найбільшого зменшення інтенсивності їх відмов. За допомогою оцінювання ризику відмов через оцінку їх ймовірності та серйозності наслідків визначається міра важливості відмов в сфері економіки, безпеки та довколишнього середовища. Для означення можливостей модернізації обслуговування (стратегії, задач та інтервалів) ВВ, яка можлива завдяки моніторингу, подано приклади різних програм їх обслуговування за наявності та відсутності моніторингу.

В керівництві подано також ряд визначень, зокрема: неперервного і періодичного моніторингу, діагностичного контролю, характеристики і наслідку відмови, аналізу характеру наслідків і важливості відмов, ризику. Зазначено, що моніторинг може використовуватись для визначення стану ВВ, його окремих вузлів і функцій керування; оптимізації діяльності з обслуговування; зменшення інтенсивності відмов і покращення економічних показників функціонування ВВ; збільшення доступного запасу знань про ВВ з метою більш точного визначення причин відмов після їх появи. Термін «відмова» використовується в контексті цього керівництва для позначення «неуспішного виконання функції» незалежно від причини елемента чи вузла, яким вона спричинена. Відмова виконувати потрібну функцію не передбачає, що відмовив конкретний елемент, натомість передбачає, що функція елемента чи ВВ не була забезпечена. Функціональні відмови необов'язково викликаються відмовою ВВ чи його елемента. Необхідно також враховувати і зовнішні причини, включно з неправильним застосуванням.

В розглядуваному стандарті [73] вказується, що його необхідно використовувати в поєднанні з стандартами [50, 65, 69, 70, 74, 75] або їх затвердженими новими версіями, якщо такі є. Серед цих стандартів найбільш значущим для розв'язання задачі побудови моніторингу ВВ на думку автора є стандарт [75], який є останньою версією стандарту [74], що переглядався в 2002 та 2008 роках. В цьому керівництві подано правила та процедури проведення розслідування, аналізу та складання звітів про відмови ВВ. Слід зазначити, що статистичні дані щодо пошкоджуваності тих чи інших елементів ВВ за умов тривалої експлуатації дозволяють сформувати уявлення про те, на чому необхідно концентрувати увагу і зусилля при виборі та розробці СМ для досягнення більш високих показників надійності як конструкції, так і функціонування ВВ. Отримати такі дані можливо лише від працівників експлуатації, які не завжди вважають за необхідне складання інформаційного дос'є про експлуатаційні характеристики пошкодженого ВВ. Виконання вимог та рекомендацій стандарту [75], забезпечує можливість розв'язання цієї задачі шляхом складання спільно користувачем і виробником ВВ стандартизованої форми звітів про їх відмови. Метою цього НД є:

- встановлення нормативів та сприяння одноманітності в аналізі відмов вимикачів;
- надання керівних вказівок для систематичного та однакового збору даних для того, щоб не втратити або не порушити цінних доказів;
- надання методології, за допомогою якої може бути визначено найбільш ймовірну причину відмови будь-якого конкретного вимикача;
- сприяння спільним зусиллям користувачів та виробників під час аналізу відмов;
- надання керівних вказівок для підготовки звітів про відмову вимикачів.

Так, зокрема в цьому документі вказується, що в залежності від природи та початкового розуміння серйозності відмови можуть використовуватися різні рівні дослідження за окремими протоколами. Залежно від встановленої першочерговості задачі виявлення основної причини відмови чи відновлення ВВ

та повернення його в експлуатацію методи розслідування та демонтажу (розбирання) ВВ можуть бути досить відмінними.

Визначені загрози та ризики, пов'язані з оглядами ВВ (збоку електричної частини, матеріалів у ВВ або навколо місця його встановлення, збереженої енергії для забезпечення відключення та АПВ). З метою визначення дій, які необхідно виконувати при розслідуванні відмови, рекомендується починати його з визначення виду відмови, а саме необхідно визначити чи є відмова основною, експлуатаційною чи несуттєвою. Подано класифікація відмов, перелік і рекомендований план дій при розслідуванні кожної з відмов (негайної дії, збір даних на місці експлуатації, саме розслідування, що включає огляд нормативно-технічної документації з встановлення функціонування і обслуговування вимикача та порівняння фактичних умов з наведеними в документації, підсумковий аналіз відмови).

Моніторинг різноманітних властивостей та функцій ВВ в цьому керівництві розглядається як допомога в діагностування його стану та прогнозуванні всякої відмови, що наближається. Діагностування ВВ допомагає користувачу в прогнозуванні його стану і подовженню інтервалів між обслуговуваннями. В керівництві подано перелік дій користувача, яких потребує моніторинг, включно з встановленням складних діагностичних систем чи СМ та проведення діагностичних випробувань. В 14-ти таблицях перелічені властивості та характеристики різних типів вимикачів, які рекомендовані для моніторингу та випробувань (механічні, властивість проводити електричний струм, електричної ізоляції, допоміжних кіл та кіл управління, переривача, особливі властивості високовольтних ЕВ одного тиску і з подвійним тиском, ТС, пов'язаних з ЕВ та ін. Нижче, як приклад, подано дві з цих таблиць, перша з них (табл. 1.2) відображає особливості ЕВ з подвійним тиском, що рекомендуються для моніторингу, друга (табл. 1.3) – особливі властивості ТС, пов'язаних із вимикачем.

В цих таблицях також міститься інформація щодо режиму роботи ВВ (під живленням або знеструмлений та ізольований) при виконанні випробувань та

моніторингу; вимірюваних параметрів та інформації, що виводиться; оцінки стану ВВ на основі виведеної інформації.

Таблиця 1.2

Особливі властивості ЕВ з подвійним тиском, що рекомендуються для моніторингу

Оцінювані характеристики	Режим роботи	Вимірювані значення параметрів та похідна інформація	Оцінка властивості
Рівень елегазу (низький тиск, низька щільність)	I	Тиск Щільність (тиск та температура) Функціонування нагрівача елегазу Стан ущільнень	Здатність витримувати напругу
Рівень елегазу (високого тиску, високої щільності)	I	Тиск, Щільність (тиск та температура) Функціонування нагрівача елегазу Стан ущільнень	Здатність переривання струму
Дія переривника	O	Залежність змін тиску в часі протягом комутаційних операцій	Дія захисного клапану, сопла переривника та контактів
Вологість елегазу	I	Вимірювання водяної пари в елегазі (мільйонних доль (проміле))	Рівень води в елегазі, що може впливати на напругу витримки, переривну здатність і корозостійкість
Опір замикання (розмикання) (якщо присутній)	O	Опір в мікро Омах ($\mu\Omega$) Опір резисторів замикання (розмикання) в Омах (Ω)	Знаходження значення опору в допустимих межах
	O	Час вставки в мс	Знаходження значення часу дії основних контактів під час комутаційних операцій з урахуванням впливу додаткового опору в допустимих межах.
Напруга зрівнювальних конденсаторів (якщо присутні)	O	Ємність в піко фарадах (pF)	Знаходження значення ємності в допустимих межах
Фазні конденсатори (якщо присутні)	O	Ємність в піко фарадах (pF)	Знаходження значення ємності в допустимих межах

Належна оцінка стану ВВ потребує запису та отримання тренду виміряних значень декількох параметрів чи характеристик. Від користувача вимагається повідомити виробника про відмову, а від них обох погодити належний підхід до оцінки відмови. Взаємодія організацій-учасниць на всіх рівнях сприяє розслідуванню відмови та покращує точність діагностування. При цьому

певному персоналу може бути надана провідна роль в певних ситуаціях відповідно до загального корпоративного плану розслідування.

Таблиця 1.3

Особливі властивості ТС опорного та вбудованого способів встановлення, пов'язаних із вимикачем, які рекомендуються для моніторингу

Оцінювані характеристики (за результатами випробувань та моніторингу)	Режим роботи	Виміряні значення параметрів та похідна інформація	Оцінка властивості
Струм витoku (спливу)	О	Виток струму	Стан ізоляції . Тріщини або забрудненість
Рівень елегазу	I, О	Збільшення тиску Тиск Щільність (тиск та температура)	Здатність витримувати напругу.
Якість оливи	I	Тангенс кута втрат оливи, тип та кількість часток в оливі, розчинена та шарувата вода в оливі, витримувана оливою напруга	Здатність витримувати напругу
Зовнішні випробування на корону Внутрішні випробування на корону Випробування на часткові розряди (виконувані на підприємстві або в лабораторії з достатньо низьким рівнем фонових часткових розрядів)	О	Наявність часткових розрядів	Ушкодження ізоляції Контакти пошкоджено або не торкаються
Об'єм оливи	I	Низький рівень оливи	Перевірити, щоб було достатньо масла
Рівень елегазу	I	Тиск	Дозволяє оцінити витримувану напругу
Ємність	О	Цілісність ізоляції	Ємність як визначено в специфікації
Тангенс кута втрат	О	Цілісність ізоляції	Тангенс кута втрат, як визначено в специфікації
Коефіцієнт трансформації	О	Відношення витків	Відношення первинного струму до вторинного, як визначено в специфікації
Струм намагнічування	О	Цілісність міжвиткової ізоляції	Струм намагнічування, як визначено в специфікації

В стовпці «Режим роботи» таблиці застосовуються наступні буквені позначення:

I – Вимикач знаходиться під живленням та в обслуговуванні;

О – Вимикач знеструмлено та ізольовано.

Під час збирання даних про відмову користувачу необхідно повідомити виробника, особливо коли обладнання перебуває на гарантії та у випадках руйнувань та серйозних пошкоджень. Якщо можливо, то не слід видаляти чи розбирати (демонтувати) будь які частини ВВ поки виробник не здійснить огляд або не погодить належний упорядкований підхід до оцінювання відмови аби не допустити втрати інформації.

В керівництві подано перелік різноманітних дій та інструментарію представників користувача і виробника, які можуть виявитися необхідними на місці події. Звертається особлива увага на важливість своєчасного огляду ВВ і збору даних в разі його відмови, а також на специфіку розслідування, коли результатом відмови є серйозні пошкодження обладнання (включно з відключенням основної електричної схеми), нещасний випадок або якщо відмова може стати причиною судового розгляду.

Пропонується досить детальний перелік основних спостережень щодо умов та подій на місці відмови фізичного та електричного стану ВВ після відмови. Зокрема вказується, що мають бути записані дані, що стосуються функціонування таких пристроїв моніторингу та захисту таких як: осцилограф, реєстратор послідовності подій, цифровий реєстратор замикань, реєстратор замикань, сигналізатор, запобіжники, лічильники кількості перемикачів, інших ВВ в системі і тиску газу. Також наведено перелік електричних випробувань, випробувань ізоляційного середовища, та інших випробувань заземленого та ізольованого від енергосистеми ВВ, які пропонуються виконати під час розслідування його відмови.

Аналіз відмов дозволяє дати відповідь на ряд взаємопов'язаних питань, що стосуються причини відмови, недопущення її повторення, відновлення чи заміни ВВ, зменшення ризиків функціонування та безпеки, розробки стратегії ТО та ін. Зазначається що як користувач, так і виробник безумовно матимуть користь від розслідування та аналізу відмови і використання відповідних звітів. Наприклад, користувач завдяки аналізу зможе краще зрозуміти сутність відмови і використати це для вдосконалення застосування і функціонування, ефективного

обслуговування, розширення можливостей моніторингу, перегляду технології виробництва з метою мінімізації механізмів та причин відмови.

Звіт про відмови може бути також використаний користувачем для встановлення тенденції зміни надійності, класифікації відмов за виробником, типом і віком ВВ, передачі виробнику рекомендацій та інформації про проблеми, що потребують технічного аналізу, а також оновлення статистики відмов, оцінювання строку служби ВВ до відмови, оцінювання допустимих інтервалів між ТО та ін.

Поглиблений аналіз основних причин відмов дозволяє встановити конструктивні вади та проблеми якості елементів чи систем ВВ, їх неправильне використання, недоліки контролю виробничого процесу, помилки оператора та ін. Урахування виробником рекомендацій користувача і визначення ним коригуючих дій у виробництві може забезпечити покращення конструкції ВВ в цілому, технічних умов, виробничого процесу, стандартів щодо ВВ, їх ТО, діагностики та моніторингу.

Нижче на рис. 1.2 подано бланк звіту про відмови, що є частиною цього керівництва, розроблений Комітетом з питань комутаційної апаратури IEEE з метою підвищення надійності ВВ за допомогою уніфікованих звітів про експлуатаційну відмову.

В Керівництві також зазначається, що для аналізу основної або системної відмови необхідна наступна додаткова інформація, а саме:

- однолінійна схема ПС з зображенням вимикачів, що розглядаються (прикріпити копію);
- робота та часова послідовність (включаючи усю сигналізацію) відповідних вимикачів з останнього часу, коли умови були нормальними;
- стан ліній до, після відмови та під час неї;
- осцилограми – прикріпити з поясненням та інтерпретацією;
- прикріпити опис точного положення усіх застосовуваних механічних деталей від котушки управління до контактів переривача. (сфотографувати усе детально перед рухом приводів; надати копії фотознімків з доповіддю);

ЗВІТ ПРО ВІДМОВИ ВИМИКАЧІВ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

Перевірте усі відповідні блоки та надайте вказану інформацію. Для *основної* несправності надайте додаткову необхідну інформацію на звороті цієї сторінки, за потреби продовжуючи на інших сторінках.

ОБЛАДНАННЯ:

Підстанція	Познач. вимикача користувачем
Виробник _____	Тип _____
Номинальна напруга _____ кВ	Номинальна <u>перериваюча</u> здатність _____ кА
Витримувана напруга грозового імпульсу _____ кВ	Тривалий струм _____ кА
Серійний номер _____	Дата відвантаження _____
Дата установки _____	Дата модернізації _____
Переривник _____ повітряного дуття/ повітряно-магнітний/ масляний/ <u>елегазовий</u> / вакуумний/ інші	Корпус _____ окремо стоячий/ броньований/ з <u>елегазовою</u> ізоляцією

НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ:

Місцезнаходження	Внутрішнє/зовнішнє встановлення	Навколишнє середовище (найбільш відповідне)	Промислове/ міське/ приміське/ сільське/ узбережжя/ вище 1000 м/ високо забруднене/ інше
Метеоумови	☐ сухо ☐ сніг	☐ дощ ☐ мороз	☐ гроза ☐ туман
Тенденція (зміни) температури	Зростає/спадає/незмінна/ надзвичайно холодно	_____ °C	☐ дощ з ожеледдю ☐ конденсація
Зовнішнє механічне навантаження включає	☐ землетрус ☐ інше	☐ вітер	☐ постійний сильний/ слабкий/ поривчастий сильний ☐ ненормальні навантаження на клемі ☐ номінальна напруга системи _____ кВ

НЕСПРАВНІСТЬ:

Коли виявлено	При установленні/ експлуатації/ обслуговуванні/ випробуванні/ інше	Показ лічильника числа перемикачів _____
Режим вимикача в момент несправності	Живлення подано/ живлення знято	Відключення/ включення/ повторне включення/ бездіяльність
Реакція вимикача	Не подано команду на спрацювання/ спрацював як потрібно/ незадовільна робота/ відмова функціонування	Переривання замикання/ комутація навантаження/ комутація лінії/ жодне
Несправність підсистеми	Зовнішня ізоляція по відношенню до землі/ внутрішня ізоляція по відношенню до землі/ ізоляційне середовище/ прохідний ізолятор/ <u>переривач</u> / ущільнення-сальники/ повітряна система/ гідравлічна система/ <u>елегазова</u> система/ ТС/ комутатор або додатковий <u>переривач</u> резистора/ пристрої, які вирівнюють розподіл потенціалів/ лінійні виводи/ компресор/ нагрівач/ електричне управління	
Зазначити, що конкретно відмовило (забезпечуючи посиланнями з керівництва з експлуатації)		
Чи траплялось таке раніше з вимикачами цього типу? Так/ ні Скільки разів? _____		
Зазначити як було виправлено попередню несправність		

ПОПЕРЕДНІЙ АНАЛІЗ:

Можливі причини	☐ розробка/виробництво	☐ транспортування	☐ зберігання	☐ встановлення
☐ обслуговування	☐ зношення/старіння	☐ тварини/птахи	☐ інші	☐ не очевидно

Коментарі та пропозиції

РЕЗУЛЬТАТ:

Час простою вимикача	Без переривання/ _____ тижнів/ днів/ _____ годин/ _____ хвилин	Час ремонту	_____ тижнів/ _____ днів/ _____ годин/ _____ хвилин
Статус зупинки роботи вимикача	Негайна примусова зупинка роботи/ зупинка роботи протягом 20 хв./ Необхідна пізніша зупинка роботи/ відкладання ремонту до планового обслуговування/ без зупинки роботи на ремонт		

Уповноважена користувачем особа, яка готує звіт	_____	Дата	_____
Затвердження користувачем	_____	Дата	_____
Контакти користувача	_____	Тел.	_____
Компанія користувача	_____		

Рис. 1.2. Бланк звіту про відмову вимикача

- описати пошкодження від дуги та розміщення продуктів дуги стосовно ущільнень клапанів(сфотографувати усе детально перед очищенням або рухом приводів після відмови; надати копії фотознімків з доповіддю).

Керівництво також містить три інформаційних додатки: А, В і С. В першому з них подано форми для складання звітів про відмови. Додаток В містить бібліографію щодо планування та аналізу надійності обладнання (В1), розслідування відмов (В2), підготовки звітів про відмови (В3), статистики відмов обладнання устаткування (В4), моніторингу обладнання (В5), довідників з вимикачів (В6), настанов для вимикачів (В7), а також перелічені в хронологічному порядку видання стандартів МЕК, США і Канади, що стосуються ВВ (В8-В10). В цьому документі також міститься попередження його користувачам, щодо необхідності застосування до вимикачів, відмови яких досліджуються, з наведеного у В8-В10 переліку стандартів стандарти відповідні часу виробництва вимикача. В останньому Додатку С цього Керівництва подана важлива для проектування інформація щодо конструкцій ВВ та їх окремих вузлів.

1.3 Стратегії технічного обслуговування високовольтних вимикачів

Регулярний огляд та ТО ВВ є важливою і невід’ємною складовою експлуатації цього обладнання. Періодичне ТО вимикачів (за розкладом), яке в світовій практиці відоме як Time Based Maintenance (TBM) відбувається на основі фіксованих інтервалів часу чи обліку числа виконаних операцій вимикачем. Така стратегія ТО є традиційною для значної кількості країн [49], включно й України, [3-5]. TBM має багато недоліків, серед яких необхідність виведення ВВ з експлуатації, значна вартість та витрата часу, можливе надмірне ТО або ж його нестача. Нерідко після TBM задовільно працюючого вимикача, також можливі його відмови, пов’язані з невід’ємним втручанням обслуговуючого персоналу. За умов дерегуляції в електроенергетиці, жорсткої конкуренції на ринку електроенергії така практика ТО виявилася економічно

мало життєздатною, оскільки майже не дає можливостей для оптимізації використання обмежених ресурсів на проведення ТО. Через вказані недоліки TBM, в світовій практиці відбувається поступовий перехід до ТО на основі оцінювання технічного стану ВВ (Condition Based Maintenance, CBM) та на основі оцінювання надійності ВВ (Reliability Based Maintenance, RCM) [49].

CBM, або прогнозоване ТО вимагає, як правило, виведення ВВ з експлуатації для проведення ряду діагностичних тестів з метою встановлення поточних характеристик та параметрів вимикача. На основі результатів цих спостережень (зібраної інформації), які обов'язково порівнюються зі спостереженнями «першого вмикання/вимикання», приймається рішення про терміни та види подальшого ТО, що забезпечує краще використання коштів і виконання послуг з ТО. CBM, являючи собою прообраз нової інформаційної технології, є більш практичним і ефективним для ВВ. Однак використання усієї отриманої інформації вимагає від її користувача певного рівня знань, відсутність яких може привести до некоректного оцінювання технічного стану вимикача, особливо аварійного, що є проміжним між справним і пошкодженим. Неправильне тлумачення результатів спостережень може стати причиною непотрібного ТО і зростання витрат на нього.

Додаткова проблема CBM, особливо для ОЕС України, пов'язана з відсутністю відповідної сучасної нормативної бази, яка б чітко регламентувала порядок дій, перелік діагностичних тестів та інформації, яку потрібно зібрати під час проведення ТО. Через це, обслуговуючі компанії використовують різноманітне обладнання та різні діагностичні тести для отримання потрібних характеристик та параметрів. До загального, усталеного переліку таких тестів при виконанні CBM відносяться вимірювання динамічного опору руху контактів, опору котушки вмикання/вимикання, кута діелектричних втрат зрівнювальних конденсаторів, опору фарфорового ізолятора, тести мінімальної напруги живлення котушки, синхронності операцій вмикання/вимикання фазних вимикачів, визначення стану діелектрика, а також запис та аналіз кривої руху основних контактів, струмів котушки вмикання/вимикання, струму привідного

механізму [49, 80]. Можливе проведення додаткових діагностичних тестів, які передбачають аналіз вібраційних [84, 91] чи акустичних [64] сигналів, отриманих за операцій вмикання/вимикання та ін.

RCM є найскладнішою і найбільш повноцінною стратегією ТО, що ґрунтується на аналізі наслідків відмов та пошкоджень, їх ймовірності та витрат коштів на ТО [49]. Під час RCM здійснюється детальна оцінка ризиків відмов і відмов вузлів. Потенційні види відмов мають власний пріоритет відповідно до ризику їх виникнення та наслідків. RCM може застосовуватися як до самого вимикача (як складної структури) [107], так і до ВВ в сукупності з іншим обладнанням ПС [87] та (або) з СМ технічного стану вимикача [59].

Одним з інструментів, який може забезпечити значний внесок в стратегії ТО, особливо СВМ та RCM є неперервний онлайн моніторинг (локальний, віддалений, централізований) параметрів та стану ВВ. Такий моніторинг забезпечує неперервну і одночасну фіксацію значної кількості змін в часі багатьох процесів, характеристик і параметрів вимикача та їх порівняння з допустимими чи еталонними значеннями, що надає можливість оцінювання стану вимикачів без виведення їх з експлуатації, що є надто важливим, оскільки це значно покращує ефективність і економічність ТО.

В міжнародній практиці вибір моніторингу виконується, як показано в попередньому підрозділі, у відповідності до вимог та рекомендацій стандарту [73]. Окрім представлених декількох методологій вибору варіанту моніторингу в ньому також подано приклади різних програм обслуговування ВВ за наявності та відсутності моніторингу, що допомагає зробити обґрунтований вибір напрямків модернізації ТО (стратегії, задач та інтервалів) ВВ.

1.4 Пристрої та системи моніторингу високовольтних вимикачів

З метою визначення актуальних питань побудови і перспективних напрямків вдосконалення СМ ВВ нижче коротко подано результати огляду

функціональних характеристик і можливостей вже впроваджених в світовій практиці систем.

Усі існуючі пристрої і СМ ВВ використовують сигнали різної фізичної природи, отримувані від датчиків, побудованих з використанням різних фізичних ефектів. Зібрані від датчиків сигнали підлягають обробці та аналізу для визначення технічного стану чи КР вимикача. Дві з таких систем, а саме - мікропроцесорні СМ і прогнозування залишкового ресурсу високовольтних повітряних [19] і елегазових [17] вимикачів розроблено і впроваджено в Україні. Серед закордонних розробок насамперед слід вказати на промислові зразки СМ ВВ таких всесвітньо відомих фірм, як Alstom [108] та Elcon [51].

Окремі відомості про закордонні прототипи таких систем подані в працях [53, 58, 82, 92, 94, 103 та ін.]. Так, в [94] йдеться про систему онлайн моніторингу високовольтних ЕВ, що здійснює контроль їх ізоляційних характеристик на ПС 6,6 кВ. Обробка сигналів датчиків щільності і вологості елегазу здійснюється з використанням вейвлет-перетворення і емпіричної формули стану елегазу Бітті-Бріджмена. В [58] повідомляється про розробку пристрою онлайн моніторингу механічного стану ВВ з пружинним приводом на основі контролю часових характеристик положення його основних контактів і їх порівняння з заздалегідь запрограмованими часовими проміжками. Пристрій також дозволяє відстежувати час заведення пружини і здійснювати перевірку функціональності демпфера. В [48] розповідається про систему тестування стану ВВ, побудовану на основі використання ARM (Acorn risc machine) архітектури процесора. Система контролює швидкісні характеристики рухомого контакту і струму котушки ввімкнення вимикача. Для обробки сигналів використано дискретні вейвлет-перетворення. Цікавим є пристрій, розроблений на основі комбінації чіпів з архітектурами ARM та FPGA (field-programmable gate array) [92]. FPGA використовуються для запису та обробки струмів соленоїдів ввімкнення/вимкнення, струму приводу та вібраційних сигналів, в той час як ARM – для фіксації стану заземлення, положення ввімкнено/вимкнено, запасу енергії приводу і для керування перемикачними. Дані з обох чіпів збираються і

обробляються за допомогою методу розкладання на емпіричні моди. Результати розкладу аналізуються за допомогою теорії нечіткої логіки та методу опорних векторів для прийняття висновку про стан ВВ. В праці [103] для моніторингу стану вимикача розроблено прототип СМ, що складається з модуля збирання даних, вторинних перетворювачів, які отримують дані з трансформаторів струму та напруги, датчиків тиску, температури та щільності елегазу і мікрокомп'ютера для збереження даних. Щодо обробки цих даних і отримання з них деяких параметрів з метою встановлення стану вимикача в праці нічого не описано.

Огляд та аналіз існуючих розробок СМ ВВ показав, що для усіх них характерним є реалізація лише певної обмеженої кількості моніторингових процедур, контроль незначної кількості параметрів, локальне використання лише окремих діагностичних ознак, методів фільтрації та обробки сигналів, тобто ще існує значна кількість областей моніторингу стану ВВ, які є мало дослідженими, а їх вплив на якість та точність моніторингу стану вимикача практично не враховується. Виходячи з цього, нижче розглянуто актуальні питання, які необхідно вирішувати при створенні СМ ВВ.

Відповідно до визначених вище можливих видів пошкоджень та відмов вимикачів основними джерелами інформації про їх стан є приводи, котушка вмикання/вимкнення, дугогасні камери, механічні кріплення, коло керування та внутрішнє середовище. Детальний перелік контрольованих елементів, процесів і фізичних величин ВВ подано в табл. 1.4.

Таблиця 1.4

Елементи, процеси і фізичні величини, що підлягають моніторингу

Об'єкт контролю	Контрольований процес	Фізичні величини, характеристики процесу, параметри
1	2	3
Блок керування		- час дії допоміжних контактів «а» - час дії допоміжних контактів «б» - час дії експлуатаційних контактів - перехідний час фіксації

Продовж. табл. 1.4

1	2	3
Гідравлічний привід	Витік оливи	- тиск
Пружинний привід	Заведення пружини Змащення засувки	- струм заведення пружини - час заведення пружини - число запусків двигуна - форма кривої струму - максимальне значення струму - напруга живлення двигуна
Дугогасна камера	Іскріння контактів, знос контактів, рух контактів, удар контактів, положення контактів, корозія контактів	- швидкість руху контактів - швидкість включення контактів - час горіння дуги - час відключення вимикача - середній час відключення контактів - середній час включення контактів - час включення контактів - час відключення контактів - відстань - опір контактів - довжина електричного розриву - опір металічних контактів - опір дугового контакту - довжина дугового контакту - опір між рухомим і нерухомим контактами - напруга на контактах
Механічні кріплення	Вібрація, удар, шум, рух	- періодограма вібраційного або акустичного сигналу
Ізоляційне середовище	Витік елегазу, зміна щільності і вологості елегазу	- вологість - щільність - температура - рівень витоку
Нагрівальні елементи	Нагрівання	- струм - тривалість

Продовж. табл. 1.4

1	2	3
Котушки вмикання/вимкнення та допоміжні контакти	Струми котушок вмикання/вимкнення та положення допоміжних контактів	- струм котушки - час збудження - час зменшення струму - час відключення допоміжних контактів - сумарний час подачі енергії - час дії допоміжних контактів - час дії експлуатаційних контактів - перехідний час фіксації - напруга живлення котушки - повний опір котушки - несинхронність перемикань - безперервність кола

Одне з найважливіших місць в діагностиці та моніторингу вимикачів займає дослідження їх механіки. Ключовими компонентами в цьому є струми котушки вмикання/вимикання: кожної з фаз і резервної. Встановлення кореляції параметрів цих струмів з характеристиками пошкоджень вимикача дозволяє використовувати їх як індикатори стану, виявляти і попереджувати такі можливі пошкодження приводів як корозія і надмірне забруднення електромагнітів, неналежне змащення засувки, деформація контактів ланцюгів керування [52, 90, 97]. Моніторинг параметрів струму котушки вимкнення дозволяє контролювати час і швидкість вимкнення вимикача, тобто величини, що безпосередньо пов'язані з тривалістю гасіння дуги. Перевищення заданої уставки часу гасіння електричної дуги свідчить про розбалансованість механічної частини пневматичного дугогасного пристрою [34]. За характеристиками струму котушки вмикання/вимикання і часом дії допоміжних контактів можна в реальному часі точно встановити якість функціонування електромагнітів та стан робочого механізму вимикача.

Дані, отримані в результаті вимірювання і обробки кривої руху основних контактів в поєднанні з іншими параметрами дають інформацію про механічне

навантаження (удар) на амортизатор (буфер), швидкість та стабільність руху контактів та вимикаючу спроможність вимикача. На технічний стан вимикача і його здатність до подальших дій вказують також електричний опір основного шляху струму, максимальний хід і максимальна швидкість рухомого контакту, час переривання головних (дугових) контактів (від подачі команди до з'єднання), час електричного розриву контактів [27, 45].

Ерозія контактів, що супроводжується втратою їх маси і зміною форми, може бути причиною раннього виникнення дуги, збільшення часу її горіння та розмивання сопла, впливаючи таким чином на продуктивність вимикача [86].

Важливою інформацією про стан вимикача є гучний шум і вібрація під час його роботи [110]. Вібраційні та акустичні сигнали, згенеровані вимикачем впродовж операцій вмикання/вимикання, замикання/розмикання контактів в певній точці їх ходу, можуть вказати на знос дугогасильних контактів, незадовільне демпфірування, послаблення механічних кріплень, послаблення основних болтів та розпірок, брак в змащуванні засувки, механічні залипання з'єднувальних елементів, зношення електромагніту [90, 91]. Моніторинг щільності, вмісту вологості та тиску елегазу, тобто параметрів які характеризують ізоляційні властивості вимикача, дозволяє контролювати герметичність камери з елегазом і вплив вологи та продуктів розкладу газів на надійність, комутаційну здатність і термін його служби.

Як видно з табл. 1.3 до переліку діагностичних параметрів входять параметри, що виражаються як електричними, так і неелектричними величинами, одержувані в результаті вимірювань. Серед них є такі, що характеризують стан декількох вузлів чи деталей, і такі, що відносяться лише до однієї деталі, вузла чи елемента. Взагалі існує надто велике число діагностичних параметрів і відповідних їм діагностичних ознак, урахування яких при визначенні технічного стану вимикачів є однією з основних труднощів реалізації їх онлайн моніторингу. Це і пояснює чому сучасні теоретичні дослідження в галузі визначення технічного стану ВВ проводяться в декількох не пов'язаних між собою напрямках, в кожному з яких розглядаються різні найуразливіші структурні

частини вимикача, різні їх пошкодження та процеси, що їх супроводжують (діагностичні ознаки) і діагностичні параметри, за результатами моніторингу яких можна визначити технічний стан без виведення його з експлуатації та розбирання.

Отже, визначення і обґрунтування оптимального набору діагностичних параметрів і границь їх зміни конкретного типу вимикача, що забезпечить повноцінне визначення його технічного стану є однією з актуальних задач побудови СМ ВВ і керування його технічним станом.

1.5 Методи обробки даних моніторингу параметрів і технічного стану вимикачів

Велика кількість різних за характером, місцем знаходження, дією і впливом на надійність і працездатність можливих видів пошкоджень вимикачів зумовлює необхідність контролю значної кількості їх елементів і окремих деталей, процесів, характеристик і фізичних параметрів. Процеси та сигнали, які підлягають аналізу під час визначення технічного стану вимикачів, дуже різняться своїми часовими та частотними характеристиками, містять значну кількість шумів електромагнітної, вібраційної та акустичної природи, джерелами яких є високовольтне обладнання електричної ПС, в багатьох випадках для них характерні перепади, гострі піки, зміни в часі спектрального складу, тощо. Зокрема, струм котушки вмикання/вимикання окрім інформації про механічний та електричний стан кіл управління вимикача містить електромагнітний шум з можливими раптовими імпульсами [54, 112]. Аналіз праць [52, 55-57, 60, 64, 90, 93, 105, 106, 111] свідчить про те, що у вібраційних сигналах, виміряних за допомогою акселерометрів за операцій вмикання/вимикання, міститься значна кількість вібраційного шуму, сила впливу якого на результат оцінювання механічного стану вимикача суттєво залежить від задіяних методів очищення вібраційного сигналу. У випадку використання акустичних сигналів, виміряних

за операцій вмикання/вимикання за допомогою мікрофонів ємнісного типу, вся якісна інформація про механічний стан вимикача знаходиться в діапазоні (500-3000) Гц, а енергія акустичного шуму в сигналі розподіляється основному в діапазоні до 500 Гц [110]. Окрім шуму, спричиненого обладнанням високовольтної ПС (внаслідок іонізації повітря високою напругою; згенерованого намагнічуванням магнітопроводів силових трансформаторів; створеного електричною дугою, особливо в аварійному режимі при розмиканні основних контактів вимикача), можлива присутність акустичного шуму викликаного такими природними явищами як вітер чи гроза, що також дещо ускладнює процес моніторингу механічного стану вимикача. Присутність шуму в сигналі суттєво ускладнює і вносить похибки у визначення його інформативних параметрів (див. табл. 1.4), які слугують діагностичними ознаками пошкоджень вимикача. З наведеного випливає, що необхідною умовою отримання якісної інформації про технічний стан вимикача є обов'язкове очищення вимірюваних сигналів від шуму.

Зазначені види шуму можна відфільтрувати шляхом застосування традиційних цифрових фільтрів [110], або як показано в працях [54, 56, 93] застосуванням доволі нового та ефективного методу цифрової фільтрації, а саме вейвлет-розкладу сигналу із застосування методів м'якого або жорсткого порогового значення до отриманих в результаті його розкладу складових. Для фільтрації можливих у струмах котушки вмикання/вимикання імпульсів в роботі [112] запропоновано застосувати фільтр, який базується на базових операціях теорії математичної морфології – відкриття та закриття.

Після очищення сигналів від завад, наступним етапом є визначення інформативних (діагностичних) параметрів, які б дали можливість зробити висновок про наявність тих чи інших пошкоджень вимикача. Спектр сучасної методології та теорій в даному контексті є досить широким. Зокрема, в праці [110] запропоновано біспектральний аналіз та перетворення Гільберта-Хуанга. За словами авторів, завдяки застосуванню біспектрального аналізу до акустичного сигналу можна виявляти пошкодження амортизатора основних

контактів вимикача, а також відмову пружинного приводу за умов недостатньо накопиченої енергії. Такі пошкодження та відмова характеризуються появою значної кількості додаткових пікових значень в плані біспектрального аналізу сигналу. Додатковим критерієм правильності зафіксованих пошкоджень, автори пропонують застосовувати перетворення Гільберта-Хуанга, базиси якого визначаються в результаті застосування до сигналу емпіричної модової декомпозиції. Далі за допомогою перетворень Гільберта розраховуються усі необхідні миттєві параметри базисів сигналу, включно і миттєва частота, а також енергії та ентропії енергій кожного базису. Аналіз ентропії енергії базисів також дає можливість зафіксувати пошкодження і пересвідчитись в його наявності.

В праці [52] перетворення Гільберта-Хуанга застосовано до вібраційних сигналів з метою встановлення наявності механічних пошкоджень ВВ, а також послаблення гвинтів кріплення ізолятора до фундаменту. Тут, подібно праці [110], розраховуються значення ентропії енергії і будується часо-частотний план ентропії енергії. Сигналізатором наявності пошкоджень є зміна ентропій енергії відносно плану, а також плану ентропій енергії вимикача в нормальному робочому стані. Перетворення Гільберта також використано в праці [64] для отримання аналітичного виразу вібраційного сигналу. До отриманого аналітичного сигналу застосовують миттєві вейвлет перетворення, що полягають в розкладі сигналу в різних масштабах та визначенні миттєвих амплітуд та частоти кожного з елементів його вейвлет-розкладу. Згідно тверджень авторів, таким методом легко визначати послаблення гвинтів кріплення ізолятора до фундаменту та послаблення фіксуючих розпірок. В праці [105] вібраційний сигнал пропонують розкладати за допомогою вейвлет перетворення, з подальшим визначенням аналітичного сигналу кожної складової за допомогою перетворень Гільберта. Розраховуються миттєві амплітуди аналітичних сигналів, і сигнал ділиться вздовж осі часу на N частин. Для кожної частини миттєвої амплітуди всіх етапів вейвлет-розкладу визначаються характеристичні ентропії, які порівнюються з відповідними розрахованими значеннями нормального стану

вимикача. Результат порівняння дає можливість зробити висновок про наявність механічних пошкоджень.

Для виявлення різних пошкоджень, таких як руйнування амортизатора, послаблення гвинтів, перехід буферної пружини за крайнє положення, брак мастила в замковому з'єднанні, пошкодження механізму з'єднання приводу з основними контактами, залипання зажимних елементів в працях [55, 57, 89, 90, 111] використовують вейвлет перетворення вібраційних сигналів, тобто розклад та визначення енергій або ентропії енергій сигналів кожного етапу розкладу. Кожне з цих пошкоджень характеризуються в сигналах вібрації своїми певними частотними спектрами та амплітудами. Найбільш цікавою з зазначених праць є праця [90], де окрім характеристичної вейвлет-ентропії та спектральної вейвлет-ентропії енергії, додатково розраховуються сингулярна спектральна ентропія та ентропія спектральної потужності. За словами авторів одночасний аналіз декількох ентропій дає можливість запобігти отриманню неправильних висновків щодо пошкоджень елементів, оскільки різні типи пошкоджень можуть характеризуватися близькими один до одного частотними спектрами, які навіть можуть частково перекриватися. Для того, щоб уникнути помилкових висновків щодо причин механічних пошкоджень запропоновано формувати власні вектори ентропії, які порівнюються з граничними власними векторами з встановленими межами для різних типів пошкоджень.

Звісно, вимірювання вібраційних та акустичних сигналів та моніторинг параметрів, отриманих в результаті обробки цих сигналів перетвореннями Гільберта-Хуанга та (або) вейвлет перетворення є і буде досить перспективним напрямком майбутніх досліджень та практичних розробок. На даний момент цей напрямок є ще мало розвинутим і дослідженим, оскільки необхідний час для збору інформації про механічні пошкодження вимикачів з одночасним аналізом вібраційних сигналів за таких пошкоджень, встановлення кореляційних зв'язків між типом пошкодження чи відмови вимикача та появою чи зміною при цьому певних параметрів або характеристик сигналів, що підлягають аналізу.

В працях [54, 92, 98, 112] показано, що крива руху основних контактів вимикача, особливо в поєднанні з очищенням від шуму та імпульсів струмом котушки вмикання/вимикання, містить багато важливої інформації про механічний стан вимикача та стан його кола управління. Аналіз струму та кривої руху відбувається в часовому просторі. Фіксується значення певних пікових точок цих кривих та моменти їх настання, а також тривалість горіння дуги, швидкість замикання контактів, швидкість розмикання контактів, відстань, яку проходить основний рухомий контакт. Моніторинг зміни цих параметрів за тривалої експлуатації вимикача дає можливість зробити висновки про стан та опір котушки вмикання/вимикання, стан допоміжних контактів, необхідність в змащуванні мастилом засувки та плунжера та ін.

Важливою характеристикою технічного стану ЕВ, насамперед стану дугогасних пристроїв і головних контактів, є його залишковий КР, плинне значення якого визначається в процесі експлуатації як різниця між кількістю можливих циклів відключення вимикачем номінального струму, що вказана заводом-виготовлювачем і кількістю таких циклів, які зможе виконати вимикач після кожного чергового спрацювання. Огляд використовуваних для визначення залишкового КР ЕВ методів, а також один з можливих шляхів підвищення точності і вдосконалення методики визначення залишкового комутаційного ресурсу ЕВ та його моніторингу подано в праці [41].

Виходячи з наведеного вище, приходимо до висновку про те, що окремі діагностичні параметри, які отримані в процесі математичної обробки вимірних різних фізичних величин та контроль їх змін в часі дають можливість оцінювання поточного технічного стану лише окремих складових вимикача та його кола управління. За таких умов висновок про технічний стан ВВ є досить локальним, оскільки окрім використаних при цьому діагностичних параметрів існує ряд інших величин та параметрів (див. табл. 1.4), зміна яких в процесі експлуатації вимикача також може впливати на точність визначення його технічного стану. Глобальний і повноцінний висновок про технічний стан вимикача може бути отриманий шляхом злиття усіх контрольованих параметрів

в одне ціле з метою урахування їх впливу на технічний стан ВВ і виконання їх комплексного аналізу.

Спроби створення таких експертних систем з використанням сучасних різноманітних математичних теорій та методів, включно і комбінацій методів обробки даних частково описані в працях [46, 57, 61-63, 81, 92, 97, 98, 111]. В найбільш цікавій з цих праць [98] описана в методологія ймовірнісного оцінювання технічного стану ВВ на основі інтелектуального аналізу даних онлайн моніторингу струму котушки вимкнення і часових даних допоміжних контактів. Такий аналіз передбачає визначення числа діагностичних ознак з найменшою кореляцією з використанням коефіцієнту Пірсона, подальше групування ознак з різними рівнями подібності в значимі кластери методом агломераційної кластеризації та інтерпретацію результатів кластеризації з ймовірнісної точки зору, тобто використання ймовірнісного класифікатора одного зі станів вимикача: нормального, тривоги і надзвичайного (аварійного). Будь-які нові дані, які надходять в результаті моніторингу стану вимикача, порівнюються з даними кластеризації і робиться висновок про технічний стан вимикача. Це дозволяє вирішити ще одну актуальну задачу в галузі моніторингу – усунення залежності схеми прийняття рішень від знань та досвіду користувача, оскільки некоректне оцінювання стану вимикача може привести до непотрібного обслуговування та збільшення його вартості.

В праці [63] досить поверхнево описана спроба оцінювання технічного стану вимикача на основі використання теорії хмари до злитих в одне ціле різних контрольованих величин (швидкість, відстань, кількість операції), тому дати оцінку значимості цієї праці важко. В праці [57] використано метод опорних векторів, який дозволяє класифікувати дані на основі теорії статистичного навчання. Основним принципом методу є визначення оптимальних гіперплощин класифікації даних відповідно до встановлених вимог. Далі за допомогою алгоритму навчання будується функції рішення. В статті використано алгоритм послідовного навчання для створення функції рішення і відповідно таким чином, було розроблено дві функції рішення, перша з яких аналізує дані діагностичних

параметрів, отримані в результаті обробки вібраційних сигналів, а інша – параметри струмів котушки вмикання/вимикання.

В праці [111] застосований такий же підхід, проте функція рішення побудована тільки для параметрів вібраційних сигналів. В праці [97] застосовано теорію нечіткої логіки до параметрів котушки вмикання/вимикання з найменшими кореляційними зв'язками. Зокрема, параметри струму котушки аналізуються за допомогою ймовірнісних функцій розподілу цих параметрів, далі ці ймовірнісні дані підлягають аналізу методами нечіткої логіки, що складається з чотирьох етапів: підготовка ймовірнісних даних з метою застосування методів нечіткої логіки; встановлення нечіткого логічного висновку; отримання нечітких вихідних даних та перетворення даних нечіткої логіки в фактичні числові значення, які вказують на технічний стан вимикача. Застосування теорії нечіткої логіки для оцінки технічного стану вимикача також розглядається в працях [81, 92].

Застосування штучної нейронної мережі для розпізнавання пошкоджень та оцінювання технічного стану вимикача описано в праці [46], де використано нейронну мережу з радіально базисною функцією, що за словами авторів при надходженні невідомих для мережі значень параметрів не робитиме помилкових рішень на відміну від нейронної мережі зі зворотнім поширенням. Входом в мережу є набір різних параметрів, які обробляються мережею, а на виході отримується інформація про стан вимикача. Поєднання теорії нечіткої логіки з можливостями штучних нейронних мереж запропоновано в працях [61, 62], що за словами авторів є найбільш ефективним рішенням з метою оцінки технічного стану вимикача.

Грунтуючись на результатах наведеного огляду приходимо до висновку про необхідність реалізації в експертних СМ параметрів та технічного стану вимикача трирівневої обробки вхідних даних: I етап – цифрова фільтрація (очищення від завад); II етап - обробка очищених даних та визначення тенденцій їх зміни відносно даних баз даних; III етап – комплексний аналіз тенденцій змін інформативних даних і прийняття рішення щодо технічного стану вимикача.

1.6 Висновки до розділу

Онлайн моніторинг є важливою складовою комплексної автоматизації та інтелектуалізації високовольтних електричних мереж і ключовою проблемою в провадженні прогресивних систем обслуговування ВВ.

Встановлено, що існує великий різновид методів онлайн моніторингу технічного стану вимикачів, які характеризуються різними рівнями проробки і наукового обґрунтування, різними можливостями, складністю та вартістю використання. Серед них найбільш використовуваними є часово-частотні методи, зокрема вейвлет-перетворення, використання яких відкриває нові можливості в онлайн моніторингу технічного стану вимикачів.

Для побудови систем моніторингу ВВ важливими є наступні питання [22]:

- розробка національної системи нормативно-правового забезпечення моніторингу електротехнічного обладнання, включно і моніторингу ВВ;
- створення давачів, здатних вилучати ПМ в режимі реального часу з прийнятними точністю та вартістю;
- накопичення більшого досвіду і знань про зв'язки між станом вимикача і його вимірюваними параметрами;
- вибору контрольованих ПМ і відповідних їм діагностичних ознак;
- розробки, вибору і наукового обґрунтування ефективних математичних методів обробки та аналізу сигналів різного роду давачів інформації про робочий стан вимикача;
- реалізація системного підходу до моніторингу, охоплення ним максимальної кількості компонентів вимикача та розширення функціональних можливостей систем;
- розв'язання деяких протиріч в певних параметрах моніторингу, що створюють труднощі при прийнятті рішень, щодо обслуговування вимикачів.

Вирішення зазначених задач забезпечить підвищення технічної досконалості моніторингових систем, сприятиме успішній реалізації нової прогностичної стратегії технічного обслуговування ВВ, а відтак і підвищенню

надійності, безпеки і ефективності функціонування електроенергетичної галузі країни.

Посилання: [3-9], [12-14], [17], [19], [22], [24], [27], [32], [34], [36], [37], [41], [43], [45-75], [78], [80-82], [84], [86], [87], [89], [90-94], [97], [98], [100-112], див. список використаних джерел стор. 127-139.

РОЗДІЛ 2

ВДОСКОНАЛЕННЯ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МЕХАНІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕГАЗОВИХ ВИМИКАЧІВ

2.1 Джерела інформації про технічний стан механічних елементів вимикача

ВВ є критично важливим обладнанням в ЕЕС. Вони слугують зв'язком між генерацією та споживанням електроенергії, відповідно надійність і продуктивність їх функціонування в значній мірі впливає на надійність та стабільність самої ЕЕС. З метою забезпечення надійної і стабільної експлуатації ВВ проводиться їх регулярний огляд та обслуговування, що є не завжди економічно виправданим, оскільки відбувається або надлишок обслуговування або воно недостатнє, результатом чого є можлива відмова вимикача.

Узагальнена статистика пошкоджень ВВ, що подана в праці [28] свідчить про те, що найбільш ймовірними чинниками відмови вимикача є механічні пошкодження, тобто зношення елементів привідного механізму і контактної системи. Застосування СМ параметрів вимикача дозволяє отримувати значний перелік корисної інформації про технічний стан у вигляді ПМ, подальша обробка якої дозволяє не тільки виявляти можливі пошкодження окремих частин вимикача, але й заздалегідь прогнозувати можливі відмови без виведення його з експлуатації. Зазначимо, що під ПМ розуміється властивість (величина) об'єкту моніторингу обрана для його спостереження та оцінювання стану в часі або просторі [31]. Згідно [79] величина – це властивість явища, тіла чи речовини, коли ця властивість має розмір, який може бути виражений числом з вказаною відмітною ознакою. Нею може бути одиниця вимірювання, методика виконання вимірювання, стандартний зразок або ж їх комбінація.

Технічний стан елементів і вимикача в цілому зазвичай визначається шляхом обробки даних вимірювання та моніторингу, отримуваних за процесів вмикання/вимикання вимикача. До джерел таких даних, вірніше джерел

інформації про ці процеси, відносяться котушки вмикання/вимикання [21, 33, 54, 83, 92, 95, 99, 102], основні [54, 96, 101] і додаткові контакти [85, 96] вимикача, ізоляційне середовище [39], механічні кріплення [54, 62, 64, 110].

Так в працях [83, 95, 98, 99, 102], де об'єктом дослідження є струми катушок вмикання/вимикання, аналізуються різні діагностичні показники, що пов'язані зі значеннями характерних точок кривих струмів (екстремумів) або ж з різними періодами часу, отримуваними в результаті цифрової обробки кривих цих струмів. В працях [54, 101] як джерело інформації використана крива руху основних контактів вимикача. В першій з них діагностичними показниками є швидкість руху основних контактів та відстань, яку вони проходять під час свого руху, в другій – тривалість специфічних чотирьох періодів часу, що характеризують рух контактів, та їх зміни в подальших операціях включення/відключення.

В ряді праць [85, 92, 96, 109] описані способи отримання ПМ на основі використання та аналізу інформації, отримуваної від двох джерел в їх різних комбінаціях. В [92] запропоновано спосіб отримання діагностичних параметрів шляхом поєднання інформації, отримуваної від струмів катушок вмикання/вимикання та кривої руху основних контактів вимикача, в [109] – струмів катушок та струму привідного механізму, в [85] – струмів катушок та положення допоміжних контактів, в [96] – кривої руху основних контактів та положення допоміжних контактів. Поглиблений аналіз зазначених праць показує, що не усі пропонувані і розглядувані в них контрольовані параметри і характеристики ВВ, що стосуються його блоку керування та приводного механізму і відповідні їм ПМ є достатньо обґрунтованими, інформативними та реально доступними для того, щоб їх використання в алгоритмі розпізнавання стану ВВ, реалізованому в СМ, забезпечило належну якість моніторингу.

Нижче представлено результати виконаного автором пошуку, обґрунтування і розробки методу та алгоритмів визначення нових ПМ технічного стану механічних елементів ВВ з пружинним приводом, використання яких в системах комплексного онлайн моніторингу забезпечить

підвищення інформативності моніторингу та достовірності даних про технічний стан ВВ, якості його ТО, а відтак і надійності [23].

2.2 Структура, фізичні процеси та функціонування блоку керування та привідного механізму вимикача

Кола керування вимикача це важлива складова і водночас проміжна ланка між диспетчером чи РЗ (ініціаторами процесів вмикання/вимикання) та самим вимикачем. Для ВВ з пружинним або з гідравлічним привідним механізмом традиційно застосовують різні типи кіл керування. В цій праці детально аналізуватимуться саме процеси у ВВ з пружинним приводом, хоча практично теж саме, тільки в інших часових рамках, відбувається у ВВ з гідравлічним привідним механізмом.

На рис. 2.1 зображена схема кіл керування вимикача з пружинним привідним механізмом для вимкненого стану. Як видно з рис. 2.1 коло керування складається з самої пружини (spring, S), двигуна для накопичення енергії в пружині (motor, M), додаткових контактів (auxiliary contacts, AC), котушок (соленоїдів) вмикання (close coil) і вимикання (trip coil) та РЗ від повторного замикання допоміжних контактів (anti pumping relay, AR) [98]. Котушки вмикання/вимикання є ідентичними та являють собою обмотку, навиту навколо сталевго осердя (плунжера), який здатний рухатись вздовж . Зміна положень контактів не відбувається миттєво, а з певною затримкою часу. Енергія, необхідна для операцій вмикання/вимикання, зберігається в пружині, яка стискається за допомогою електричного двигуна. Впродовж операції вмикання, пружина рухає валом керування, який приводить в дію систему тягових стержнів, спричиняючи при цьому переміщення основного рухомого контакту та заведення пружини вимикання. Пружина вимикання зберігатиме енергію до наступної події розмикання контактів (вимкнення вимикача).

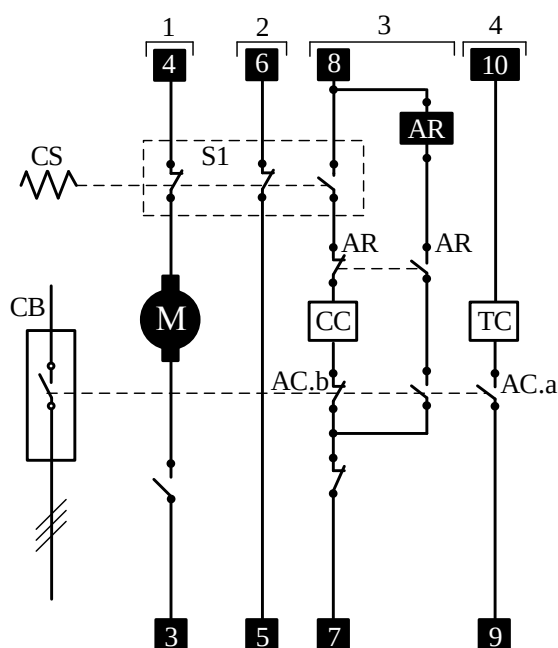


Рис. 2.1. Кола керування вимикача

Розглянувши основні елементи кола керування вимикача та їх функції розглянемо процес вимкнення (рис. 2.2) та визначимо його можливості, як джерела моніторингових даних про технічний стан вимикача. Ініціатором цього процесу є створений, безпосередньо РЗ, автоматикою чи опосередковано диспетчером бінарний сигнал (логічна одиниця), який подається в коло керування вимикача в момент часу t_0 . З невеликою затримкою часу $t_0 - t_1$ на контакти 9-10 кола 4 (рис. 2.1) подається напруга від акумуляторної батареї живлення вторинних кіл ПС. Оскільки додатковий контакт «а» є нормально замкнутим для режиму вимкнення вимикача, в колі 4 з моменту часу t_1 через котушку вимкнення починає протікати струм. Протікаючи через котушку струм створює в ній потокозчеплення, яке взаємодіючи з плунжером, утворює навколо нього електромагнітне поле та індукуює в ньому електромагнітну рушійну силу.

Внаслідок цього плунжер починає свій рух в бік засувки, який на початкових етапах є сповільненим через вплив на плунжер протидіючих електромагнітній рушійній силі в котушці сил тертя та земного тяжіння, що зменшує швидкість стрімкого зростання струму котушки. Відображенням цього є характерна початкова ділянка кривої струму котушки з дотичною 1 до неї.

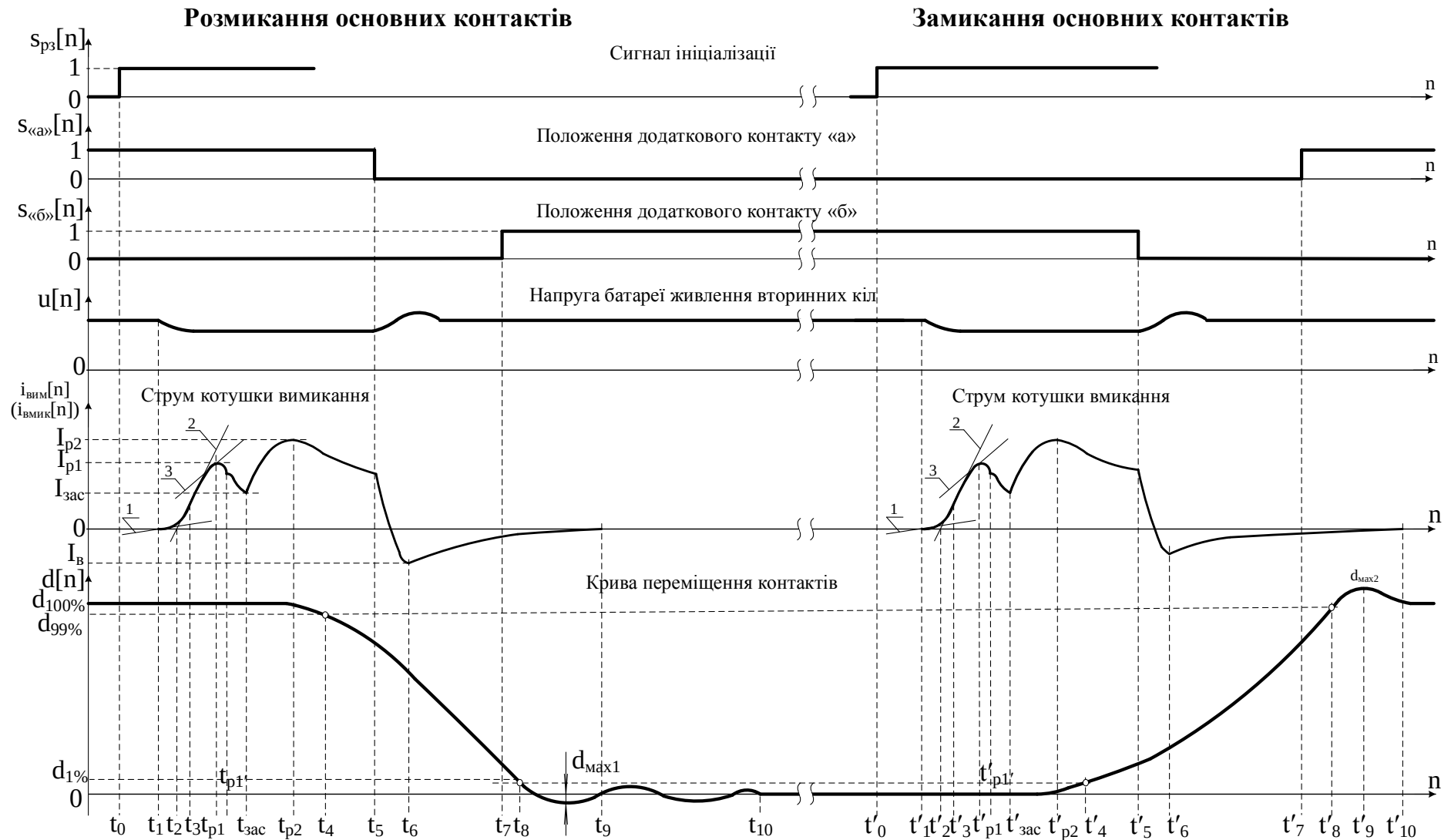


Рис. 2.2. Характеристики комутаційних операцій вимикача

При перевищенні створеними електромагнітним полем і електромагнітною рушійною силою протидіючих сил тертя та тяжіння рух плунжера стає рівномірним, а струм котушки зростає, на що вказує лінійна ділянка кривої струму з дотичною 2 до неї. По мірі виходу плунжера з котушки, електромагнітне поле між ними зменшується і відповідно зменшується електромагнітна рушійна сила, що спричинила рух плунжера. Проте вплив сил тяжіння та тертя на плунжер все ж таки залишається і це відобразатиметься на формі кривої струму котушки дещо повільнішим зростанням струму (дотична 3) і досягнення ним свого першого пікового значення I_{p1} .

Через інтервал часу $t_1 - t_{p1}$ плунжер досягає немагнітного штовхача або зажимної планки (в залежності від конструкції), які переміщують засувку. Поєднання інерційної маси плунжера з немагнітним штовхачем, планкою та основною засувкою спричиняє значну протидіючу електромагнітному полю силу і його послаблення, що відображається зменшенням значення струму до локального мінімуму $I_{зас}$. Інтервал часу $t_{p1} - t_{зас}$ – це час взаємодії плунжера з немагнітним штовхачем, зажимною планкою та засувкою. Повне зміщення засувки звільняє шлях плунжеру і відповідно він починає вільно рухатись під дією електромагнітного поля, що відображається на кривій струму різким зростанням його значення до глобального максимуму I_{p2} в момент t_{p2} .

В момент часу t_{p2} на плунжер починає діяти механізм стримування його руху і повернення в початкове положення, що відображається на кривій струму поступовим плавним зменшенням його значення на інтервалі $t_{p2} - t_5$.

Зміна положення засувки, звільняє накопичену енергію заведеної пружини вимикання і приводить в дію механізм керування ВВ. Відповідно починає рухатися основний рухомий контакт, а також, з певною затримкою часу, змінюється положення додаткового контакту «а» з стану замкнуто на стан розімкнуто.

Проміжок часу $t_{зас} - t_4$ відповідає часу реакції заведеної пружини та механізму керування щодо приведення в дію основного рухомого контакту. t_4 –

зафіксований момент проходження основним рухомим контактом деякої відстані від початкової позиції (наприклад, 1% чи 0,5% усього шляху), яка засвідчує початок його руху. Проміжок часу $t_{\text{зас}} - t_5$ це час реакції заведеної пружини та механізму керування щодо зміни положення додаткового контакту «а». Розмикання додаткового контакту «а» свідчить про зняття напруги з кола 4 (рис. 2.1) і зникнення електромагнітного поля, спричиненого дією напруги акумуляторної батареї живлення ПС.

При цьому під дією протидіючої електромагнітному полю сили утримувача плунжера відбувається його різке затягування (рух в зворотному напрямку) назад в котушку, цим самим індукуючи електромагнітну рушійну силу в котушці протилежну раніше створюваній. На кривій струму рис. 2.2 цей процес відображається різким зниженням значення струму і зміною його полярності на інтервалі часу $t_3 - t_6$. Далі плунжер перебуває в стані спокою. В проміжок часу $t_6 - t_9$ відбувається вільне затухання струму в колі з індуктивністю та опором, якими характеризується сама котушка.

Інтервал часу $t_4 - t_8$ можна вважати часом руху основних контактів. Момент часу t_6 відповідає 99% пройденої відстані основним рухомим контактом, тобто це момент, коли він практично дійшов положенню розімкнуто. Зрозуміло, що позиція рухомого контакту в момент t_8 не є його дійсною кінцевою позицією через можливі коливання контакту, проте таке визначення цього моменту, як і моменту початку руху контакту t_4 прийнято з метою уникнення неадекватних вимірювань і забезпечення їх єдності.

На проміжку часу $t_8 - t_{10}$ відбувається затухання коливань основного рухомого контакту, зумовлених дією його амортизатора.

Оскільки механізм керування поєднує в собі рухомий основний контакт та додаткові контакти «а» і «б», то після проходження основним рухомим контактом майже всієї відстані до положення вимкнено, змінює своє положення додатковий контакт «б» з стану «розімкнуто» на «замкнуто». В праці [96], для випадку, якщо криву руху не можливо зареєструвати (відсутній датчик), прямо

пропонується використовувати для аналізу тривалість часового проміжку $t_5 - t_7$, який відповідає часу зміни положень обох додаткових контактів.

Як вже було зазначено вище у випадку АПВ, або видачі опосередковано диспетчером команди за необхідності вмикання вимикача, буде сформований сигнал – логічна одиниця на замикання його основних контактів. Відповідно цей процес можна розглядати в новому часовому просторі, присвоївши початку сигналу ініціалізації момент часу t'_0 (права частина рис. 2.2). В цьому разі напруга від акумуляторної батареї живлення ПС подається на затискачі 7-8 кола 3 (рис. 2.1) і, оскільки положення додаткового контакту «б» є замкнутим, в колі 3 (через котушку вмикання) протікатиме струм. Далі в механізмі керування і механічних елементах вимикача відбуватимуться процеси, аналогічні тим, що описані вище для операції вимикання. Криві, що характеризують ці процеси показані на правій частині рис. 2.2.

2.3 Показники моніторингу механічних елементів вимикача

Розглянемо як оцінюються можливості представлених на рис. 2.2 окремих складових процесу вимкнення ВВ в отриманні моніторингових даних про технічний стан його механічних елементів – ПМ в працях різних авторів. Інтервал часу $t_0 - t_1$ від моменту видачі сигналу ініціації процесу вимкнення в коло керування вимикача до моменту подачі напруги від акумуляторної батареї живлення вторинних кіл ПС пропонується визначати лише в [83, 85], проте відсутня аргументація необхідності виконання цієї операції і не вказано, про що може свідчити цей ПМ. На думку автора цієї роботи збільшення цього часу чи перевищення його нормованого значення може вказувати на певні проблеми в контактній системі кола керування, наприклад, про залипання контактів, тощо).

В працях [95, 98, 99] для діагностування механічних відмов вимикача пропонується визначати перше пікове значення струму котушки I_{p1} , а також час його досягнення як інтервал часу $t_0 - t_{p1}$, який включає в себе і інтервал $t_0 - t_1$, що не дозволяє ідентифікувати останній окремо. А це важливо, оскільки аналіз відхилення дотичної 1 до кривої струму (похідної струму) на її початку від

нормального положення може виявити зростання сили тертя, яка діє на плунжер і уповільнює його рух на початковому етапі, а відповідно вказати про необхідність поповнення чи заміни мастила. Стрімке і рівномірне зростання струму на інтервалі $t_1 - t_{p1}$, тобто від моменту початку руху плунжером до моменту досягнення ним немагнітного штовхача чи зажимної планки, свідчатиме про практичну відсутність впливу сили тертя на рух плунжера. Зазначимо, що такі ПМ як похідні струму котушки, відповідні дотичним 1, 2, 3, можуть свідчити не лише про зміни сили впливу тертя на рух плунжера і брак мастила (за умов сталої напруги живлення і незмінного опору котушки), а також і про зміни електричного опору котушки (за умов стабільності впливу сили тертя на рух плунжера).

В [102] пропонується фіксувати як ПМ час спрацювання засувки який визначається як час від моменту t'_{p1} раптового зменшення швидкості плунжера після його удару в засувку, який належить часовому проміжку $t_{p1} - t_{зас}$, до моменту $t_{зас}$, досягнення ними двома упору. Як видно з рис. 2.2 на кривій струму котушки цей процес відображається майже непомітним горизонтальним відрізком. Це не універсальний і непродуктивний ПМ, оскільки його значення залежить від типу приводу, в якому може бути плунжер і засувка або плунжер, штовхач і засувка. До того ж він важко ідентифікується математичними методами. Натомість доцільно визначати час спрацювання засувки (час взаємодії плунжера з немагнітним штовхачем, зажимною планкою і засувкою $t_{p1} - t_{зас}$), як інтервал між моментом досягнення струмом першого пікового значення I_{p1} і локального мінімуму $I_{зас}$. Збільшення періоду цього часу сигналізуватиме про появу певних проблем, пов'язаних з цими елементами (залипання засувки, необхідність заміни мастила, ін.). При цьому також доцільно здійснювати паралельний контроль значення $I_{зас}$, оскільки його зменшення при наступних розмиканнях основних контактів, зменшення свідчатиме про більшу протидіючу силу інертній масі плунжера та електромагнітній силі, яка призводить його рух.

Збільшення періоду часу $t_{\text{зас}} - t_4$ між моментом зміни положення засувки $t_{\text{зас}}$ і моментом початку руху основним контактом t_4 і періоду $t_{\text{зас}} - t_5$ між моментом зміни положення засувки $t_{\text{зас}}$ і моментом t_5 зміни положення додатковим контактом «а» може свідчити про певні недоліки в механізмі керування, який складається з набору стержнів та їх з'єднань, втрату пружиною еластичності або залипання додаткового контакту.

За умов відсутності датчика руху основного контакту для визначення таких ПМ в онлайн режимі стану привідного механізму і кола керування ВВ як інтервал часу $t_4 - t_8$ від моменту t_4 початку руху основного контакту до моменту t_8 досягнення кривою руху мінімального значення (операція вимкнення) та інтервал часу від моменту t'_4 початку руху основного контакту до моменту t'_8 досягнення кривою руху максимального значення (операція вмикання) в праці [96] пропонується контролювати періоди часу дії додаткових контактів. Отже, йдеться про використання наближених значень зазначених ПМ, оскільки в такому разі не враховується затримка часу від початку руху основного контакту t_4 до зміни положення додаткового контакту t_5 .

В працях [92, 99] для оцінювання стану вимикача через струми його котушок вмикання/вимикання пропонується як ПМ друге пікове значення струмів I_{p2} , але не говориться на які дефекти чи відмови в механічних елементах вимикача цей ПМ може вказати. Дійсно, це є характерна точка на кривій струму, яка розмежовує дві важливі для моніторингу ділянки, аналіз особливостей яких може бути джерелом корисної додаткової інформації. Перша з них – це зростання струму до максимуму на інтервалі $t_{\text{зас}} - t_{p2}$, що характеризує вільний рух плунжера під дією електромагнітного поля котушки після повного зміщення засувки, друга – це повільне спадання струму на інтервалі $t_{p2} - t_5$, що характеризує силу, стримуючу рух плунжера і повернення його в початкове положення після повного зміщення засувки.

Корисну інформацію про стан вимикача можна також отримати контролюючи значення локального мінімуму струму $I_{\text{зас}}$ котушки, що відповідає моменту повного зміщення засувки. Зменшення значення цього мінімуму

порівняно з його нормальним значенням вказуватиме на зростання сили, протидіючої інертній масі плунжера та електромагнітній силі, яка спричиняє його рух.

На думку деяких дослідників ПМ можуть бути момент t_3 зміни t_7 від моменту t_3 розмикання додаткового контакту «а» до моменту t_7 повного затухання струму котушки [102], інтервал $t_4 - t_8$ – час руху основного контакту під час операції відмикання – час між вибраними точками 99% і 1% на кривій руху контакту, інтервал $t'_4 - t'_8$ – час руху основного контакту під час операції замикання [101, 102]. При цьому не вказано, на які конкретні пошкодження чи відмови може вказувати зміна значень розглядуваних в них ПМ.

Автор цієї роботи вважає за доцільне визначати з цієї останньої ділянки кривої струму котушки такі величини як період $t_6 - t_9$ від моменту досягнення плунжером стану спокою t_6 до моменту t_9 повного затухання струму котушки вимкнення (досягнення ним нульового значення), значення глобального мінімуму струму I_b в момент t_6 зупинки плунжера, а також значення напруги в момент зміни положення додаткового контакту «а». Знання цих величин часу дозволить розрахувати постійну часу затухання струму котушки, що визначається співвідношенням її активного опору та індуктивності, а зміни значення цього ПМ при подальших операціях може стати свідченням, наприклад, появи короткозамкнених витків в котушці. Крім того, зміна складових електричного опору котушки – активного опору та індуктивності чи їх співвідношення при подальших перемиканнях в свою чергу призведе до зміни значень усіх інших, пов'язаних зі струмом котушки, ПМ. Це вказує на важливість здійснення моніторингового контролю постійної часу затухання струму котушки для оцінювання стану механічних елементів вимикача.

В праці [83] зазначається, що для розрахунку сталої часу котушки можуть бути використані перше пікове значення струму котушки I_{p1} та інтервал часу $t_1 - t_{p1}$, однак з цим важко погодитися, оскільки в такому разі не враховується вплив на струм котушки додаткового електромагнітного опору, спричиненого рухом плунжера.

Фіксація моментів t_4 і t_8 та часового проміжку $t_4 - t_8$ має бути важливою операцією моніторингу, оскільки дозволить визначити швидкість руху основних контактів. Збільшення часу руху основних контактів в операції вимкнення, тобто зменшення їх швидкості – сигналізуватиме про довший час горіння дуги і відповідно швидшу ерозію основних контактів, або про можливе зростання сил тертя. І навпаки – зменшення часу руху основних контактів в операції вмикання, свідчитиме про збільшення швидкості руху основних контактів і буде сигналом про сильніший від нормального удар основного рухомого контакту в амортизатор і зростання його механічного напруження.

На можливість використання для контролю стану амортизатора часу руху основних контактів $t_4 - t_8$ за операції вимкнення, тобто інтервалу часу між вибраними точками 99% і 1% на кривій їх руху вказується в праці [101]. Зміна значення цього ПМ порівняно з нормальним його значенням може свідчити послаблення дії амортизатора.

На думку автора для контролю стану амортизатора важливо і можливо контролювати період часу затухання вільних коливань основного контакту $t_8 - t_{10}$ від моменту часу t_8 , що відповідає практично розімкнутим контактам вимикача, до моменту закінченню взаємодії амортизатора та основного рухомого контакту t_8 , де розрахована швидкість контакту буде стабільно нульовою. Зростання амплітуди коливань на періоді часу $t_8 - t_{10}$ та тривалості цього періоду свідчитимуть про певні недоліки в самому амортизаторі. Контроль часткового виходу рухомого контакту за межі номінальної відстані при виконанні операції вмикання (точка d_{max2} , відповідна моменту t'_9 може дати додаткову інформацію про зношення (ерозію) основного нерухомого контакту.

В праці [54] повідомляється, що з кривої руху основних контактів, зафіксованої в операціях вмикання/замикання, можна отримати наступні параметри механічного стану вимикача: швидкості замикання і розмикання контактів, як середні швидкості руху контактів на ділянці кривої, що складає 80% усього їх ходу в цих комутаційних операціях; відстань, яку проходить контакт, як його сумарне переміщення між початковою і кінцевою позиціями, і

надмірна відстань, яку проходить контакт, тобто його переміщення від з'єднання полярних контактів до стабільної позиції в операції замикання.

Корисну додаткову інформацію про стан механічних елементів і механізму керування вимикача можна отримати виконуючи моніторинг відношення періодів часу $(t_4 - t_8)/(t_5 - t_7)$. Якщо період часу $t_5 - t_7$ зростатиме, наприклад внаслідок залипання додаткового контакту «б», то відношення $(t_4 - t_8)/(t_5 - t_7)$ зменшуватиметься, що частково дасть можливість ідентифікувати таку ненормальність. Проте тут слід враховувати значення моменту часу t_5 – зміни положення рухомого контакту «а», яка також може статися з запізненням по відношенню до моменту t_4 , оскільки може бути залипання і цього контакту. Тому тут слід накладати додаткові умови щодо контролю відношення часу $(t_4 - t_8)/(t_5 - t_7)$, здійснюючи одночасний контроль відношення періоду $t_{зас} - t_4$, що характеризує реакцію заведеної пружини та механізму керування на приведення в дію основного рухомого контакту, до інтервалу $t_{зас} - t_5$, який характеризує реакцію заведеної пружини та механізму керування на зміну положення додаткового контакту «а». Якщо це відношення стає для двох послідовних операцій вимикання вимикача, а відношення $(t_4 - t_8)/(t_5 - t_7)$ зменшилось, то це свідчить про залипання додаткового контакту «б». Якщо відношення $(t_{зас} - t_4)/(t_{зас} - t_5)$ змінюється з послідовними вимиканням вимикача, то це свідчитиме про залипання додаткового контакту «а». В загальному розробка алгоритму розрахунку усіх можливих варіантів і значень зазначених співвідношень та їх аналізу може сприяти обґрунтуванню та розширенню складу ПМ вимикача.

Варто також зазначити, що деякі з окремо взятих розглядуваних чи пропонованих ПМ можуть безпосередньо не відображати технічний стан вимикача, однак їх використання в сукупності з усіма іншими ПМ сприятиме підвищенню якості моніторингу і надійності функціонування вимикача.

2.4 Розробка методу та алгоритмів визначення показників моніторингу за даними моніторингу

Насамперед зазначимо, що для розв’язуваної задачі моніторингу технічного стану елементів вимикача якомога точніша синхронізація отриманих від різних джерел даних є досить важливим фактором. Дані різних джерел інформації, записані з високою точністю синхронізації, значно спрощують обробку і збільшують точність ідентифікації ПМ.

Зазвичай пристрої реєстрації перехідних процесів та РЗ, які мають функції збереження даних про аварію зберігають дані у міжнародно визнаному форматі COMTRADE (Common format for transient data exchange for power systems) [76] відповідно до якого синхронно, в одному часовому проміжку зберігаються значення даних від різних джерел. Припустимо, що записані дані процесу вимкнення вимикача містять наступні масиви інформації: $t[n]$ – масив значень моментів часу, в які відбирались вибірки значень джерел інформації; $s_{pz}[n]$ – масив значень вибірок бінарного сигналу ініціалізації процесу вимкнення (сигнал від РЗ чи диспетчера); $u[n]$ – масив значень вибірок напруги живлення від акумуляторної батареї ПС; $s_{«a»}[n]$, $s_{«б»}[n]$ – масиви значень вибірок бінарних сигналів, що описують положення додаткових контактів «а» та «б»; $i_{вим}[n]$ – масив значень вибірок струму котушки вимкнення; $d[n]$ – масив значень вибірок переміщення рухомого контакту в бік амортизатора. Алгоритми, подані на рис. 2.3 та рис. 2.4 (а), (б) описують механізм отримання з даних вимірювань усіх розглянутих вище ПМ механічного стану вимикача.

Відповідно до рис. 2.3 спершу шляхом звичайних булевих порівнянь в циклічній петлі визначається ряд моментів часу. Варто вказати, що визначення локальних максимуму I_{p1} та мінімуму $I_{зас}$ і відповідних їм моментів часу t_{p1} та $t_{зас}$ струму котушки за наявності лише дискретних значень вибірок струму $i_{вим}[n]$ та відповідних їм моментів часу $t[n]$, є досить складною процедурою. Визначення величин t_1, t_{p2}, t_6 та значення струм I_b дає можливість здійснити розрахунок решти ПМ відповідно до алгоритму, поданому на рис. 2.4 (а).

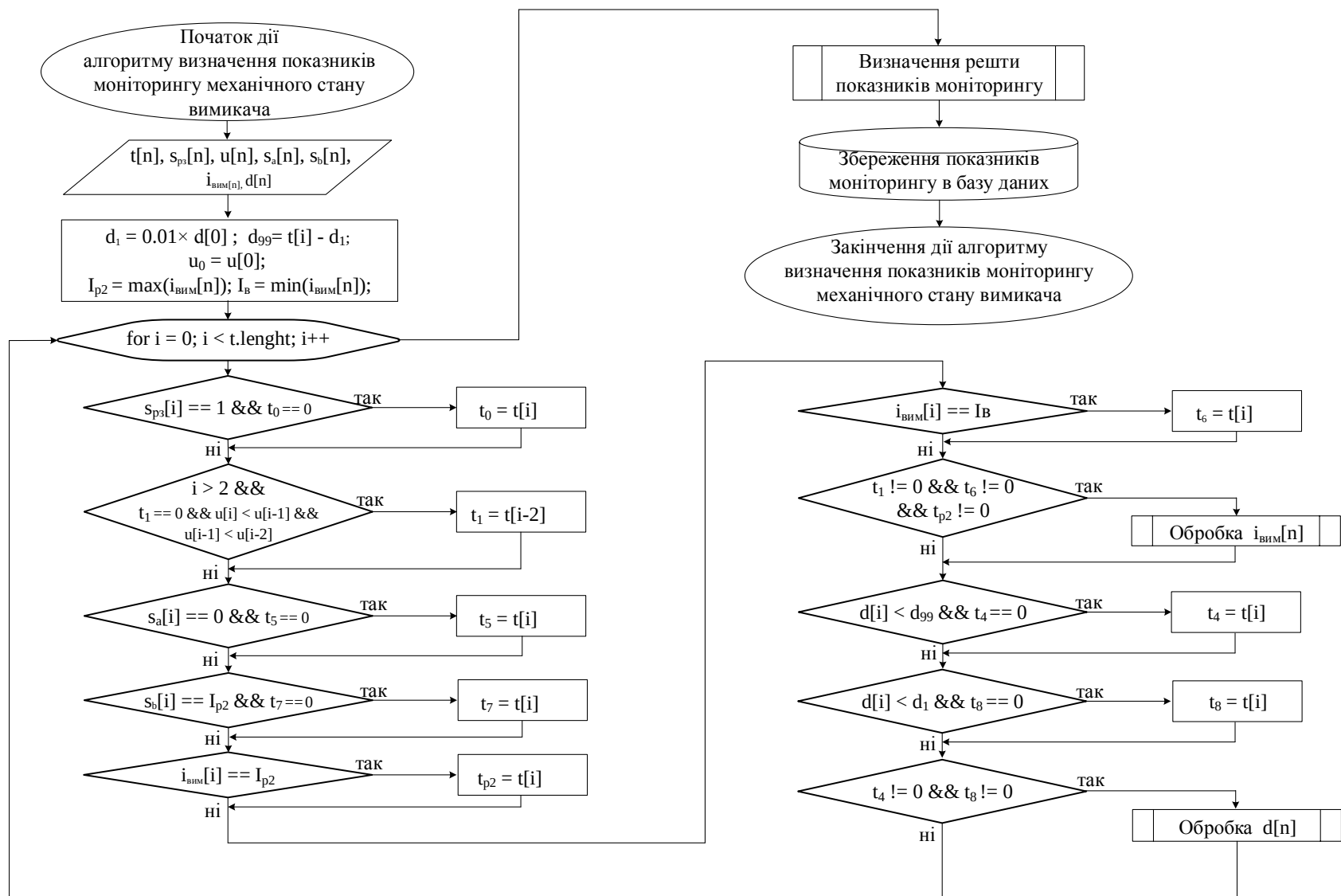
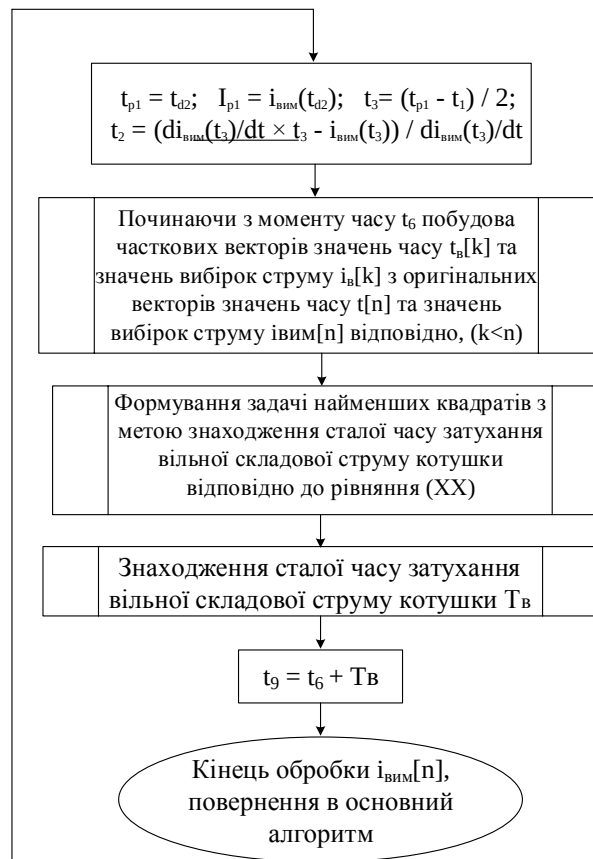
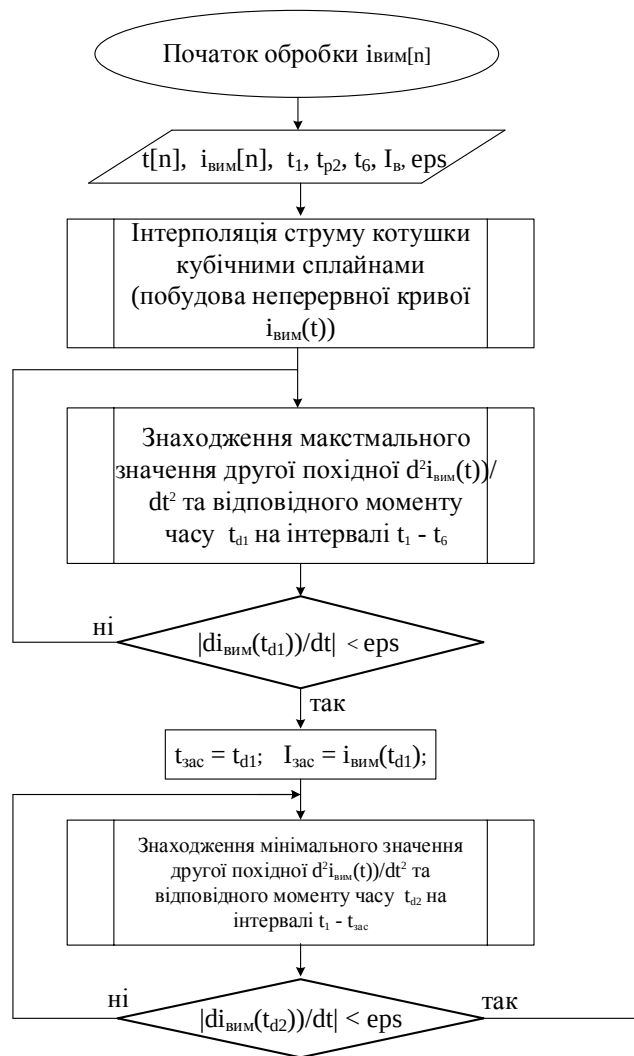
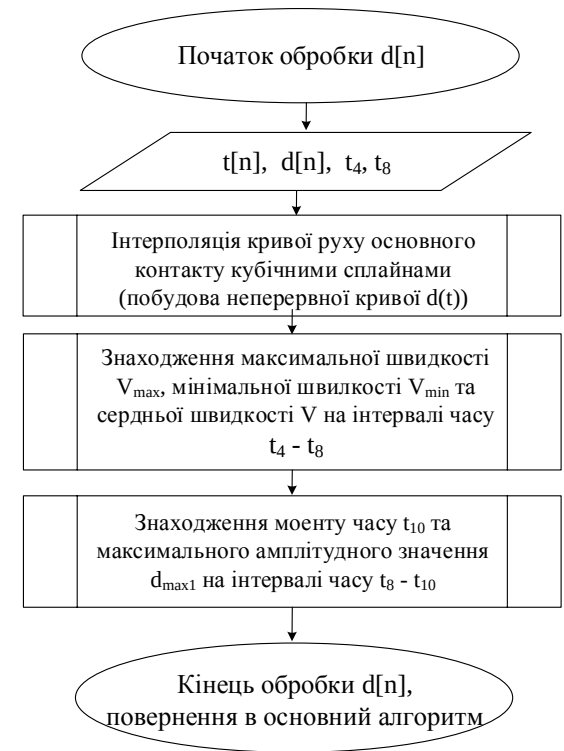


Рис. 2.3. Алгоритм визначення ПМ



а)



б)

Рис. 2.4. Алгоритми визначення ПМ:

а) обробка струмів котушок вмикання/вимикання; б) обробка кривої руху основного контакту

Відомо, що у випадку, якщо функція в точці має локальний екстремум, то значення її першої похідної в цій точці рівне нулю. Також відомо, якщо в точці, де перша похідна функції рівна нулю, а її друга похідна має додатній характер, то це є точка локального мінімуму, і навпаки, якщо друга похідна функції в точці рівності її першої похідної нулю має від'ємний характер, то це засвідчує локальний максимум функції.

Проте застосування чисельних методів розрахунку першої та другої похідних функцій до дискретних значень вибірок струму у відповідні моменти часу призводить до значних похибок у визначенні ПМ. У зв'язку з цим для згладжування та побудови неперервної функції, що дало б можливість визначення неперервних першої та другої похідної струму, здійснено інтерполяцію дискретних даних струму кубічним сплайном. Для прикладу розглянемо реальні зареєстровані струми котушок вимкнення двох ЕВ 750 кВ та відповідні їм інтерпольовані криві (рис. 2.5).

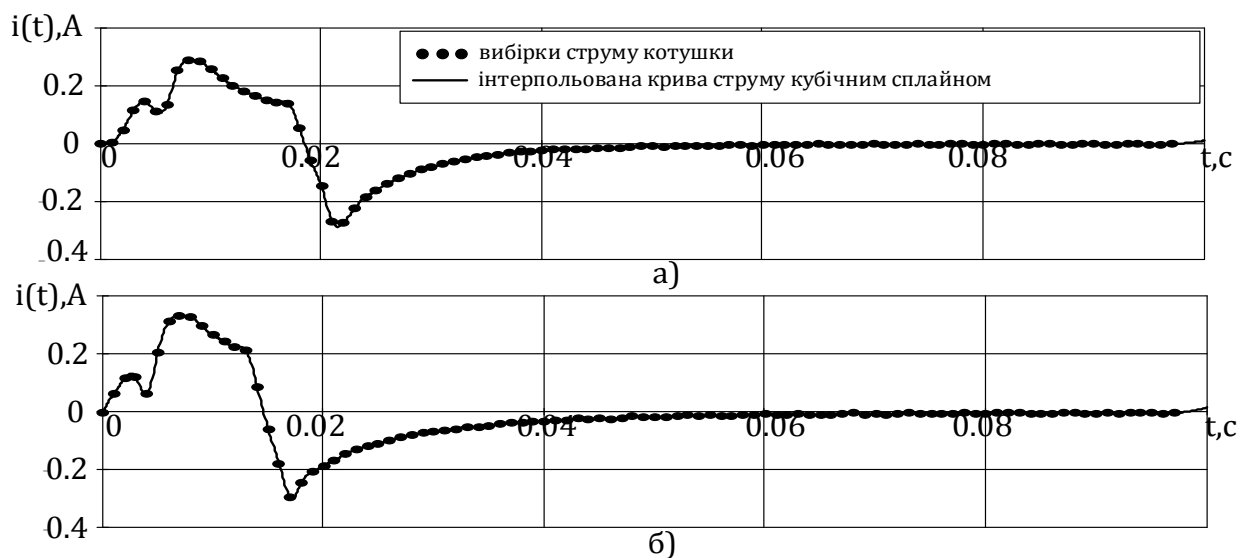


Рис. 2.5. Виміряні дані та інтерпольовані криві струмів
котушок вимкнення ЕВ 750 кВ

а) з затримкою зростання струму; б) без затримки

Як видно з рис. 2.5 (а), стрімке зростання кривої струму котушки після подачі на її затискачі напруги батареї живлення вторинних кіл в момент t_1 відбувається з певною затримкою часу, зумовленою протидіючими

електрорушійній силі котушки і руху плунжера силами тертя та земного тяжіння. Це в свою чергу вплинуло на тривалість відмикання засувки та усіх подальших процесів і відповідно на повний час вимикання струму вимикачем в порівнянні з кривою струму (б), де така затримка не мала місця. Для того, щоб визначити цю затримку часу повернемося до процедури визначення локальних екстремумів струмів I_{p1} і $I_{зас}$ та відповідних їм моментів часу t_{p1} і $t_{зас}$.

Інтерполювавши криву струму та маючи значення моментів часу t_1 та t_{p2} спершу визначаємо момент часу $t_{зас}$, дотримуючись умови: $di_{вим}(t)/dt \approx 0$, $d^2i_{вим}(t)/dt^2 \rightarrow \max$ на проміжку часу $t_1 - t_{p2}$. Аналогічним чином визначається момент часу t_{p1} , дотримуючись умови: $di_{вим}(t)/dt \approx 0$, $d^2i_{вим}(t)/dt^2 \rightarrow \min$ на проміжку часу $t_1 - t_{p2}$. Локалізація періоду часу пошуку локальних екстремумів струмів I_{p1} і $I_{зас}$ в рамках $t_1 - t_{p2}$ значно зменшує кількість обчислень та унеможливорює знаходжень помилкових моментів часу, наприклад поза межами $t_1 - t_{p2}$, де $t > t_{p2}$. Маючи інтерпольовану функцію $i_{вим}(t)$ визначаються значення струмів у визначені моменти часу $t_{зас}$ та t_{p1} .

Знаходження моменту часу t_{p1} дає можливість визначити присутність певних протидіючих руху плунжера сил. Для цього визначимо середину інтервалу часу $t_1 - t_{p1}$, тобто визначимо момент часу $t_3 = (t_{p1} - t_1)/2$. В цей момент часу найбільш імовірно, подолавши протидіючі сили, плунжер буде рухатись з постійною швидкістю, що відповідає дотичній 2 (рис.2.2) та вище поданим твердженням.

Відомо, що рівняння дотичної в точці до кривої має наступний вигляд:

$$f(x) = y(x_0) + \frac{dy(x_0)}{dx}(x - x_0).$$

Отже, перетин дотичної 2 з віссю абсцис, де $f(x) = 0$, дасть можливість визначити x (в нашому випадку момент часу t_2 , коли плунжер починає рухатися

стабільно швидко). Відповідно, інтервал часу $t_1 - t_2$ – це час затримки плунжера на подолання протидіючих його руху сил.

Таким чином

$$x = \frac{dy(x_0)/dx \cdot x_0 - y(x_0)}{dy(x_0)/dx}$$

або в нашому випадку

$$t_2 = \frac{di_{\text{вим}}(t_3)/dt \cdot t_3 - i_{\text{вим}}(t_3)}{di_{\text{вим}}(t_3)/dt}$$

Для струмів показаних на рис. 2.6 (а) та (б) значення t_2 відповідно становлять 0.00124 с та – 0.00061 с. Для випадку (б) знак мінус свідчить про те, що ніяких протидіючих руху плунжера сил не було і він вільно рухався в сторону засувки. Проте, у випадку рис. 2.3 (а), де явно видно певну затримку (дотична 1 на рис. 2.2) значення t_2 має додатній характер і вказує на необхідність перевірки технічного стану плунжера, наприклад, якості його змащування.

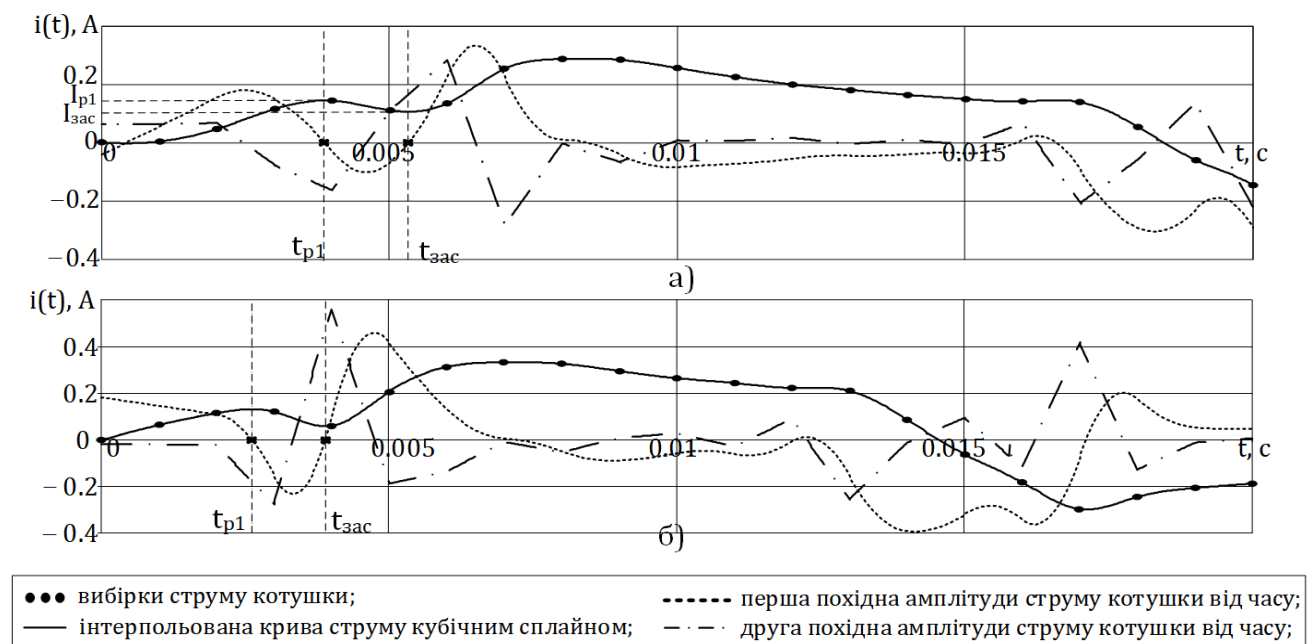


Рис. 2.6. Інтерпольовані криві струмів котушок вимкнення та неперервні криві їх першої та другої похідних ЕВ 750 кВ

Глобальний мінімум струму котушки I_B та відповідний йому момент часу t_6 , а також всі дані, які належать проміжку часу $t > t_6$ є важливими з тієї точки зору, що складають інформаційну основу для визначення технічного стану котушки, її опору, наявності короткозамкнених витків та ін. Процес зникнення струму в котушці після зміни положення додаткового контакту «а» і зняття напруги батареї живлення вторинних кіл можна розглядати як процес затухання вільної складової струму у колі з постійним струмом та раптовим розмиканням контактів. Рівняння вільної складової струму перехідного процесу описується наступним чином:

$$i_B(t) = Ae^{-\frac{t}{T_B}}$$

де A – це стала інтегрування, яка в нашому випадку рівна значенню I_B , тобто глобальному мінімуму повного струму котушки, а T_B – це постійна часу затухання вільної складової струму, яка залежить від параметрів R та L котушки і є невідомою.

Задачу знаходження значення постійної затухання T_B , відповідно до МНК, представимо в наступному вигляді:

$$\sum_{p=0}^k [i_B[p] - i_B(t_B[p])]^2 = \sum_{p=0}^k \left[i_B[p] - I_B e^{-\frac{t_B[p]}{T_B}} \right]^2 \rightarrow \min$$

де $i_B[k]$ – вектор значень вибірок струму котушки $i_{\text{вим}}[n]$, починаючи з моменту часу t_6 ; $t_B[k]$ – вектор значень перерахованих моментів часу вектору $t[n]$ по відношенню до осі ординат, починаючи з моменту часу t_6 . Розв’язок задачі МНК дає можливість точно знайти сталі часу котушок вимкнення/вмикання вимикача.

Для прикладу, для струмів катушок вимкнення рис. 2.7 (а) і (б) розраховані постійні часу мають наступні значення 0.00656с та 0.00875с відповідно. Достовірність розрахованих значень постійних часу T_B підтверджена побудованими відповідними їм апроксимуючими кривими струмів $i_B(t)$.

Якщо припустити, що глобальне пікове значення I_{p2} в момент часу t_{p2} це є значення струму в колі постійного струму з опором лише самої котушки (утримуюча плунжер сила починає втягувати плунжер назад в котушку з певною затримкою часу після t_{p2} , що може пояснюватись майже рівномірним «пагорбом» навколо пікового значення I_{p2} , (див. рис. 2.5 (а), (б) та в збільшеному масштабі рис. 2.6 (а), (б)), то можна визначити опір самої котушки, як $R = u[t_{p2}]/i_{\text{вим}}[t_{p2}]$. А знаючи опір R котушки та її постійну часу T_b , легко визначити значення індуктивності котушки L , як $L = T_b \cdot R$.

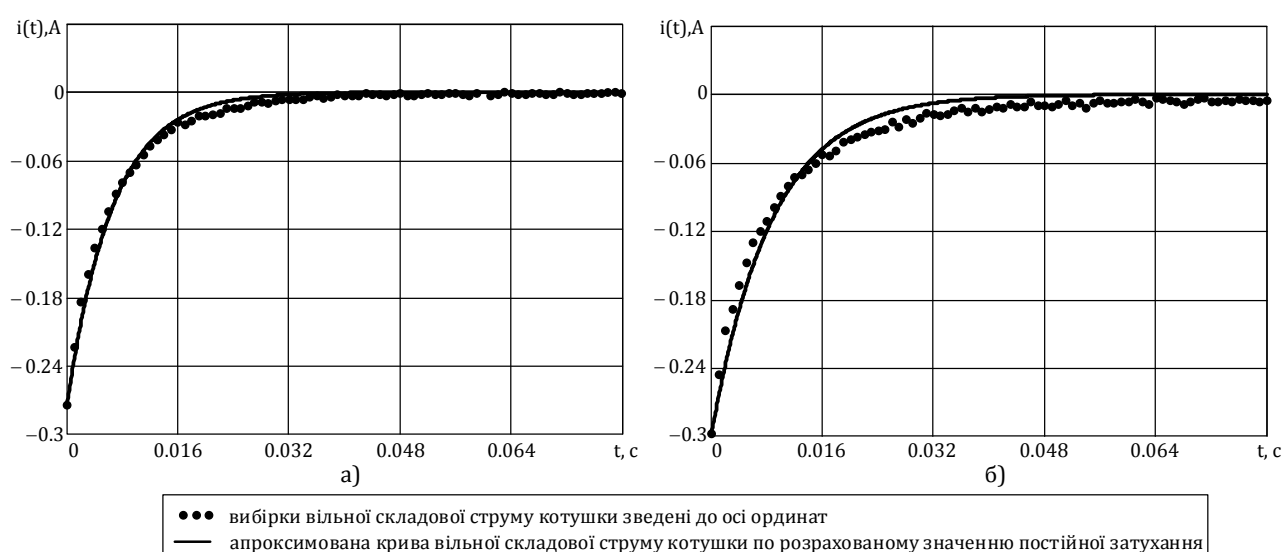


Рис. 2.7. Апроксимація струмів затухання котушки вимкнення ЕВ 750 кВ з різними постійними часу

Ще раз підкреслимо, що контроль опору та індуктивності котушки має вагоме значення в моніторингу технічного стану вимикача, оскільки це дозволяє відслідковувати появу короткозамкнених витків в котушці, що негативно впливає на подальшу працездатність кола керування і вимикача в цілому.

За цим же алгоритмом обробляються дані кривої руху вимикача та визначаються відстані, пройдені головним контактом за визначені періоди часу, максимальна, мінімальна та середня його швидкості руху, тривалість переміщення основного контакту вимикача, тривалість коливального процесу дії амортизатора та максимальна амплітуда дії амортизатора.

Визначивши всі необхідні моменти часу відповідно до алгоритмів рис. 2.3 та рис. 2.4 – розраховуються ПМ: періоди часу виконання окремих операцій механічними елементами вимикача; відношення деяких періодів часу; значення струмів у визначені моменти часу; значення сталої часу котушки та значення її опору та індуктивності та фіксуються значення початкової напруги $u[t_0]$. Ці дані записуються і зберігаються в базі даних подій вимикачів, де з подальшим накопиченням даних аналізуються на предмет відхилення порівняно з нормальними значеннями при приблизно однакових рівнях початкової напруги $u[t_0]$.

Ведення бази даних є дуже важливою функцією моніторингу, оскільки визначення запропонованих тут ПМ в процесі експлуатації, ще не є гарантією достовірного запобігання механічній поломці та виходу з ладу вимикача. Це є лише необхідні дані, які надають користувачу вимикача інформацію про те, що відбулись певні зрушення в технологічному процесі роботи вимикача, які можуть призвести до негативних наслідків. Проте накопичення в процесі експлуатації даних моніторингу, особливо у випадках поломок і відмов, з постійною їх обробкою сучасними методами злиття даних, з використанням нечіткої логіки та нейронних мереж надасть можливість розробки чітких критеріїв, відповідно до яких можна буде сформулювати судження про критичність відхилення того чи іншого ПМ механічного стану вимикача і більш грамотно запобігти його пошкодженням чи відмовам.

2.5 Висновки до розділу

1. Аналіз відомих способів отримання ПМ механічних елементів вимикача від різних джерел інформації про їх технічний стан виявив необхідність розширення та обґрунтування переліку ПМ та методів їх отримання з метою підвищення достовірності даних і якості моніторингу.

2. На основі проведеного аналізу результатів цілого ряду, головним чином закордонних досліджень, присвячених методам виявлення пошкоджень і відмов

різних елементів ВВ, з урахуванням поданого в Словнику [79] визначення основного родового поняття «величина» і поданих в [31, 79] прикладів різних рівнів конкретних понять, що витікають з родового поняття «величина», встановлено, що ПМ технічного стану ВВ можуть бути наступні властивості (величини) їх механічних елементів:

- параметри струмів котушок вмикання/вимикання (амплітуди, початкові значення, миттєві значення, мінімальні значення, постійна часу затухання);
- функціонали струмів котушок вмикання/вимикання (максимальні значення, діючі значення, похідні струмів);
- складові струмів котушок вмикання/вимикання (аперіодичні, гармонічні);
- параметри складових струмів котушок вмикання/вимикання (початкове значення і постійна часу затухання вільної складової);
- характер зміни струмів котушок вмикання/вимикання (усталений, аперіодичний, довільної форми, шум);
- моменти часу, що пов'язані з деякими характерними точками кривих струмів котушок вмикання/вимикання (максимумів, мінімумів, різких змін);
- часові інтервали, що відносяться до певних відрізків кривих струмів котушок вмикання/вимикання (зростання, спадання струму);
- параметри кривої переміщення (руху) основних контактів (довжина шляху переміщення, постійна часу затухання);
- характер зміни (форма) кривої переміщення основних контактів та її окремих ділянок (усталений, коливальний, затухаючий);
- моменти часу, що пов'язані з деякими характерними точками кривої переміщення основних контактів (початок руху, закінчення руху контактів);
- часові інтервали, що відносяться до певних відрізків кривої переміщення основних контактів (між моментами початку і закінчення руху, коливальний рух).

3. Визначені вище характеристики кривих струмів котушок вмикання/вимикання і кривої руху основних контактів вимикача, які можуть

змінюватися в процесі його функціонування (виконання комутаційних операцій) в результаті різного роду пошкоджень і відмов, складають основу для моніторингу технічного стану механічних елементів вимикача.

4. В результаті розгляду структури, фізичних процесів і функціонування блоку керування та приводного механізму вимикача оцінено можливості окремих складових (етапів) процесу його вимкнення і відповідних їм параметрів і характеристик в отриманні моніторингових даних про технічний стан вимикача.

5. Розроблено метод моніторингу технічного стану механічних елементів ВВ, сутність якого полягає у визначенні на початковому етапі шляхом звичайних булевих порівнянь в циклічній петлі ряду моментів часу (ПМ), відповідних певним характерним точкам на кривих струму котушки вимкнення t_{p2} , t_6 ; сигналів ініціалізації t_0 , t_5 , t_7 ; напруги джерела живлення t_1 та кривої руху основних контактів t_4 , t_8 ; інтерполяції дискретних вибірок струмів котушки вимкнення/увімкнення та кривої руху основних контактів кубічним сплайном; знаходженні постійної часу затухання вільної складової струмів МНК та використанні неперервних значень першої та другої похідних інтерпольованих функцій струмів для визначення інших ПМ; запису, збереженні та накопиченні даних моніторингу в базі даних, їх аналізу на предмет відхилення від нормальних значень.

6. Розроблено алгоритм автоматичного визначення ПМ технічного стану механічних елементів ВВ, що реалізує запропонований метод моніторингу, і дозволяє визначити наступні ПМ:

- періоди часу виконання окремих операцій механічними елементами ВВ; відношення деяких періодів часу;
- значення струмів у визначені моменти часу; локальні екстремуми струмів котушок вимкнення/вмикання і відповідні їм моменти часу;
- постійну часу затухання струму котушок вимкнення/увімкнення, активний опір та індуктивність котушок;
- визначаються відстані, пройдені головним контактом за визначені періоди часу, максимальна, мінімальна та середня швидкості його руху;

- тривалість переміщення основного контакту вимикача; тривалість коливального процесу дії амортизатора та максимальна амплітуда дії амортизатора.

Посилання: [16], [21], [23], [28], [31], [33], [39], [42], [54], [62], [64], [76], [79], [83], [85], [92], [95], [96], [98], [99], [101], [102], [109], [110], див. список використаних джерел стор. 128-139.

РОЗДІЛ 3

МОНІТОРИНГ КОМУТАЦІЙНОГО РЕСУРСУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ

Однією з найбільш зношуваних і пошкоджуваних частин усіх виконань і типів вимикачів (оливних, повітряних, вакуумних та елегазових) є дугогасні пристрої різних конструкцій, особливо їх головні контакти [17, 18, 26, 53 та ін.]. Основною причиною зношення і руйнування контактів є електрична дуга, що виникає між ними під час відключення струму.

Серед факторів, які впливають на ерозію контактів вимикача, виділяються тип матеріалу, їх форма та розмір, матеріал заповнення дугогасної камери та його тиск, що встановлюються безпосередньо виробником при проектуванні і виготовленні вимикача [86]. На руйнування та зношення контактів впливають також і фактори, які є випадковими – параметри струму, який відключається вимикачем та тривалість горіння дуги в камері. Масштаби пошкоджень визначаються кількістю теплової енергії, що виділяється на контактах і дузі при проходженні через них струму відключення (СВ).

З метою забезпеченню надійного функціонування цих апаратів і недопущення їх відмов з вказаних причин нормується, як наприклад в стандарті [8] КР вимикачів, який характеризує їх надійність та довговічність і відноситься до основних показників цих апаратів.

Зазвичай КР подається заводами-виробниками у вигляді РХ, а саме – декількома числами N_i можливих циклів (операцій) відключення вимикачем різних за значенням струмів: номінального струму вимикача $I_{\text{ном}}$, номінального СВ $I_{\text{оном}}$ та двох струмів I_t з проміжку між ними. Як правило N не перевищує 4. Оскільки практично завжди струм КЗ через вимикач I_t знаходиться між двома вказаними його граничними значеннями $I_{\text{ном}}$ та $I_{\text{оном}}$ і є випадковою величиною, його значення майже ніколи не співпадає з вказаними в РХ вимикача, визначення реального плинного КР в експлуатації потребує інтерполяції РХ. Звідси при оцінюванні плинного залишкового КР постає задача вибору методу

інтерполяції РХ, застосування якого при заданій виробником мінімальній кількості точок РХ, забезпечуватиме найвищу точність її апроксимації і точність визначення КР. Моніторинг залишкового КР вимикачів в процесі їх експлуатації є важливою науково-технічною задачею. Водночас використовувані при цьому методи контролю не враховують зазначені вище фактори, які впливають на значення КР, що приводить до похибки в його оцінюванні, а відповідно до збільшення витрат на ремонт і реновацію вимикача.

Метою даного розділу є визначення і обґрунтування напрямків підвищення точності визначення залишкового КР ВВ на основі оцінювання впливу на нього методів і точності апроксимації РХ та точності вимірювання СВ.

3.1 Моделі та засоби оцінювання комутаційного ресурсу

З праці [26] відомо про декілька підходів до визначення залишкового ресурсу вимикачів. Один з них ґрунтується на використанні статистичних даних про ймовірність числа і типів пошкоджень та сумарного струму КЗ, який може бути відключений вимикачем без зниження показників якості.

З поданого в праці [10] опису розвитку методів та засобів технічного діагностування вимикачів на початок 90-х років минулого століття, відомо, що перші практичні спроби визначення ресурсу вимикачів зроблені у ВЕО «Вінницяенерго» у вигляді розрахунку числа допустимих відключень кожним вимикачем ПС попередньо розрахованого найбільшого струму КЗ на її збірних шинах.

Велике розповсюдження свого часу для оцінювання залишкового КР отримало використання механічних (під дією гнучкої тяги) або імпульсних (фіксація положення блок контактів) лічильників числа його спрацювань, які встановлювались безпосередньо на вимикач [26]. Більш досконалим стало застосування шестидіапазонного лічильника струмів КЗ, в якому струм КЗ відповідно до значення амплітуди розподілявся на ряд діапазонів, а інформація щодо кожного з них подавалась на електромагнітні лічильники імпульсів. Проте при такому підході значно ускладнювався підрахунок сумарного залишкового

КР. Хоча в даному разі вже здійснюється градація амплітуд СВ, що є значно точнішим в порівнянні із застосуванням механічних та імпульсних лічильників, проте цей спосіб, як і попередні, теж є недосконалим, оскільки в усіх них ніяк не враховується вплив зазначених вище факторів ерозії контактів на КР.

З появою мікропроцесорного обладнання стало можливо впровадити ще один з підходів до визначення залишкового КР, який базується на використанні РХ вимикача. Так, в роботі [26] було запропоновано наступну модель оцінювання залишкового КР:

$$p = M - \sum_{i=1}^m f(I_i), \quad (3.1)$$

де p – залишковий ресурс вимикача (в умовах експлуатації), M – гранична кількість відключень вимикача; m – загальна кількість виконаних циклів відключення; $f(I_i)$ – витрати КР вимикача при i -й комутації, які визначаються за його РХ.

Дещо складнішу модель такого оцінювання запропоновано в роботі [17]:

$$p = MI^2t - \sum_{i=1}^m f(I_i) \int_{t_{si}}^{t_{ei}} i_i^2(t) dt, \quad (3.2)$$

де MI^2t – максимальне електричне зношення вимикача; $i_i^2(t)$ – квадрат СВ в i – й операції комутації; t_{si} та t_{ei} – час початку та закінчення горіння дуги відповідно. $\int_{t_{si}}^{t_{ei}} i_i^2(t) dt$ – умовна величина, яка характеризує теплову дію дуги струму КЗ на головні контакти вимикача.

Використання цієї моделі забезпечує набагато точніше оцінювання залишкового КР порівняно з попередньою моделлю, оскільки дозволяє враховувати не лише вплив технічних параметрів контактів та ізоляційного матеріалу в дугогасній камері, але й параметри СВ, тривалість горіння електричної дуги і теплоту, яку вона виділяє при відключенні нормальних

струмів та струмів КЗ. При цьому зазначимо, що використання моделей (3.1) і (3.2) потребує знання миттєвих і діючих значень СВ, одержання яких, особливо при перехідних режимах енергосистем, пов'язано з певного роду труднощами. Тому оцінювання впливу точності вимірювання цих струмів в нормальних і перехідних режимах на результати оцінювання КР вимикача є другим аспектом цієї роботи.

3.2 Вибір та обґрунтування методу апроксимації ресурсної характеристики вимикача

Для апроксимації РХ відомо використання кусково-лінійної або експоненціальної функцій [18] і поліномів різних степенів. Так, в праці [10] з цією метою використано поліном m -ого степеню, де розрахунок коефіцієнтів апроксимації виконується шляхом застосування МНК. Про апроксимацію РХ поліномом третього степеню йдеться в праці [26], в якій коефіцієнти апроксимації отримані в результаті розв'язання простої системи лінійних рівнянь. Доцільність використання саме цих способів апроксимації в кожній з зазначених праць ніяк не обґрунтована, що породжує сумніви щодо правомірності їх застосування для різконерівномірних залежностей, якими є РХ. Отже, актуальною є задача обґрунтованого вибору найбільш простого, з обчислювальної точки зору, і точного способу апроксимації конкретної РХ чи розробки універсального способу з зазначеними властивостями.

Дослідження впливу точності апроксимації РХ на результат визначення КР виконаємо на прикладі ЕВ типу HPL 362 В1 фірми АВВ з $I_{\text{ном}} = 2000 \text{ А}$ та $I_{\text{оном}} = 50 \text{ кА}$. Його РХ зображена на рис. 3.1.

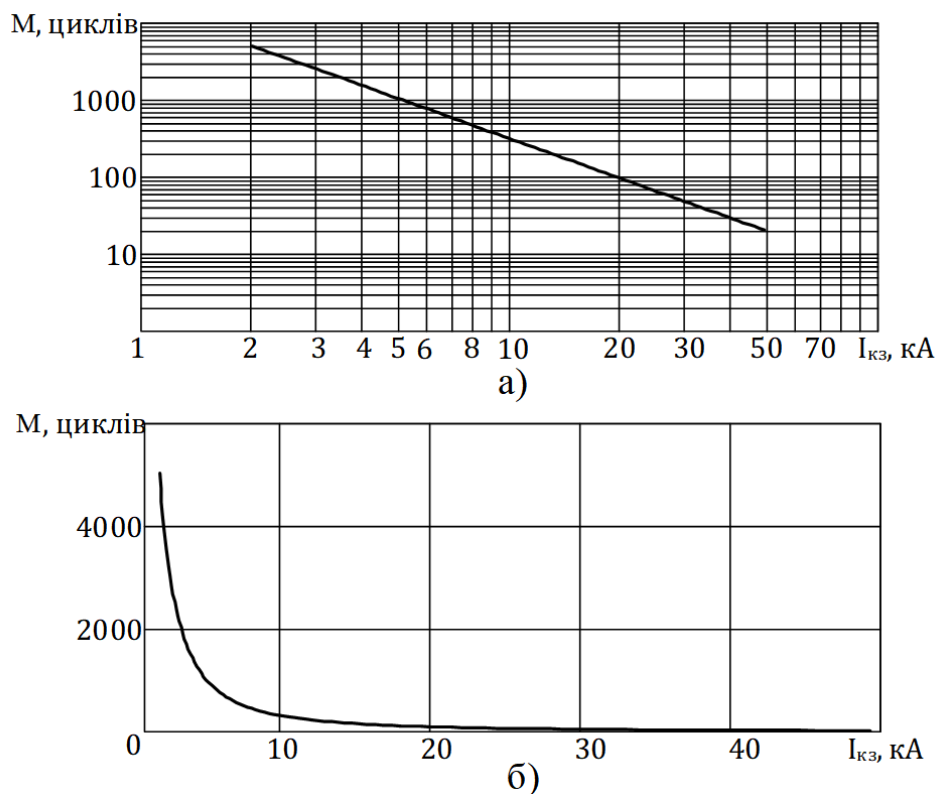


Рис. 3.1. РХ високовольного ЕВ типу HPL 362 B1 фірми АВВ

з $I_{\text{ном}} = 2000 \text{ А}$ та $I_{\text{оном}} = 50 \text{ кА}$

Насамперед розглянемо випадок, коли РХ задана 4-ма точками: 5000 можливих циклів відключень $I_{\text{ном}}$; 160 відключень 30%-ого (15 кА) $I_{\text{оном}}$; 45 відключень 60%-ого (30 кА) $I_{\text{оном}}$; 20 відключень $I_{\text{оном}}$ (50 кА).

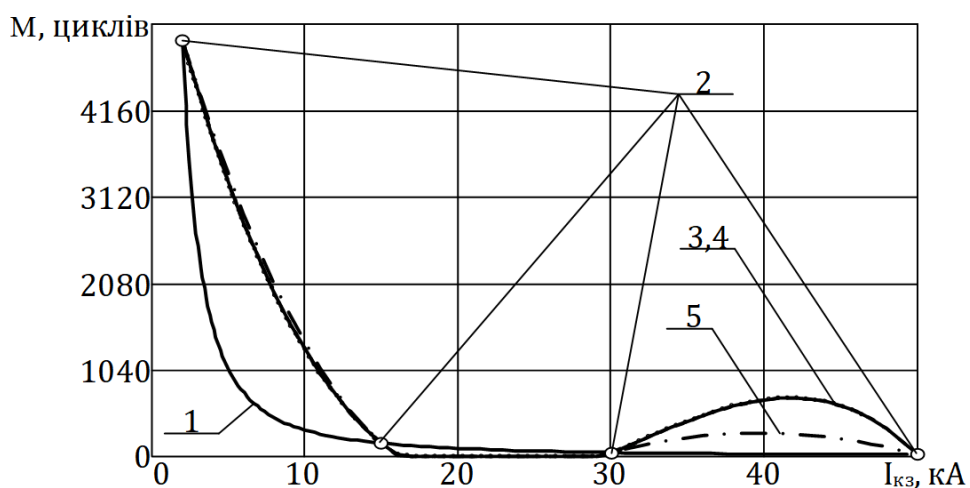


Рис. 3.2. Апроксимації РХ заданої чотирьома точками

Апроксимація РХ різними способами показана на рис. 3.2, де задіяні наступні позначення: 1 – реальний вигляд РХ; 2 – задані виробником вимикача точки, за якими здійснюється апроксимація; 3,4 і 5 – РХ, апроксимована відповідно поліномом третього степеню з визначенням коефіцієнтів апроксимації чисельним методом розв’язання системи лінійних рівнянь, поліномом третього степеню з визначенням коефіцієнтів апроксимації за допомогою МНК та інтерполяційним кубічним сплайном.

Як бачимо, апроксимація РХ усіма цими способами за 4-ма її відомими точками виконується з досить низькою точністю через появу осциляцій. В цілому кращою серед них виглядає апроксимація інтерполяційним кубічним сплайном. Причиною виникнення осциляцій є різкозмінний характер РХ, що ускладнює застосування поліномів [15]. Зауважимо також, що використані при апроксимації методи розрахунку її коефіцієнтів при такій кількості заданих точок РХ не впливають на точність апроксимації. Звідси приходимо до висновку, що представлення РХ 4-ма точками недостатнє для її точної апроксимації.

Далі на рис. 3.3 (з позначеннями такими ж, як і на рис. 3.2) відображено апроксимації РХ для випадків, коли вона задана 6-ма (рис. 3.3 (а)) та 8-ма (рис. 3.3 (б)) точками.

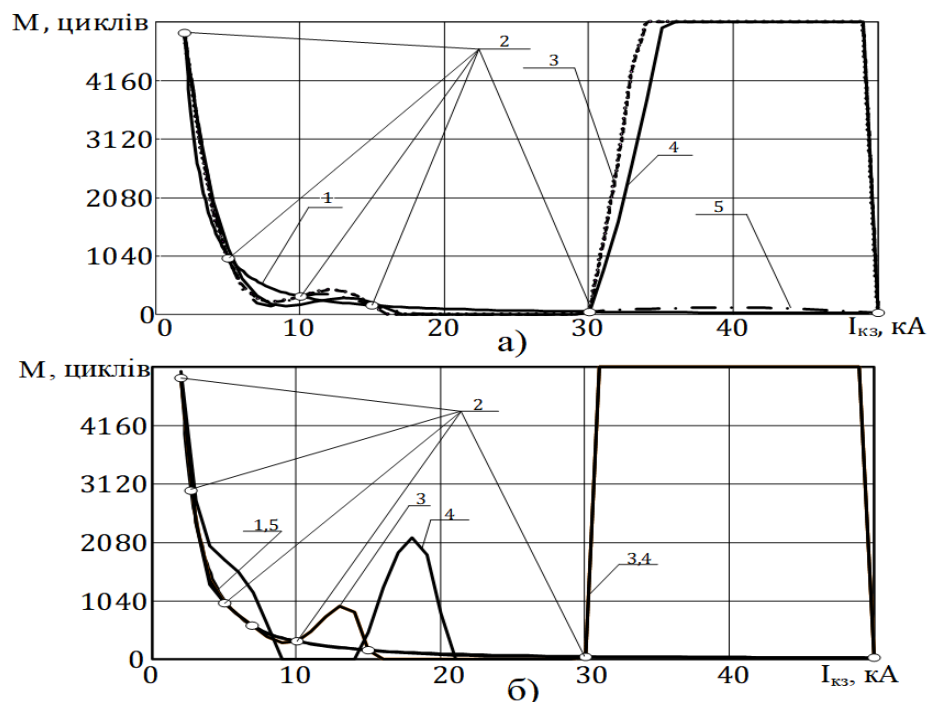


Рис. 3.3. Апроксимації РХ заданої: а) шістьма точками; б) восьми точками

З представлених на цих рисунках залежностей видно, що збільшення числа заданих точок РХ призводить при її апроксимації поліномом до зниження її точності, а при апроксимації кубічним сплайном – навпаки, до підвищення точності апроксимації. Це дає підстави стверджувати, що якісна і точна апроксимація РХ можлива лише за умов, коли вона буде виконуватися інтерполяційним кубічним сплайном і задаватися не менш як 8-ма точками.

3.3 Вибір та обґрунтування математичної моделі для визначення діючого значення струму вимкнення

Використання моделі КР (3.2) потребує моніторингу струму шляхом виконання вимірювань миттєвих та визначення діючих значень СВ. В мережах напругою 330-750 кВ моніторинг здійснюється первинними вимірювальними каналами струму (ПВК) СМ технічного стану їх електричного обладнання і параметрів режимів. Струми усталених режимів цих мереж за умов нехтування вищими гармоніками та високочастотним шумом можна вважати періодичними і визначення діючих значень виконувати на основі вибірок їх миттєвих значень за наступними відомими співвідношеннями:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \approx \sqrt{\frac{\Delta t}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i^2[n]}, \quad (3.3)$$

де $i[n]$ – n -а вибірка миттєвого значення струму, Δt – інтервал часу між моментами фіксації аналогово-цифровими перетворювачами ПВК вибірок миттєвих значень струму $i[n]$.

Проте, у сучасних мікропроцесорних пристроях однією із найбільш вживаних методик розрахунку діючого значення струму основної або його окремих вищих частот за вибірками $i[n]$ миттєвих значень є дискретні перетворення Фур'є (ДПФ) наступного вигляду:

$$i[k] = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i[n] \cdot e^{-jn\frac{2\pi k}{N}},$$

де $\dot{I}$ – комплекс діючого значення струму; k – номер гармоніки струму; N – кількість вибірок миттєвого значення струму.

У випадку несинусоїдального струму його діюче значення має обчислюватися як корінь квадратний з суми квадратів його постійної складової і діючих значень окремих гармонік:

$$I = \sqrt{(I[0])^2 + (I[1])^2 + (I[2])^2 + \dots + (I[n])^2}. \quad (3.4)$$

В цілому слід зазначити, що в загальному випадку струми високовольтних мереж крім складової основної частоти можуть також містити спектри ВГ та ВШ, а при пошкодженнях в струмі КЗ можлива поява постійної (аперіодичної) складової струму. В такому разі СВ представляється сукупністю гармонік з випадковим законом зміни їх амплітуд та фаз і аперіодичної складової з випадковим законом зміни початкового значення та постійної часу згасання. Остання складова струму КЗ, як відомо, може бути причиною насичення магнітопроводів давачів струму ПВК, а саме високовольтних ТС, зростання їх похибок, похибок ПВК в цілому і відповідно зниження точності вимірювання струму та оцінювання КР вимикача за моделями (3.1) і (3.2). До того ж, процес зміни такого СВ, особливо впродовж часу горіння дуги, не є стаціонарним і використання в цьому разі моделей (3.3) і (3.4) збільшуватиме похибку визначення діючого значення струму.

Для визначення діючого значення струмів КЗ в праці [17] використано наступне досить просте співвідношення:

$$I = \frac{\max(i[n]) - \min(i[n])}{2\sqrt{2}}, \quad (3.5)$$

де $\max(i[n])$, $\min(i[n])$ – відповідно, максимальне $i_{\max}$ та мінімальне $i_{\min}$ значення вибірок $i[n]$ миттєвого значення СВ (рис. 3.4).

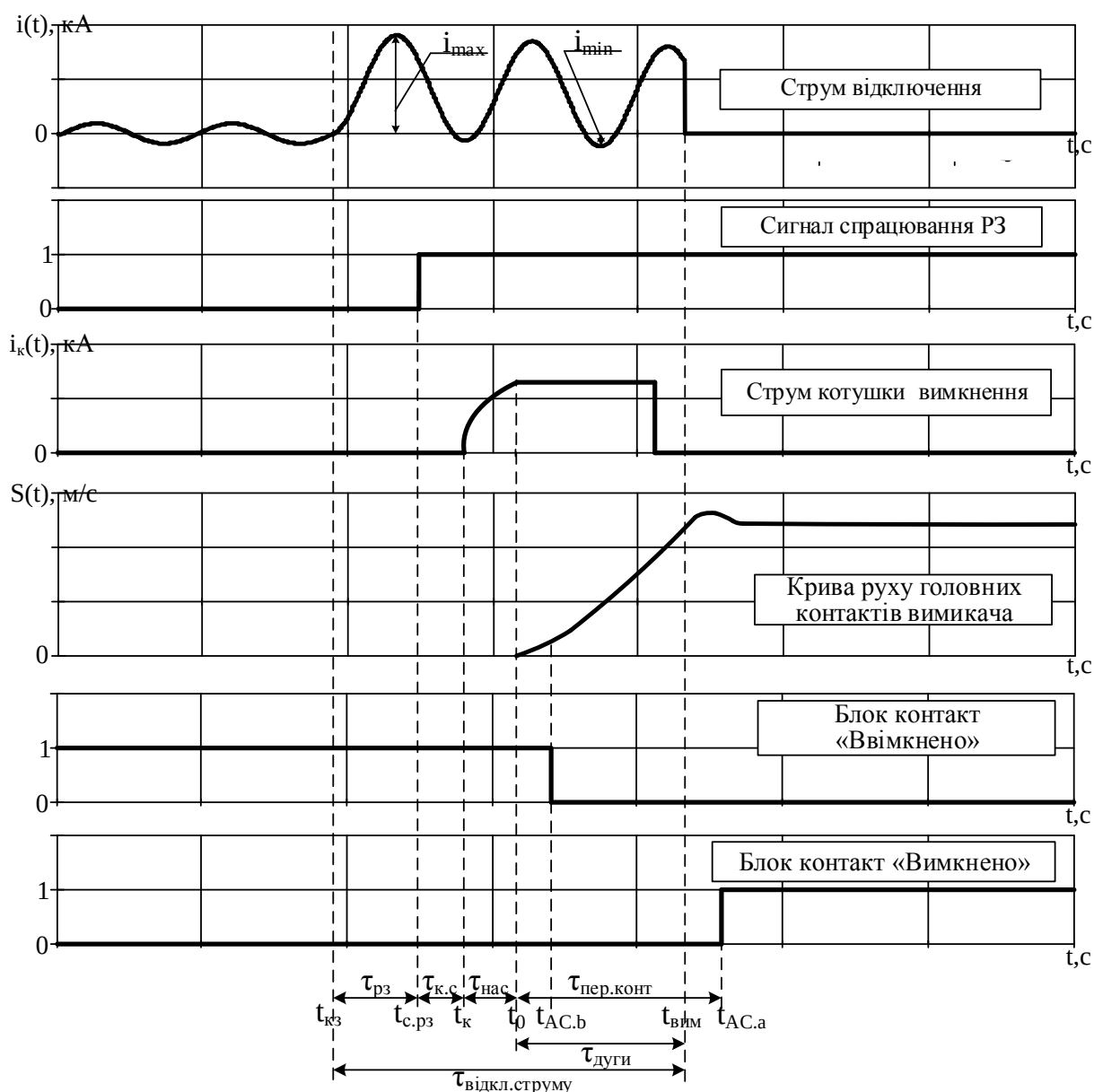


Рис. 3.4. Часові характеристики операції відключення струму вимикачем

З рис. 3.4, що відображає відносну зміну в часі СВ $i(t)$, струму спрацювання РЗ $i_{p3}(t)$, струму котушки вимкнення $i_k(t)$, кривої руху головних контактів вимикача $S(t)$ та стану його блок-контактів видно, що операція відключення струму КЗ вимикачем починається в момент виникнення пошкодження $t_{кз}$ і закінчується в момент $t_{вим}$ досягнення ним стабільного нульового значення $i(t) = 0$. При цьому зазначимо, що тривалість СВ $i(t)$, на

рис. 3.4 з метою більшої наглядності вибрана умовно, через неможливість в даному разі подати якусь її конкретне значення, оскільки $\tau_{\text{відкл}}$ залежить від багатьох факторів, насамперед від параметрів струму КЗ, типу алгоритмів захисту та часу його реакції $\tau_{\text{рз}}$ в конкретному випадку струму КЗ, конструктивних особливостей окремих вузлів вимикача (привідного механізму, контактної системи).

З цього рисунка також видно, що за час $\tau_{\text{відкл}}$ відключення вимикачем струму КЗ, який складається з часу $\tau_{\text{рз}}$ дії РЗ, часу $\tau_{\text{к.с.}}$ формування керуючого сигналу колами керування вимикачем, часу $\tau_{\text{нас}}$ насичення котушки вимкнення та часу $\tau_{\text{дуги}}$ горіння дуги в дугогасній камері через вимикач протікає струм, що характеризується кількома максимальними i_{max} та мінімальними i_{min} миттєвими значеннями. Це ставить під сумнів правомірність застосування формули (3.3) для розрахунку значення діючого струму для оцінювання залишкового КР за моделями (3.1) та (3.2).

З вищенаведених результатів досліджень та міркувань впливає задача вибору найбільш прийнятної, з точки зору точності, розрахункового співвідношення для визначення діючого значення СВ вимикача при моніторингу його КР. З цією метою в роботі виконані розрахунки можливих, найбільш характерних за складом та формою кривих СВ та їх діючих значень за формулами (3.3) і (3.4), результати яких подані на рис. 3.5. Зазначимо, що в цих розрахунках похибки ТС не враховувалися.

Рис. 3.5 демонструє наступні випадки СВ: а) ідеального синусоїдального струму; б) синусоїдального струму з певним вмістом ВГ (з 2-ї по 7-му); в) струму симетричного КЗ; г) струму КЗ з максимальною аперіодичною складовою. Розрахунки діючого значення струму виконувалися рекурсивним методом, з частотою дискретизації кривих струмів 3200 Гц (64 вибірки за період), за вікно даних для формул (3.3) та (3.4) також були прийняті 64 вибірки, отже показані на рис. 3.5 перші значення кривих струмів $I_1(t)$ отримувалися в кінці першого періоду від початку їх моделювання.

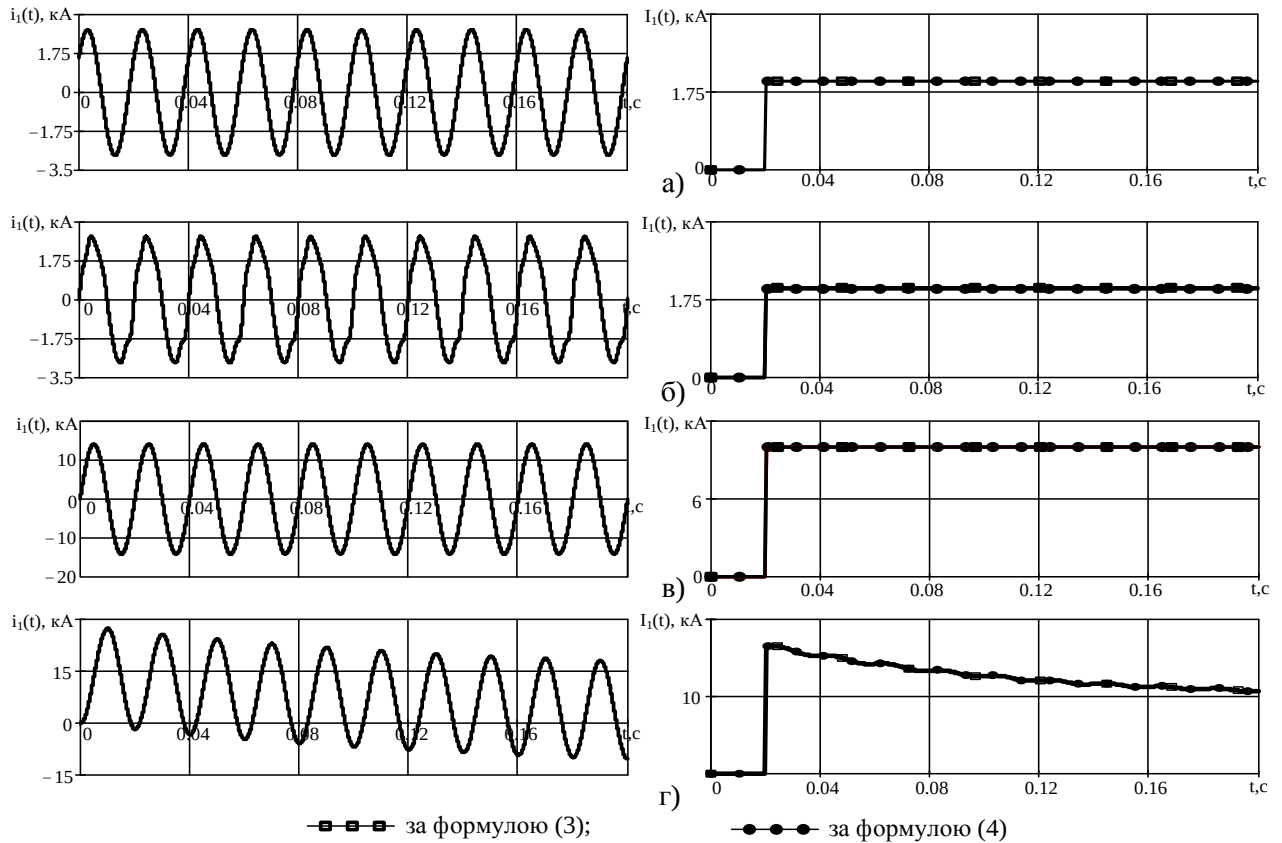


Рис. 3.5. Розрахунок діючого значення СВ

Аналізуючи рис. 3.5 приходимо до висновку, що у всіх розглянутих випадках формули (3.3) та (3.4) є придатними для оцінки діючого значення повного струму, хіба що розрахунок за моделлю (3.4), тобто з використанням ДПФ, потребує дещо більших обчислювальних затрат.

Як зазначено вище, вимірювальну інформацію про стан електрообладнання ЕЕС моніторингові системи отримують від ПВК струму, визначальним компонентом яких, з точки зору точності, є ТС. Отже, далі розглянемо задачу вибору моделі визначення діючого значення СВ при моніторингу КР за умов урахування похибок ТС, який в цьому дослідженні представлений математичною моделлю, побудованою на основі теорії феромагнітного гістерезису Джайлса-Атертона [40].

На рис. 3.6 (а) подано результати розрахунку кривої $i_2(t)$ вторинного струму ТС за умов насичення його магнітопроводу аперіодичною складовою первинного струму $i_1(t)$ (струму електромережі, тобто СВ) до і після

виникнення КЗ в енергосистемі, що сталося в момент проходження струму $i_1(t)$ через нульове значення. Рис. 3.6 (б) та 3.6 (в) відображають результати рекурсивного розрахунку залежності $I_1(t)$ за формулами (3.3) та (3.4) відповідно.

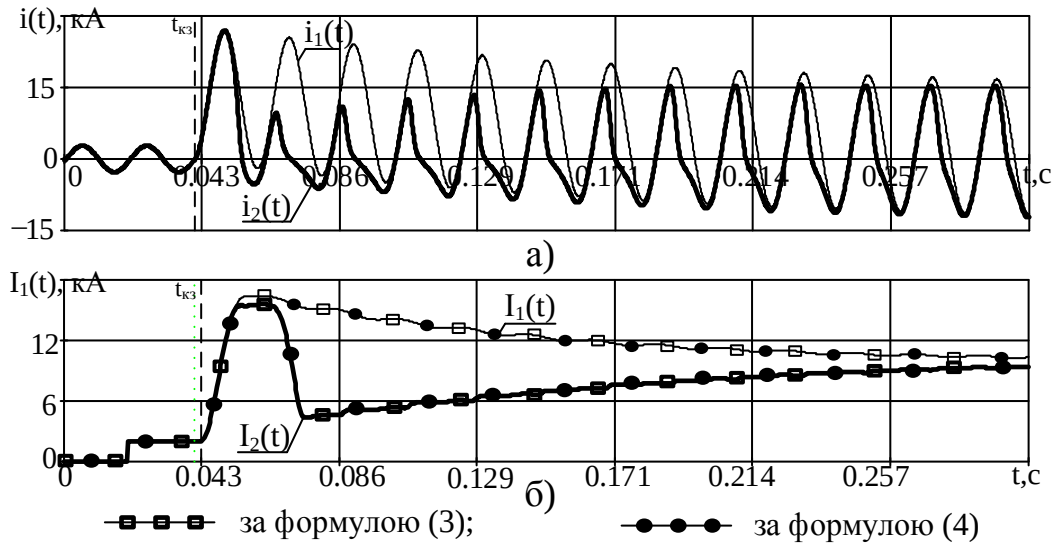


Рис. 3.6. Розрахунок діючого значення СВ за насичення магнітопроводу ТС

Проаналізувавши рис. 3.6 бачимо, що у цьому випадку струм $i_2(t)$ ТС є доволі спотвореним і характеризується не лише несиметричністю, але і значною нестационарністю. Результати розрахунків діючих значень обох струмів за формулами (3.3) та (3.4) співпадають, що свідчить про можливість застосування кожної з них для оцінки діючого значення повного струму. Проте, як видно з рис. 3.6 (б), в зоні насичення магнітопроводу ТС, $I_2(t)$ та $I_1(t)$ значно різняться між собою. Оскільки при визначенні КР в формулах (3.1) і (3.2) в дійсності використовуються значення вторинного струму ТС, то це зумовлює додаткову похибку в оцінюванні КР вимикача.

Для наглядного порівняння в табл. 3.1 подано результати розрахунків діючого значення повного СВ в числовому вираженні для усіх п'яти розглянутих випадків струму з використанням в кожному з них для визначення його діючого значення усіх трьох досліджуваних формул. Розрахунки для випадків, представлених на рис. 3.5, виконані без урахування похибок ТС, а на рис. 3.6 – з їх урахуванням. У верхній частині рядка таблиці, що стосується рис. 3.6 подано

діючі значення I_1 первинного струму ТС, а у нижній – діючі значення I_2 його вторинного струму.

Таблиця 3.1

**Порівняння результатів розрахунків діючого значення повного струму
вимкнення**

Досліджуваний. випадок СВ	Врахування похибок ТС	Діюче значення струму основної частоти, задане при моделюванні, кА	Діюче значення повного СВ розраховане за формулою, кА		
			(3)	(4)	(5)
Ідеальний синусоїдальний	Ні	2	2	2	1.999
Синусоїдальний з ВГ (з 2-ої по 7-му)	Ні	2	2.008	2.007	2.006
Струм симетричного КЗ	Ні	10	10	10	10
Струм КЗ з максимальною аперіодичною складовою	Ні	10	16.599	16.595	13.36
Струм КЗ з максимальною аперіодичною складовою	Так	10	16.392	16.391	13.722
		–	15.582	15.576	13.843

При моделюванні у випадках рис. 3.5 (г) та рис. 3.6, діюче значення струму основної частоти задавалось рівним 10 кА, фаза виникнення пошкодження рівною 0° , що викликає появу максимальної аперіодичної складової струму. Дані таблиці 3.1 засвідчують, що аперіодична складова струму КЗ виказує значний вплив на точність визначення повного діючого значення СВ. Визначення діючого значення СВ з аперіодичною складовою за формулою (3.2) є найбільш неточним. Формули (3.3) і (3.4) показують приблизно однакові результати у всіх розглянутих випадках і є більш точними. Абсолютна похибка оцінювання найбільшого діючого значення повного СВ у випадку рис. 3.6 за обома цими формулами складає 0.81 кА. Звідси актуальність розробки точної моделі визначення діючого значення вторинних струмів ТС у випадку насичення його аперіодичною складовою струму КЗ.

3.4 Моделювання життєвого циклу вимикача з використанням ресурсної характеристики

Дослідимо вагомість впливу методів апроксимації РХ вимикача та точності обчислення діючого значення СВ на якість оцінювання КР вимикача за моделями (3.1) і (3.2).

Проведена оцінка показує, що в експлуатації у переважній більшості випадків (зміна конфігурації мережі, виконання планово-ремонтних та випробувальних робіт і т. п.), ВВ відключають нормальні робочі струми електромережі (20-120% від $I_{\text{ном}}$), що складає біля 80% усіх виконуваних ними операцій, та струми різних типів КЗ, що відрізняються амплітудою, сталою часу та моментом виникнення пошкодження. Частка останніх не перевищує 20%.

Виходячи з цього, для наглядного показу як працюють моделі (3.1) та (3.2) визначення КР вимикача, в подальшому дослідженні для вибору множини досліджуваних СВ з використанням генератора випадкових величин була генерована послідовність СВ, що складається з 30 величин, серед яких відповідно до вищезазначеного відсоткового співвідношення 24 випадки відключень нормальних струмів з випадковими діючими значеннями в діапазоні 20-120% від $I_{\text{ном.відкл}} = 2$ кА та 6 випадків струму КЗ з випадковими значеннями амплітуд (кратністю $1.2-10I_{\text{ном}}$), сталими часу 0.05-0.3 с і фазами виникнення пошкодження з діапазону $0-180^\circ$.

При моделюванні прийнято, що час відключення нормального струму вимикачем у всіх випадках є сталим і становить 0.4 с, а час відключення струму КЗ рівний 0.6 с. У випадках відключення нормальних струмів похибками ТС (його параметри подані в праці [40]), знехтувано, а при відключенні струмів КЗ, похибки трансформатора струму враховувались. Усі змодельовані струми відображено на рис. 3.7.

З рис. 3.7 видно, що насичення ТС відбулось тільки у двох випадках (12-му та 20-му). У випадку 12 при струмі КЗ, що згасає зі значною сталою часу рівною

0.254 с, а у випадку 20 – при струмі КЗ з кратністю 7.5 з початковою фазою рівною 178.6° .

В таблиці 3.2 подано результати розрахунку залишкового КР (в циклах) за його моделлю (3.1) для усіх 30-ти змодельованих випадків СВ з використанням усіх розглянутих вище методів апроксимації РХ вимикача та різних моделей визначення діючого значення струму, як у разі нехтування похибками ТС, так і з їх урахуванням.

З наведених в таблиці 3.2 даних витікає, що найточнішим варіантом визначення залишкового КР слід вважати випадок з використання кубічного сплайну для апроксимації РХ, з вимірюванням струму відключення ідеальним ТС, тобто без похибок, та з розрахунком діючого значення струму за формулою (3.3). В такому разі залишковий КР вимикача після виконання ним 30 циклів відключення (з них 6-ти циклів відключення струмів КЗ) становитиме 4788 циклів відключення $I_{\text{ном}}$. У разі врахування похибок ТС, тобто за реальних умов моніторингу, залишковий КР становитиме 4858 циклів відключення $I_{\text{ном}}$. Це означає, що ТС впродовж виконання вимикачем 30 операцій відключення струму вніс похибку в оцінку залишкового КР в 70 циклів. Це порівняно незначна похибка, проте в процесі подальшої експлуатації вона буде зростати, що призведе до необхідності передчасного виведення вимикача з експлуатації для ремонту і заміни його головних контактів.

Ще більш показовим є порівняння результатів оцінювання КР за моделлю (3.1) і за показами звичайного механічного лічильника комутацій вимикача. Зокрема, після виконання вимикачем усього лише 30 циклів (в цьому прикладі) відключення КР за показами лічильника склав би 4970 циклів, а у випадку використання моделі (3.1) і нехтування похибками ТС він становить 4788 циклів, з урахуванням цих похибок – 4858, що відповідно на 182 і 112 циклів менше КР, обчисленого за показами лічильника.

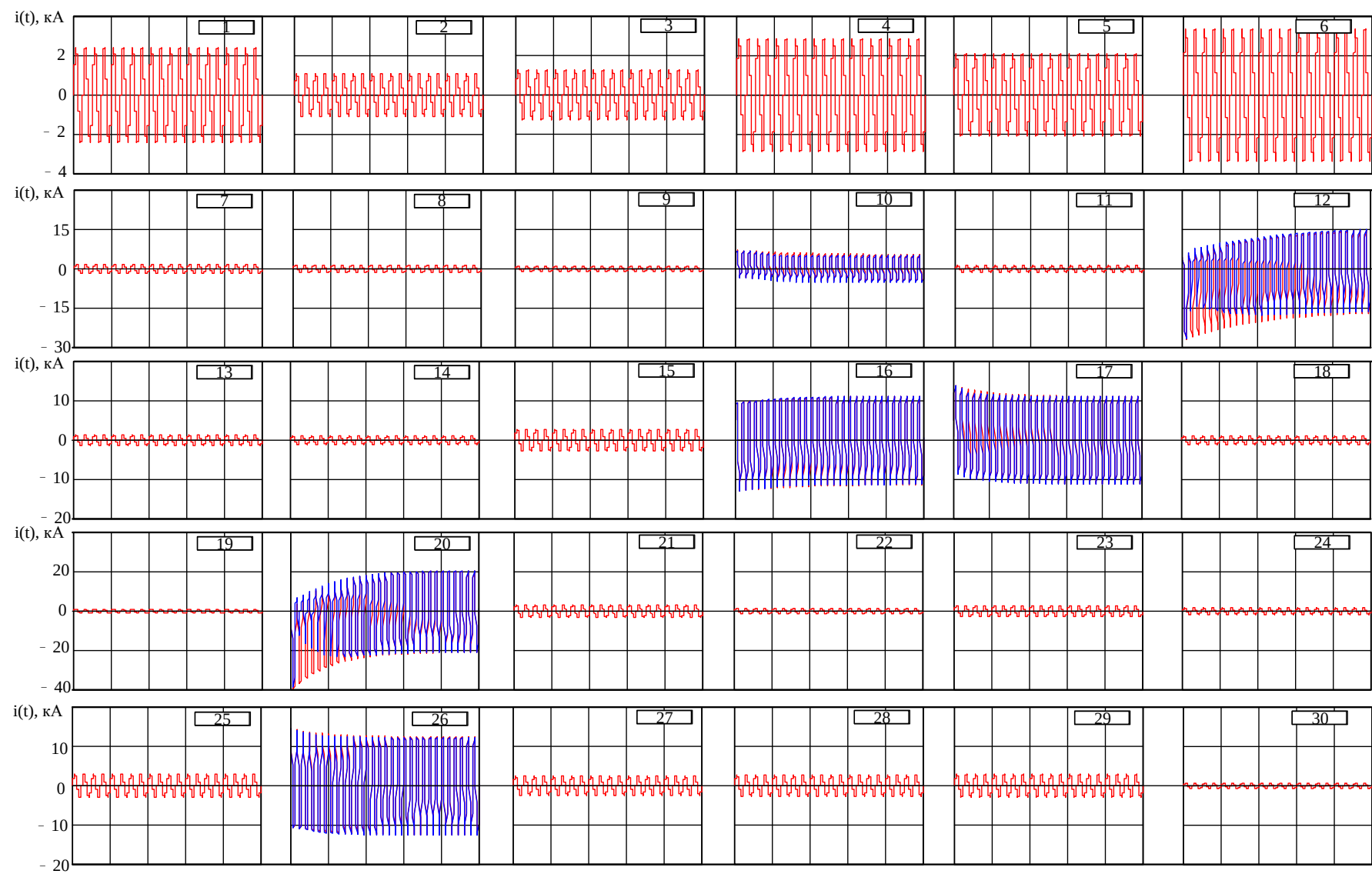


Рис. 3.7. Моделі струмів відключення

Таблиця 3.2

Розрахунок залишкового КР вимикача за моделлю (3.1)

Метод апроксимації РХ	Розрахунок діючого значення струму	Врахування похибок ТС	Комутаційний ресурс, цикл														
			Номер випадку струму відключення														
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Поліном 3-ї степені	Формула (3.5)	Ні	4999	4998	4997	4996	4995	4993	4992	4991	4990	4988	4987	4995	4994	4993	4992
		Так	4999	4998	4997	4996	4995	4993	4992	4991	4990	4988	4987	4995	4994	4993	4992
Кубічний сплайн	Формула (3.3)	Ні	4999	4998	4997	4996	4995	4993	4992	4991	4990	4986	4985	4951	4950	4949	4948
		Так	4999	4998	4997	4996	4995	4993	4992	4991	4990	4986	4985	4951	4950	4949	4948
			16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Поліном 3-ї степені	Формула (3.5)	Ні	5005	5015	5014	5013	5020	5019	5018	5016	5015	5014	4997	4996	4995	4994	4993
		Так	5004	5015	5014	5013	5020	5018	5017	5016	5015	5014	4997	4996	4995	4993	4992
Кубічний сплайн	Формула (3.3)	Ні	4926	4904	4903	4902	4811	4810	4809	4808	4807	4806	4792	4791	4790	4789	4788
		Так	4927	4905	4904	4903	4881	4880	4879	4878	4877	4876	4862	4861	4860	4859	4858

Дані табл. 3.2 також засвідчують, що застосування поліному 3-го степеня для апроксимації РХ теж вносить значні похибки в розрахунок залишкового КР. Так, зокрема бачимо, що після здійснення кожного з 16-го по 26-й циклів розрахований залишковий КР вимикача перевищує його максимальне, вказане заводом-виробником значення, а саме – 5000 циклів. Причиною цього є поява осциляцій на ділянках РХ з неточною апроксимацією.

Результати розрахунку залишкового КР вимикача у $\text{цикл} \cdot \text{кА}^2 \cdot \text{с}$ за моделлю (3.2) за таких же, як і в попередньому розрахунку вихідних даних, подано в таблиці 3.3. Як вже було відмічено ця модель за своєю суттю є точнішою за модель (3.1), оскільки враховує не тільки силу дії струму, а і її тривалість на зношення контактної системи вимикача.

Як і у випадку дослідження моделі (3.1), бачимо, що в таблиці 3.3 найточнішим є розрахунок з використанням кубічного сплайну для апроксимації РХ, вимірювання СВ ідеальним ТС з розрахунком його діючого значення за формулою (3.3). КР вимикача після виконання ним 30 циклів становитиме 128443 $\text{цикл} \cdot \text{кА}^2 \cdot \text{с}$. У випадку врахування похибок ТС, тобто за умов використання в розрахунках як СВ вторинного струму ТС, КР вимикача становитиме 141185 $\text{цикл} \cdot \text{кА}^2 \cdot \text{с}$, що на 8.5% є більшим його фактичного значення. При цьому відмітимо, що значення цієї похибки оцінювання КР визначається не тільки задіяною в розрахунках моделлю діючого значення СВ, але й інтегралом квадрату цього струму, який за умов насичення ТС є значно недооціненим.

Як і в попередньому дослідженні моделі (3.1), бачимо, що використання поліному для апроксимації РХ вносить значні похибки в оцінювання залишкового КР, який при такому підході може перевищувати визначене виробником граничне значення, як у випадках нехтування похибками ТС, так і при їх урахуванні (випадки 12-30).

Таблиця 3.3

Розрахунок залишкового КР вимикача за моделлю (3.2)

Метод апроксимації РХ	Розрахунок діючого значення струму	Врахування похибок ТС	Комутаційний ресурс, цикл·кА ² ·с														
			Номер розрахункового випадку струму відключення														
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Поліном 3-ї степені	Формула (3.5)	Ні	14999	14999	14998	14996	14995	14992	14991	14991	14991	149974	149973	150751	150751	150751	150749
		Так	14999	14999	14998	14996	14995	14992	14991	14991	14991	149974	149974	150478	150478	150478	150476
Кубічний сплайн	Формула (3.3)	Ні	14999	14999	14998	14997	14996	14993	14992	14992	14991	149958	149957	146806	146806	146806	146804
		Так	14999	14999	14998	14997	14996	14993	14992	14992	14991	149960	149960	147905	147904	147904	147903
			16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Поліном 3-ї степені	Формула (3.5)	Ні	151819	152702	152702	152702	153782	153779	153779	153777	153776	153774	152971	152970	152968	152966	152966
		Так	151521	152387	152387	152387	153163	153160	153159	153157	153157	153154	152368	152367	152365	152363	152363
Кубічний сплайн	Формула (3.3)	Ні	144951	143032	143032	143032	129105	129102	129102	129100	129100	129098	1128487	128446	128444	128443	128443
		Так	146085	144234	144233	144233	141833	141830	141830	141828	141828	141826	141189	141188	141187	141185	141185

Після моделювання тридцяти операцій відключення струму вимикачем, для порівняння моделей між собою, у табл. 3.4 зображено залишковий КР зведений до відсоткового відношення відносно максимального залишкового ресурсу моделі для всіх досліджуваних випадків.

Таблиця 3.4

Порівняння моделей за досліджуваних випадків

Поліном 3 степені, розрахунок діючого значення струму по (3.5)				Кубічний сплайн, розрахунок діючого значення струму по (3.3)			
Похибки ТС знехтувані		Похибки ТС враховані		Похибки ТС знехтувані		Похибки ТС враховані	
ЗР (3.1), %	ЗР (3.2), %	ЗР (3.1), %	ЗР (3.2), %	ЗР (3.1), %	ЗР (3.2), %	ЗР (3.1), %	ЗР (3.2), %
99.863	101.977	99.857	101.575	95.775	85.628	97.175	94.123

Видно, що моделі дають дещо різні значення, зокрема у випадку застосування кубічного сплайну для апроксимації РХ та розрахунку діючого значення струму за формулою (3.5) за нехтування похибок ТС – модель (3.1) вказує на те, що залишковий КР вимикача становить 97.312%, в той час як модель (3.2) - 92.651%. Така розбіжність зв'язана з тим, що у моделі (3.2) при кожній операції відключення визначалися інтеграли з межею інтегрування 0.4 с для усталених струмів та 0.6 с для струмі КЗ, що з одного боку є грубим припущенням, оскільки в реальних ситуаціях не в кожній операції відключення існує така тривалість часу. Як вже відмічалось раніше, ця тривалість $\tau_{\text{відкл.струму}}$ залежить від значної кількості факторів, і повинна розраховуватись і враховуватись при реальній експлуатації в кожному конкретному випадку.

3.5 Висновки до розділу

За результатами експериментально-розрахункових досліджень встановлено, що точна апроксимація РХ ВВ можлива за умов, якщо вона буде виконуватися інтерполяційним кубічним сплайном, а РХ буде задано не менш, ніж вісьмома рівномірно розміщеними вздовж всієї РХ точками.

Для розрахунків діючого значення різних за складом та характером СВ вимикача за вибірками їх миттєвих значень як для струмів усталених режимів, так і струмів перехідних режимів ЕЕС підтверджена правомірність застосування класичної моделі визначення середньо-квадратичного значення струму та ДПФ. З проведених досліджень випливає, що у випадку насичення магнітопроводу ТС актуальною є задача пошуку точного методу визначення діючого значення його нестационарного вторинного струму.

На основі виконаного кількісного оцінювання сукупного впливу точності апроксимації РХ, точності вимірювання миттєвих значень СВ в усталених і перехідних режимах ЕЕС та розрахунку їхніх діючих значень на точність визначення КР вимикача обґрунтовано доцільність використання моделі КР (2). Вдосконалено методику визначення КР, що дозволяє враховувати не лише дію СВ, але і його тривалість на зношення контактної системи вимикача. Це сприятиме підвищенню надійності функціонування та економічності експлуатації ВВ.

Посилання: [8], [10], [15], [17], [18], [26], [41], [53], [86], див. список використаних джерел стор. 127-136.

РОЗДІЛ 4

ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МОНІТОРИНГУ ЕЛЕГАЗОВИХ ВИМИКАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПІДСТАНЦІЙ

4.1 Щодо обґрунтування необхідності, основних чинників вибору та переваг застосування систем моніторингу вимикачів

Незважаючи на те, що в ОЕС України на сьогодні ще використовуються вимикачі старого покоління (повітряні та масляні), розвиток матеріальної бази електроенергетики приводить до все більш широкого використання сучасних ЕВ класу 110 кВ та вище. Це відбувається не відразу, але поступово всі ЕЕО приходять до необхідності заміни комутаційного обладнання на сучасне (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Обсяги встановлених в ЕЕС України ЕВ до 2015 року

Клас напруги, кВ	Фірма-виробник	Кількість, шт
110	ABB	427
150	ABB	382
220	ABB	18
330	ABB, Siemens	177
500	ABB	8
750	ABB, Areva	70

Відповідно до стандартних технічних вимог [6-9, 12-14] ВВ повинен бути готовий в будь-який момент здійснити комутаційний цикл в найбільш важких нормованих умовах з обумовленими в технічній документації характеристиками. Отже, головним призначенням СМ є постійний оперативний контроль технічного стану вимикача і встановлення його готовності до реалізації головної цільової функції.

Визначення технічного стану ВВ передбачає оцінювання технічного стану його механічної, контактної та ізоляційної систем, від яких насамперед залежить надійність цього надто відповідального апарату [2]. Відомо, що робочі

характеристики ВВ певним чином залежать від робочих рівнів збереженої енергії механізмів, керуючих сигналів, частоти, календарного віку ВВ (зношення, старіння) та історії його обслуговування, температури навколишнього середовища та деяких інших умов експлуатації [100]. Моніторинг дозволяє контролювати зміну робочих характеристик ВВ під впливом зазначених факторів і тому також є дуже важливим для забезпечення точного і надійного функціонування вимикача – виконання ним синхронних комутацій (комутацій ненавантажених трансформаторів, конденсаторів та реакторів, подача живлення на ЛЕП, відключення струму КЗ) і оцінювання цього впливу на строк служби ВВ.

Отже, моніторинг вимикачів використовується для вирішення двох основних завдань їх експлуатації. Перше з них – це контроль нормального режиму роботи, що дозволяє ефективніше використовувати ресурс вимикача та випереджати його аварійний стан своєчасним виведенням в ремонт. Друге – збір інформації про положення та технічний стан вимикача для систем керування та автоматизації ЕЕО [21]. Найбільш ефективним є комплексний моніторинг, який дозволяє інтегрувати рішення зазначених завдань в єдиній автоматизованій системі керування технологічними процесами (АСК ТП) [30, 77].

Розвиток технологій виробництва та широке використання мікропроцесорних пристроїв контролю, діагностики і моніторингу нових вимикачів надає широкі можливості для одержання та збору різних аналогових та дискретних сигналів з цього обладнання, збільшення кількості ПМ та поліпшення якості отримуваних даних [68, 88]. Такими сигналами можуть бути: тиск електричного дуги, температура в середині та ззовні бака, струми соленоїдів включення та відключення, струм та час заведення пружини, хід контактної групи, час відключення, положення вимикача в поточний момент часу, тощо. При цьому провідні виробники вимикачів (ABB, Siemens, Areva, Mitsubishi) не тільки роблять доступними ці сигнали для збору та використання в різних системах, але й пропонують свої рішення з їхнього моніторингу – OLM у ABB (виробництво Elcon), CBWatch у Areva, CBM (circuit-breaker monitoring) у Siemens. На жаль, ці системи працюють тільки з вимикачами конкретного

виробника. За час експлуатації цих СМ в ЕЕС України було виявлено деякі недоліки їхньої роботи.

Так, до недоліків системи OLM виробництва компанії Elcon, що поставляється на вимикачі ABB і використовується на ПС «Вінницька 750 кВ» та ПС «Пічна 330 кВ» можна віднести:

- використання в системі як системного інтерфейсу RS 485, який недостатньо захищений від електромагнітних завад, що призводить до надходження в систему великої кількості помилкових даних;
- запис осцилограм не в загальноприйнятому форматі COMTRADE;
- можливість сумісної роботи тільки з вимикачами виробництва ABB;
- роботу системи за своїм внутрішнім протоколом та відсутність можливості використання отриманих даних в іншому ПЗ, що не дозволяє провести інтеграцію даної системи в АСК ТП.

Для системи CBWatch виробництва компанії Areva, що поставляється на вимикачі Areva і використовується на ПС «Київська 750 кВ» та ПС «Західноукраїнська 750 кВ» характерні наступні недоліки:

- запис осцилограм не в загальноприйнятому форматі COMTRADE;
- запис осцилограм обмежено часом 20 мс;
- відсутність розрахунку ресурсу вимикача;
- робота тільки з вимикачами виробництва Areva.

Важливо також відмітити, що пропонуючи поетапне виконання СМ, виробники вимикачів акцентують увагу в першу чергу на світовому визнанні їхньої продукції, підкреслюючи свій досвід роботи в даній сфері та розповсюдженість саме запропонованих ними систем. Інструментарій подібних систем має чітку структуру і не дає змогу змінити чи доповнити оброблювані дані, залишаючи за виробником вибір як самої інформації для аналізу, так і параметрів оброблюваних даних, що доволі часто буває недостатнім для замовника. Натомість СМ високовольтних ЕВ розроблена в Інституті електродинаміки НАН України і реалізована підприємством «АНІГЕР» (рис. 4.1), не залежить від конкретного виробника вимикачів. При створенні цієї системи

застосовано комбінований підхід щодо вибору її технічних і програмних заходів та використано рішення від ABB та власні розробки [39, 44]. Це дозволяє використовувати перевірені часом засоби від відомого у світі виробника і при цьому не залежати від його системних рішень [35].

Створена система дозволяє використовувати будь-які сигнали, отримувані з вимикачів, має свої алгоритми аналізу отриманої інформації, використовує міжнародні телемеханічні протоколи зв'язку MEK 60870-5-104 та Modicon ModBus RTU, файли осцилограм записуються у стандартному форматі COMTRADE. Завдяки цьому інтеграція СМ в інші системи енергетичних об'єктів, в тому числі АСК ТП, не викликає труднощів.

Системи такого типу встановлені на ПС «Західноукраїнська 750 кВ», «Вінницька 750 кВ», «Дніпровська 750 кВ», «Запорізька 750 кВ», «Північноукраїнська 750 кВ», «Донбаська 750 кВ» та «Південнодонбаська 750» кВ. Ними охоплено більш як 160 ВВ.

Необхідність застосування СМ в кожному конкретному випадку повинна витікати з потреб споживача і ґрунтуватися на кількісних показниках переваг, які будуть отримані в результаті реалізації процесу моніторингу, насамперед такого показника ефективності застосування СМ як рентабельність.

На процес вибору конкретної СМ комутаційних апаратів впливає багато різних чинників:

- економічні: порівняльна оцінка вартості СМ з вартістю періодичного (за розкладом) ТО вимикача [29];
- експлуатаційні (простота експлуатації, інформативність для оперативного персоналу, зручність налаштування);
- системні (можливість інтеграції в інші системи, в тому числі в АСК ТП енергетичного об'єкту, підтримка різних протоколів передачі даних, підтримка обладнання різних виробників, отримання інформації системного рівня та організація роботи з цими даними).

З [48, 100] відомо про існування трьох методів визначення кількісних показників цих переваг: аналітичного, синтетичного і методу оцінки ризиків

пошкоджень. В першому з них детально враховуються витрати на обслуговування вимикача протягом терміну служби і витрати через різного роду пошкодження (незначні, значні і вибухові), які порівнюються з витратами в разі здійснення моніторингу і на цій основі оцінюються можливі заощадження та переваги від його виконання. Для визначення витрат через пошкодження (за рік) використовуються такі вхідні дані як інтенсивність відмов (пошкоджень), вартість і тривалість ремонту, планові збитки від простою. Основна відмінність другого методу від першого полягає в меншій складності використовуваних вхідних даних: при визначенні витрат через пошкодження використовуються середні витрати для кожної групи пошкоджень за весь період експлуатації вимикача. Третій метод полягає в оцінюванні важливості пошкоджень, ризиків їх виникнення та вигоди, які можна буде отримати завдяки використанню моніторингу для уникнення таких пошкоджень, тобто зменшення витрат на ТО і ремонт. Слід зазначити, що використання усіх цих методів, особливо останнього, можливе лише за умови доступності вихідних даних, які можуть бути отримані в результаті виконання аналізу режимів пошкоджень і дослідження оцінки їх ризиків. Це є ще одним свідченням потреби і актуальності впровадження в Україні міжнародних НД, що стосуються вибору СМ, дослідження, аналізу та звітності про відмови ВВ, про що говорилося в підрозділі 1.3.

Як було показано в попередніх розділах 1 і 2 існує значна кількість різноманітних, з різними рівнями складності, методів одержання та обробки даних моніторингу і визначення його технічного стану (див. 1.2), існує також і значна кількість ПМ (див. 1.5), які можуть бути використані при створенні СМ ВВ. Оптимальною буде система, яка за використання мінімально необхідної кількості ПМ критичних елементів ВВ, якомога простіших методів моніторингу, а також точних, надійних і доступних з точки зору вартості давачів інформації про процеси в елементах вимикача забезпечить реалізацію найважливіших функцій моніторингу, достовірність його даних і економічну ефективність системи в цілому. Потребу і обґрунтований вибір ПМ в [48, 100] пропонується виконувати на основі оцінювання важливості їх використання в трьох

перелічених нижче задачах керування за трьома рівнями: найбільш важливі, важливі і менш важливі, кожен з яких характеризується числовим значенням, відповідно 5,3, і 1. Найвищу оцінку мають ПМ, найбільш важливі для контролю поточного функціонування ВВ і забезпечення його нормальної роботи, середню – для фіксації змін параметрів і трендів цих змін, тобто ПМ, які можуть впливати на експлуатаційну надійність ВВ в майбутньому - на попередження пошкодження чи відмови, і найнижчу – ті ПМ, які необхідні для оцінки строку служби чи встановлення необхідності ТО (ремонту). Узагальнене зважене значення важливості застосування кожного ПМ в СМ визначається як сума числових значень важливості його використання в кожній з трьох вказаних задач.

4.2 Вимоги до системи моніторингу вимикачів

ВВ відносяться до електричного обладнання ЕЕС найбільш відповідального за рівень надійності та енергобезпеки роботи усієї системи передачі і розподілу електричної енергії як в нормальних, так і в аварійних і післяаварійних режимах. Забезпечення надійної роботи ПС і підвищення на цій основі надійності функціонування усієї ЕЕС, як відомо, є головною метою створюваних АСК ТП ПС 330-750 кВ, які являють собою надто складні програмно-технічні комплекси в складі СМ технологічних процесів та обладнання ПС і системи керування нею, і повинні будуватися з використанням найсучасніших технологій в галузі автоматизації ЕЕО. Тому моніторингу параметрів і технічний стан ВВ і формулюванню вимог до створення відповідної системи повинна надаватися особлива увага фахівців у цій сфері.

СМ ВВ має відповідати сучасному світовому рівню розвитку інформаційно-вимірювальних систем, вимогам НЕК «Укренерго» до реалізації систем діагностики та моніторингу електричного обладнання, загальносистемним технічним вимогам до галузевої системи оперативно-диспетчерського керування і вимогам міжнародних та вітчизняних стандартів.

Узагальнені дані щодо вимог до інформаційних систем ЕЕО, включно і вимоги до СМ, як інформаційної основи керування технологічними процесами в

електроенергетиці та інтеграційної платформи найважливіших засобів автоматизації ЕЕО і ЕЕС, подані, в працях [31, 38]. Ці вимоги сформовані на основі аналізу вимог національних і міжнародних стандартів, публікацій МЕК та літературних джерел і містять технічні, експлуатаційні, економічні вимоги, вимоги до метрологічного забезпечення, до безпеки функціонування, вимоги з боку ринку апаратних засобів та ряд ін. В [31] також зазначено, що дуже важливими факторами для побудови ефективної СМ є статус та компетенція компанії розробника і постачальника; простота впровадження, обслуговування і модернізації, можливість інтеграції з іншими системами, забезпечення технічної підтримки та рівень впровадження.

Нижче коротко подано розроблені за безпосередньої участі автора цієї праці основні вимоги технічних завдань на побудову СМ параметрів і технічного стану ЕВ ПС 750 кВ.

СМ повинна охоплювати усі ВВ ПС і базуватися на сучасному обладнанні з використанням новітніх стандартних інформаційних та програмних технологій, мати модульний принцип побудови і передбачати можливість подальшого збільшення кількості об'єктів моніторингу (ВВ).

СМ має виконуватися як відновлювана і обслуговувана система, що призначена для безперервного функціонування в цілодобовому режимі реального часу процесів в ЕЕС та контрольованих ВВ і забезпечувати збирання, обробку, накопичення та архівацію даних про параметри, характеристики і технічний стан ВВ в базі даних, а також відображення інформації на мнемосхемах програмно-технічного комплексу диспетчера.

СМ повинна бути синхронізована з системою точного часу.

В СМ повинна здійснюватися самодіагностика апаратури та каналів зв'язку.

Збирання даних вимірювань і даних про стан дискретних сигналів повинно виконуватися шляхом регулярного (циклічного) опитування датчиків інформації.

СМ повинна генерувати інформаційні, попереджувальні і аварійні повідомлення про зміну ПМ параметрів і технічний стан ВВ і виникнення нештатних ситуацій.

Передача отриманої від датчиків інформації повинна здійснюватися наступними способами: спорадично (при виході аналогових сигналів за визначений діапазон їх зміни, при зміні стану дискретних сигналів).

ПЗ повинно відповідати вимогам ГОСТ 34.201-89 «Види, комплектність і позначення документів при створенні автоматизованих систем» та РД 50-34.698-90 «Автоматизовані системи. Зміст документів».

При проектуванні системи мають бути передбачені організаційно-технічні заходи щодо інформаційної безпеки та захисту інформації від несанкціонованого доступу.

4.3 Мікропроцесорна система моніторингу вимикачів

В рамках модернізації силового обладнання ПС 750 кВ НЕК Укренерго, вперше було виконано монтаж та введено в експлуатацію 6 перших сучасних ЕВ 750 кВ. Це п'ять вимикачів GL318 виробництва фірми AREVA (Франція), що встановлені на ПС «Західноукраїнська-750 кВ» та вимикач HPL 800B4 виробництва концерну ABB (Швеція) на ПС «Вінницька - 750 кВ». Вже до кінця 2014 року на ПС 750 кВ Дніпровська було введено 8 вимикачів на напругу 750 кВ та 11 вимикачів на напругу 330 кВ, на ПС 750 кВ Західноукраїнська – 13 вимикачів на напругу 750 кВ та 16 вимикачів на напругу 330 кВ, на ПС 750 кВ Вінницька – 8 вимикачів на напругу 750 кВ, 9 вимикачів на напругу 330 кВ та 7 вимикачів на напругу 110 кВ, на ПС 750 кВ Північноукраїнська – 3 вимикачі на напругу 750 кВ та 6 вимикачів на напругу 330 кВ.

Надійна робота вимикачів 750 кВ – системоутворюючих елементів ОЕС України – багато в чому залежить від правильної експлуатації та недопущення їх роботи на межі критичних умов. СМ вимикачів, що створена в результаті виконання даної роботи дозволяє оперативному та ремонтно-експлуатаційному персоналу ПС в режимі реального часу отримувати інформацію про основні

технологічні параметри вимикачів та їх зміну в процесі експлуатації. На цій основі робиться висновок про необхідність проведення ремонтно-профілактичних робіт.

За період 2004-2016 рр. СМ ЕВ впроваджені на усіх 9-ти ПС напругою 750 кВ НЕК Укренерго, якими охоплено понад 160 ВВ.

4.3.1 Функції та структура системи моніторингу вимикачів. СМ параметрів ЕВ електричної ПС призначена для визначення поточних технічних характеристик механічної, контактної та ізоляційної частин цих апаратів і комплексного оцінювання на цій основі технічного стану ВВ та прогнозного розрахунку їх залишкового КР роботи. СМ реалізована у вигляді ієрархічної багаторівневої розподіленої системи. Нижній рівень включає в себе цифрові реєстратори «Регіна» з необхідними компонентами і ПК автоматизованого робочого місця. До верхнього рівня системи відноситься сервер з монітором і клавіатурою.

СМ проводить контроль динаміки зміни параметрів та виходу їх за встановлений діапазон, сповіщає персонал про відхилення параметрів. На основі накопичених даних підсистема виконує статистичні та прогнозні розрахунки, які впливають на обсяги та періодичність проведення ремонтів обладнання, і видає рекомендації експлуатуючому персоналу з питань:

- виявлення пошкодження обладнання або визначення тенденцій зниження його експлуатаційних можливостей;
- планування технічного обслуговування та ремонтів;
- аналізу старіння обладнання та визначення щодо можливості подальшої його експлуатації.

Система здійснює наступні функції:

- Контроль комутаційних операцій вимикача, зокрема:
 - контроль положення головних і допоміжних контактів вимикача;
 - швидкість переміщення головних контактів вимикача, їх демпфірування та повернення до граничних точок;

- наявність відхилення в механічних характеристиках (тертя, корозія, розрив, втрата елегазу, зношення пружин приводу, пошкодження демпфера, тощо);
 - розрахунок кількості комутаційних операцій в нормальних та аварійних режимах;
 - контроль струму вимкнення з записом осцилограми переміщення контактної групи, зміни стану блок-контактів, струму вимкнення;
 - наявність відхилення при спрацювання допоміжних контактів;
 - струм вимкнення;
 - оцінка електричного зношення головних контактів;
 - час горіння дуги.
 - Контроль параметрів газової суміші (SF_6 та CH_4):
 - вимірювання тиску та температури газової суміші;
 - розрахунок щільності газової суміші;
 - виявлення зрідженості газової суміші (попередження хибних спрацювань сигналізації в разі зрідження);
 - розрахунок короткострокової та довгострокової тенденції зміни тиску та щільності елегазу.
 - Контроль кіл власних потреб та оперативного струму
 - контроль правильності роботи соленоїдів;
 - наявність оперативної напруги;
 - контроль роботи системи обігріву.
 - Контроль роботи приводного механізму.
 - вимірювання часу заведення пружини;
 - контроль часу роботи електричного двигуна заведення пружини,
- виміри максимального струму роботи двигуна;
- контроль готовності приводу;
 - виявлення несправностей електричного двигуна заведення пружини приводу.

Перелік контрольованих СМ технічних характеристик і параметрів ВВ, зміст операцій контролю та індикатори їх виконання подані в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Контрольовані параметри і технічні характеристики ЕВ

Технічна характеристика (параметр)	Зміст операцій перевірки реалізації технічної характеристики (параметра)	Індикатор реалізації технічної характеристики (параметра)
1	2	3
Положення вимикача	Фіксація положення блок-контактів вимикача	Наявність сигналів від блок-контактів на екрані дисплея
Швидкість переміщення головних контактів вимикача	Фіксація сигналу від датчика переміщення по всій довжині руху з відміткою часу початку та кінця руху	Наявність вирахованого параметру швидкості на екрані дисплея
Контроль наявності відхилення в механічних характеристиках вимикача	Порівняння вимірянних технічних характеристик вимикача з їх допустимими значеннями	Наявність відхилень або його відсутності на екрані дисплею
Контроль СВ із записом осцилограми переміщення контактної групи, зміни стану блок-контактної групи, струму вимкнення	Фіксація СВ та запис осцилограми струму з переміщенням контактної групи, а також зміни її стану	Наявність осцилограми на екрані дисплею
Розрахунок кількості комутаційних операцій в нормальних і аварійних режимах	Використовуючи значення струму відключення та переміщення контактів, розрахувати ресурс спрацювання вимикача	Розрахунок ресурсу спрацювання вимикача на екрані дисплею
Контроль наявності відхилення при спрацюванні допоміжних контактів	Фіксація відхилення, якщо воно є, при спрацюванні допоміжних контактів	Наявність відхилення на екрані дисплею

Продовж. табл. 4.2

1	2	3
Контроль стану параметрів газової суміші	Вимірювання основних характеристик газової суміші (тиск, температура, зрушеність, щільність) за допомогою відповідних датчиків та алгоритмів розрахунку	Наявність вимірюваних та розрахованих параметрів газової суміші на екрані дисплею
Контроль комутаційних операцій вимкнення вимикача	Вимірювання під час вимкнення струму вимикача часу горіння дуги та розрахунок електричного зношення вимикача	Відображення на екрані дисплею вимірюваних та розрахованих параметрів
Контроль кіл власних потреб та оперативного струму	Вимірювання під час випробовувань оперативної напруги, струму соленоїдів та параметрів системи обігріву	Відображення на екрані дисплею вимірюваних параметрів
Контроль роботи приводного механізму з пружинним приводом	Вимірювання часу заведення пружини, максимального струму електричного двигуна та контроль готовності приводу з визначенням можливих несправностей	Наявність вимірюваних значень на екрані дисплею
Контроль роботи приводного механізму з гідравлічним приводом	Вимірювання часового інтервалу між пусками насосів, виявлення внутрішніх та зовнішніх гідравлічних витоків та постійний вимір тиску рідини в гідравлічній системі	Відображення на екрані дисплею контрольованих параметрів

Система є багаторівневою (необмежена кількість віддалених робочих місць) з роздільними повноваженнями користувачів та контролем підключень і складається з трьох частин: підсистеми одержання, збору та аналізу даних; системи передачі даних і ПЗ.

Структурна схема системи зображена на рис. 4.1. (для одного вимикача) і рис.4.2 (для N вимикачів) [25].

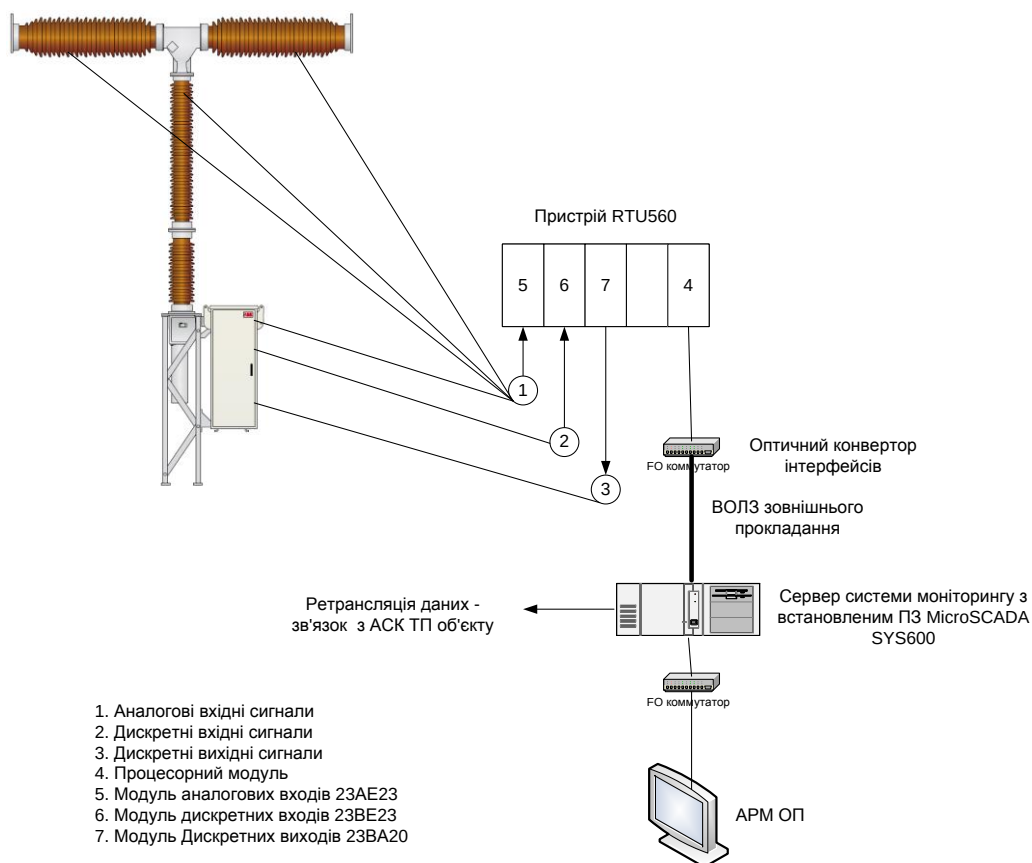


Рис. 4.1. Структурна схема СМ ЕВ

Основні технологічні величини та параметри вимикачів типу GL318 виробництва AREVA, встановлених на високовольтних РП 750 кВ, що підлягають обов'язковому контролю (у разі вимикачів з вмонтованими датчиками і внутрішніми контролерами), отримуються від функціональних датчиків, типи та характеристики яких наведені в табл. 4.3.

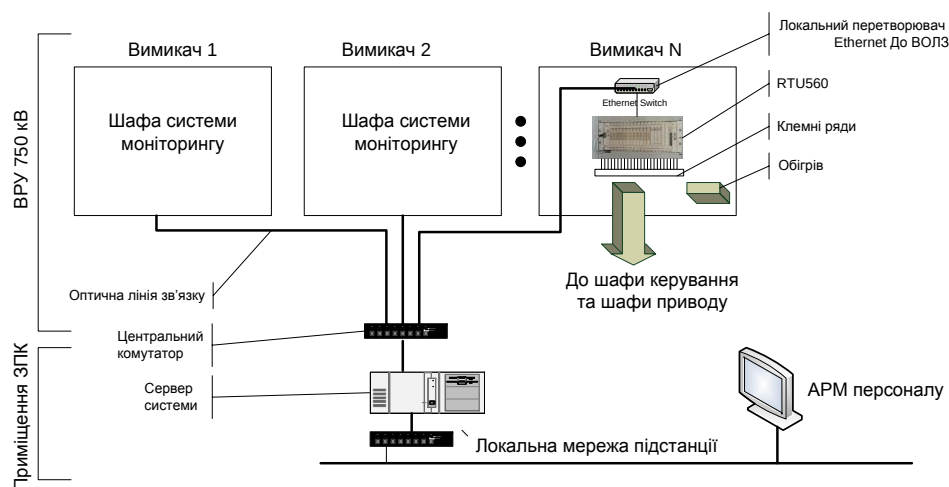


Рис. 4.2. Структурна схема організації СМ N вимикачів

Основні технологічні величини та параметри вимикачів типу GL318 виробництва AREVA, встановлених на високовольтних РП 750 кВ, що підлягають обов'язковому контролю (у разі вимикачів з вмонтованими датчиками і внутрішніми контролерами), отримуються від функціональних датчиків, типи та характеристики яких наведені в табл. 4.3.

За відсутності деяких, з вказаних в таблиці, датчиків в підсистемі моніторингу вимикачів контролюються попереджувальні та аварійні сигнали зниження тиску елегазу, його щільності та КР вимикача.

Від датчиків лише одного ВВ, які обробляються СМ, надходить більше 80-ти сигналів. Всі дані вимірювань після верифікації обробляються та зберігаються. На основі оброблених даних будуються масиви інформації про виміри, що можуть бути наведені в табличній та графічній формі. Табличні дані мають можливість експорту в стандартні файли табличного формату (xls, xml, csv), графічні дані – в розповсюджені графічні формати (jpg, gif, bmp, tif).

Система має функцію побудови, на основі отриманих даних, ліній тренду для визначення прогнозованої вимірюваної величини з різними типами апроксимації та згладжування (лінійним, логарифмічним, експоненційним, степеневим).

В СМ виконується присвоєння позначок часу кожному дискретному сигналу з точністю, що визначає однозначне розпізнання технологічних ситуацій при аналізі, наприклад двох послідовних перемикачів ВВ найвищої швидкодії, з точністю фіксації не гірше 1 мс. На основі отриманих й перевірених даних уточняється стан вимикача та визначається оперативна схема електричних з'єднань ПС та режим роботи ПС, що відображається в автоматизованих робочих місцях та фіксується в диспетчерських відомостях.

Датчики інформації підключаються до пристрою збору інформації типу CBWatch-2 і пристрою синхронізації RPH-2. Пристрої CBWatch-2 і конвертор RS485/FO розташовані в релейній шафі управління на ВРП-750. Кожен із вимикачів має два пристрої CBWatch-2. Схему підключення таких пристроїв до ІДК «Регіна» наведено на рис. 4.3.

Таблиця 4.3

Технічні характеристики датчиків СМ

Датчик	Виконання датчика (Тип)	Місце встановлення	Діапазон вимірювань	Вихідний параметр	Точність вимірювання	Частота збору даних	Кількість датчиків
Щільність або тиск елегазу	Перетворювач 4-20 мА	На заправочному блоці	0...10 бар	4-20 мА	2%	0,5 с	1
Температура (в т.ч. довкілля)	RTD	Встановлений під навісом на твердій поверхні	-50°C ...+100°C	PT100 3 проводи	1°C	1 с	5
Імпульс котушки	Кільцевасхема 2000 витків	В електричній комірці	6...10 ампер витків	Імпульс напруги (Поріг 2,5 В)		0,2 мс.	3
Блок-контакти	Блок-контакти або магнітний датчик	Опора полюсу або приводний механізм	0...1	Сухий контакт або відкритий колектор (PNP)		0,2 мс	2
Переміщення головних контактів	Датчик переміщення контактів 4-20 мА	Опора полюсу або приводний механізм	-60°C ...+60°C	4-20 мА	2%	0,2 мс	1
Тиск оливи	Датчик тиску	Комплект підкачки	0...400 бар	4-20 мА	2%	0,1 с	1
Первинний струм	Кільцева схема Витки 2000	Розподільча коробка ТС	5...200 ампер витків	2,5...100 мА	5%	0,2 м	3

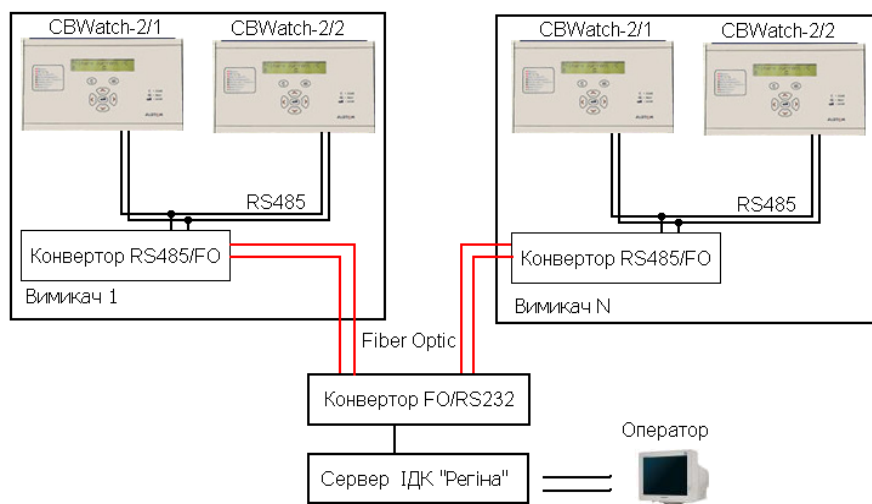


Рис. 4.3. Схема підключення пристроїв CBWatch-2 до ІДК «Регіна»

Оптичні зв'язки виконано кабелем для зовнішньої прокладки в загальних кабельних каналах ПС. Конвертор FO/RS232 знаходиться на панелі ІДК «Регіна» і перетворює оптичний сигнал в електричний. За такої схеми сервер ІДК «Регіна» є провідним, а пристрої CBWatch-2 – веденими. Загальний вигляд шафи СМ представлена на рис. 4.4.

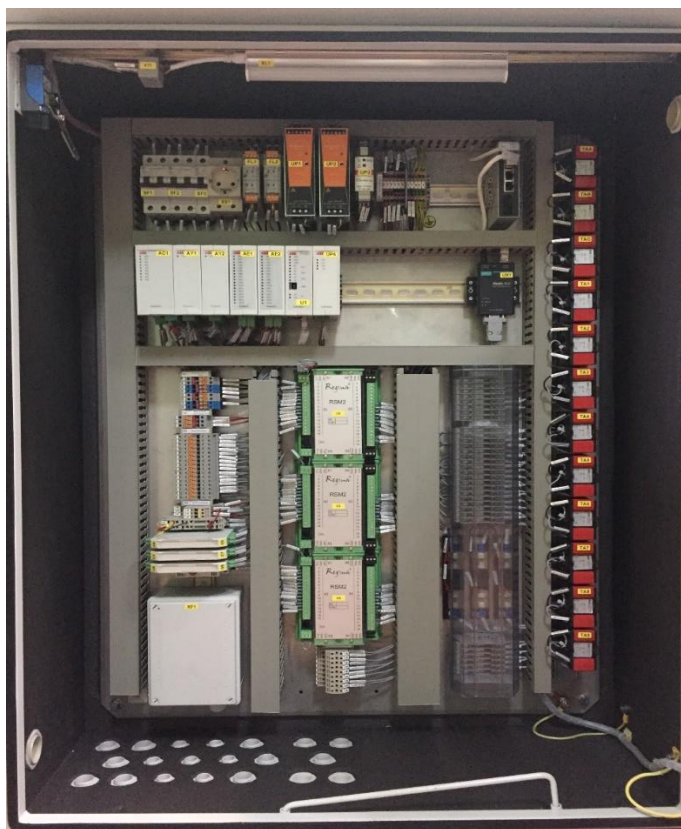


Рис. 4.4. Компонування шафи СМ ЕВ

4.3.2 Програмне забезпечення системи. ПЗ системи включає:

- системне ПЗ, до якого належать операційна система Windows Server 2003, операційна система Windows XP, реляційна база даних MS SQL Server 2005;
- сервісне ПЗ, що складається з сервісної програми CBW2Tool;
- прикладне ПЗ – пакет програмних засобів «Регіна» та програма RelayDriver.

Операційна система Windows XP – використовується для загального управління системою та забезпечує роботу іншого ПЗ.

Операційна система Windows Server 2003 – використовується для загального управління сервером, ПЗ, що на ньому встановлено, а також задля розподілу повноважень користувачів та адміністрування інформаційної мережі ПМЕВ.

Сервісне ПЗ CBW2Tool - забезпечує налаштування параметрів, а також доступ до даних CBWatch.

ПЗ RelayDriver – призначена для перегляду стану зв'язку з пристроями CBWatch, налаштування параметрів зв'язку.

Пакет програмних засобів «Регіна» - призначений для перегляду та роботи з інформацією, зібраною з пристроїв CBWatch.

Взаємозв'язок з іншими підсистемами на ПС 750 кВ ПМЕВ здійснює через стандартні канали зв'язку, а саме мережі 100 Мбіт Ethernet.

Дані, отримані з кожного вимикача (рис. 4.1), поділяються на дві групи: поточкові (дані реального часу) та буферизовані. Поточкові дані — це інформація про поточний стан параметрів вимикача: сигнальних контактів, приводного механізму, газової суміші, температури в шафах. Ці сигнали надходять до мікропроцесорного пристрою телемеханіки RTU (remote terminal unit) 560 виробництва компанії ABB та обробляються ним. Обробка таких сигналів не вимагає великої швидкодії від процесора контролера, натомість ставить високі вимоги до обсягів інформації та розрахункових можливостей. Оброблені сигнали, вже в цифровому вигляді, у відповідності до вимог міжнародного

телемеханічного протоколу IEC 60870-5-104 транслуються до сервера SCADA системи (supervisory control and data acquisition – система диспетчерського управління та збору даних).

Буферні дані – це сигнали, стан яких записується під час комутаційної операції. До таких сигналів входять: струм соленоїдів включення та відключення (при комутації через два соленоїди, що характерно для вимикачів 330-750 кВ – кожного окремо), координати руху контактної групи кожної з фаз. Дані про рух контактної групи зчитуються з давачів кутового переміщення, що перетворює з високою точністю поступовий рух штоку контактів в кутове переміщення. Через те, що власний час комутаційної операції ВВ лежить в межах 20-100 мс, RTU 560 не вистачає швидкодії обробити за записати ці дані з високою дискретністю. Для вирішення цієї задачі було розроблено власний модуль RSM-1, який проводить неперервний моніторинг вказаних сигналів та при появі переднього фронту напруги на соленоїді починає процес запам'ятовування та буферзації даних. Буфер розраховано на 12 подій по 100 мс з дискретністю 1 мс. Після заповнення буферу дані про найстарішу аварію затираються, замість них зберігаються нові. Після закінчення запису даних чергової комутаційної операції буфер передається за міжнародним телемеханічним протоколом Modicon ModBus RTU до сервера SCADA системи. На сервері проходить обробка та перевірка отриманої інформації (використовуючи контрольні суми пакетів), формування та запис файлів згідно вимог стандарту COMTRADE. Сервер SCADA системи забезпечує візуалізацію отриманих даних, їх архівацію та, при потребі, ретрансляцію на інші рівні (до суміжних систем) [104].

Розподілена обробка даних, що використовується в системі, дозволяє мінімізувати накопичувальні та розрахункові задачі на стороні клієнта та покладає ці функції на потужний сервер системи. Таким чином клієнтові надходить не увесь обсяг даних, а тільки результат конкретного запиту. Такий підхід зменшує завантаження мережі та дозволяє одночасно отримувати інформацію з багатьох місць. Налаштування системи проводиться в базі даних MS SQL Server 2005, що установлена та настроєна на сервері. Робота з

отриманою інформацією проводиться за допомогою ПЗ «Регіна» або через WEB інтерфейс на автоматизованих робочих місцях.

ПЗ користувача встановлюється тільки на сервері системи і не потребує додаткового ПЗ на комп'ютерах персоналу ПС. Ліцензійна політика дозволяє підключення необмеженої кількості користувачів системи.

4.3.3 Функціонування системи. Розглянемо послідовно роботу кожного з функціональних модулів системи.

Модуль контролю справності вузлів вимикача. Цей модуль здійснює постійний контроль справності пристроїв збору інформації, справності датчиків, рівня напруги оперативного живлення, контроль справності кіл керування. Для пружинного приводу вимикача реєструється повний час заводу пружини (час роботи електродвигуна) після комутаційної операції і при перевищенні порогового значення видається сигнал. Після кожної комутаційної операції виконується розрахунок кінематичних характеристик контактів, час перемикання блок-контактів та повний час операції, формується файл даних, сумісний зі стандартом COMTRADE. Контроль температури здійснюється в камері з елегазом кожної фази та на робочій шині. Ці дані дозволяють розрахувати відносну щільність елегазу та ефективність роботи обігріву.

Модуль контролю стану елегазу [33, 39]. В даному модулі постійно вимірюються величини тиску і густини елегазу, відбувається порівняння з пороговими значеннями. У разі виходу за діапазон допустимих значень разом з вихідними реле сигналізації система сповіщає черговому персоналу про виникнення несправності. Додатково проводиться аналіз зниження тиску і густини елегазу з часом в постійному режимі, а також після комутаційних операцій. На основі цих даних прогнозується дата критичного зниження параметрів елегазу і застосовування засобів з припинення аварійної ситуації. Прогнозування поділяється на дві категорії – короткострокове і довгострокове. Для довгострокового прогнозування реєструються значення еквівалентного тиску при 20°C на кожному з полюсів. З метою мінімізації впливу параметрів оточуючого середовища (сонячні промені) реєстрація значень виконується

опівночі. Зареєстровані значення використовуються з метою проведення лінійної екстраполяції еквівалентного тиску при 20°C в майбутньому. Дана операція дозволяє спрогнозувати, яким буде значення еквівалентного тиску при 20 °C в майбутньому. Пристрій CBWatch-2 зберігає дані реєстрації від 20 до 200 діб, а система дозволяє зберігати дані за період до 3 років.

Реєстрація даних за тривалий проміжок часу дозволяє робити висновки про залежність параметрів елегазу від багатьох зовнішніх чинників – струму навантаження, сезонних змін температури, вологості, атмосферного тиску. Такі дослідження в Україні раніше не проводилися.

При здійсненні незалежного контролю газових об'ємів 3 фаз достовірно знаходження відносно швидких збігів виконується шляхом порівняння вимірних значень густини для трьох фаз, узятих по дві.

Якщо припустити, що збігання відбувається в одній із трьох фаз, то швидкість збігання може бути розраховано без необхідності врахування впливу зовнішніх чинників [1]. Ця розрахункова швидкість збігання використовується для прогнозування значення густини в майбутньому (період параметризації – від 20 хвилин до 20 годин).

Модуль контролю комутаційних операцій. Технічному персоналу, що обслуговує вимикач, необхідно мати достовірні дані про роботу всіх його вузлів і механізмів під час комутаційної операції. Виходячи з цих даних, можна робити висновки про стан вимикача, необхідності його ремонту (корекція графіку технічного обслуговування), провести діагностику відмов в механічній роботі. Наявність датчиків положення контактної системи дозволяє проводити постійний контроль взаємного положення полюсів в нормальному режимі і в режимі комутації. При кожній операції відключення (включення) і для кожної з фаз реєструються наступні параметри (див. рис. 2.2):

t_0 – момент виникнення імпульсів відключення (включення);

T_1 – час між моментом появи струму в котушці ввімкнення (вимкнення) і моментом, коли вимикач виходить з положення «вимкнено» («ввімкнено»);

T_2 – час між моментом появи струму в котушці ввімкнення (ввімкнення) та

моментом, коли вимикач переходить в стан «ввімкнено» («вимкнено»).

Таким чином, оператор отримує повну часову характеристику комутаційної операції. Система додатково реєструє і зберігає дату і час операції, тип операції в циклі (Вимкн-Ввімкн-Вимкн), дані про параметри елегазу, максимальний струм вимикання, рівень напруги оперативного керування, температуру навколишнього середовища. На рис. 2.2 наведено діаграми вимкнення/ ввімкнення вимикача.

Модуль контролю струму вимкнення і розрахунку електричного зношення. На протязі усього терміну експлуатації вимикача система в пристрої CBWatch-2 накопичує та обробляє дані про струм, який вимкнений дугогасними контактами та час горіння електричної дуги, у відповідності до алгоритму, що реалізує вдосконалену і обґрунтовану в розділі 3 модель залишкового КР (3.2). Виконується апроксимація РХ інтерполяційним кубічним сплайном; обчислення діючого значення СВ, які в загальному випадку можуть бути нестационарними, в кожному циклі відключення виконується з урахуванням похибок ТС, що представлений моделлю, побудованою на основі теорії феромагнітного гістерезису Джайлса-Атертона.

Для кожної з фаз визначаються порогові величини сумарного електричного зношення та найбільшого часу горіння дуги. При перевищенні цих уставок видається попереджувальний (аварійний) сигнал до системи центральної сигналізації.

Документи з державної сертифікації СМ ЕВ подано в додатку Б.

4.4 Результати реалізації методу моніторингу стану газової суміші елегазових вимикачів

Перші результати роботи СМ стану ЕВ на електричній ПС “Західноукраїнська 750 кВ” показали її високу ефективність і отримали позитивні відгуки обслуговуючого персоналу.

СМ постійно отримує дані від датчиків тиску та густини елегазу і зберігає їх в базі даних. Аналізуючи рівень та швидкість зменшення густини елегазу в

газових камерах полюсів вимикача, система готує рекомендації щодо необхідності поповнення елегазу. На рис. 4.5 наведено графік виміру густини елегазу вимикача GL318 на приєднанні Р-15 електричної ПС «Західноукраїнська 750 кВ» (дані отримано 14 жовтня 2005 р., час початку запису – 0:48:00, час закінчення – 23:48:00). При зниженні тиску елегазу до рівня 400 кПа вимикач блокується і команда виконання комутаційної операції не виконується.

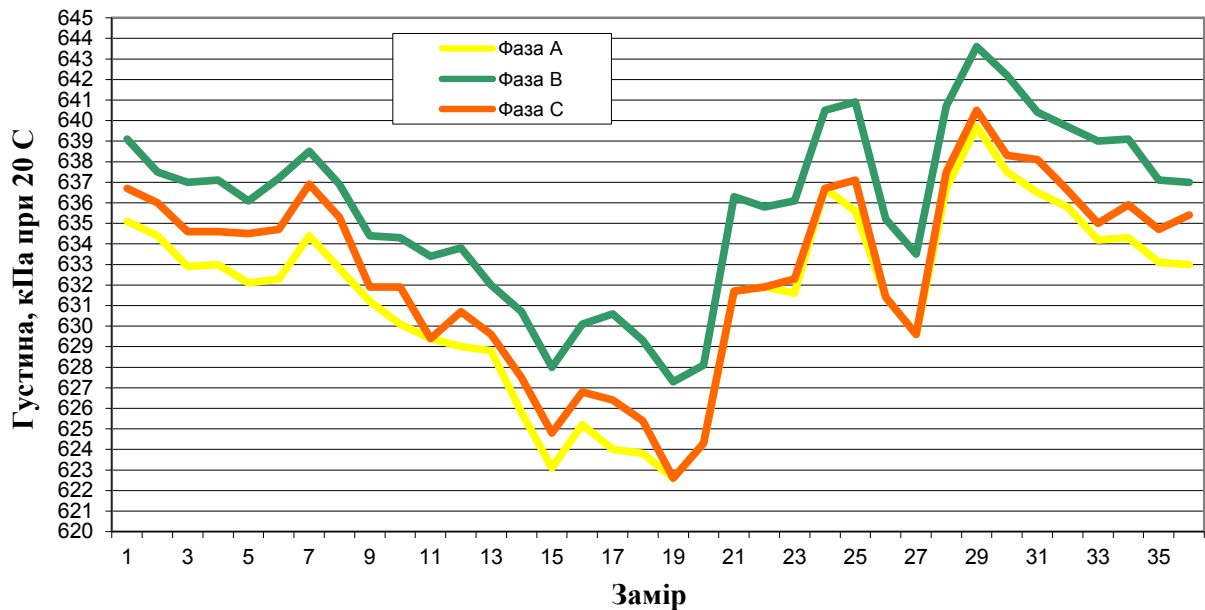


Рис. 4.5. Графік зміни густини елегазу протягом доби (по осі абсцис вказано номери вимірів, що виконувалися кожні 40 хвилин).

Коливання густини елегазу в камерах полюсів вимикача пояснюються змінами навколишньої температури. На рис. 4.6 зображено графік зміни навколишньої температури у відповідний момент реєстрації густини елегазу. На підставі аналізу двох діаграм (рис. 4.5 та рис. 4.6) видно, що розрахувати прогнозоване значення густини елегазу та швидкість витрачання елегазу доволі складно саме через їх залежність від температури, тому інформація, що характеризує поточну густину елегазу, вкрай необхідна.

З метою визначення зменшення густини елегазу в кожній камері виконується порівняння її густини з густиною елегазу інших камер. Такий метод є виправданим з урахуванням того, що відстань між фазами (полюсами)

невелика і температура суттєво не відрізняється. Але такий аналіз потребує чіткого початкового налагодження вимикача на етапі заправки камер елегазом та перевірки його тиску та густини.

Якщо витрачання елегазу буде відбуватися дуже швидко, то СМ видає попереджувальний сигнал (не пізніше ніж за 20 хвилин до досягнення першого рівня уставки) на основі аналізу темпів зменшення густини елегазу. Завдяки цьому черговий оперативний персонал має можливість прийняти рішення щодо унеможливлення блокування вимикача.

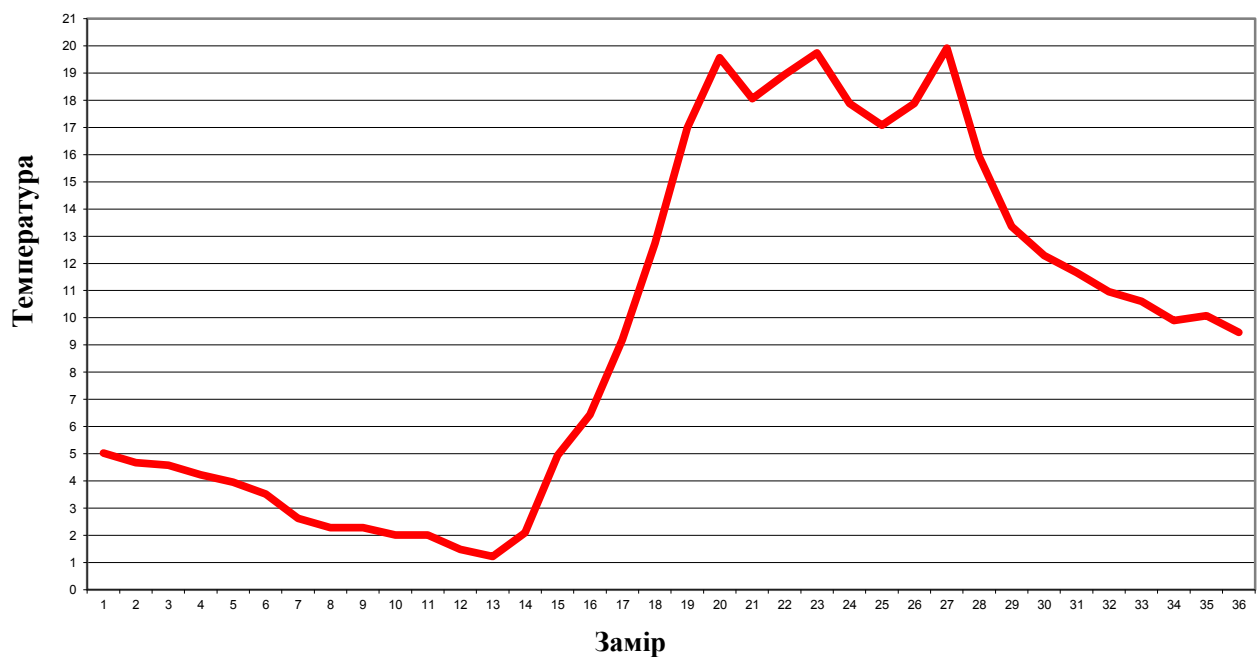


Рис. 4.6. Графік зміни температури

З метою профілактики роботи вимикача доцільно використовувати графік зміни густини, побудований на добовому замірі. Такий замір виконується раз на добу в нуль годин (з метою виключення впливу прямих сонячних променів).

На рис. 4.7 показано динаміку зміни густини елегазу для трьох фаз вимикача в період з 21.09.2005 по 14.10.2005.

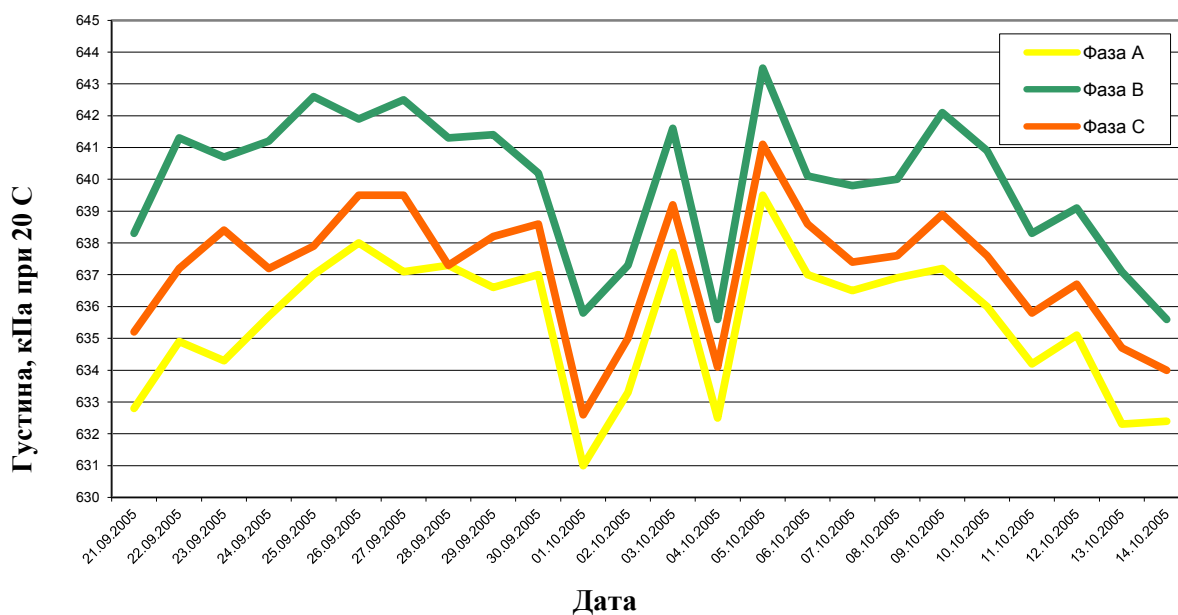


Рис. 4.7. Місячна зміна густини елегазу

Розрахунок швидкості витрачання елегазу виконується шляхом побудови лінії тренду для фази (наприклад, для фази з найменшим середнім тиском – в наведеному прикладі це фаза А) та визначення функції, що описує цю залежність. Графік зміни густини елегазу в камері фази А та лінію тренду із прогнозом на наступні 20 діб наведено на рис. 4.8.

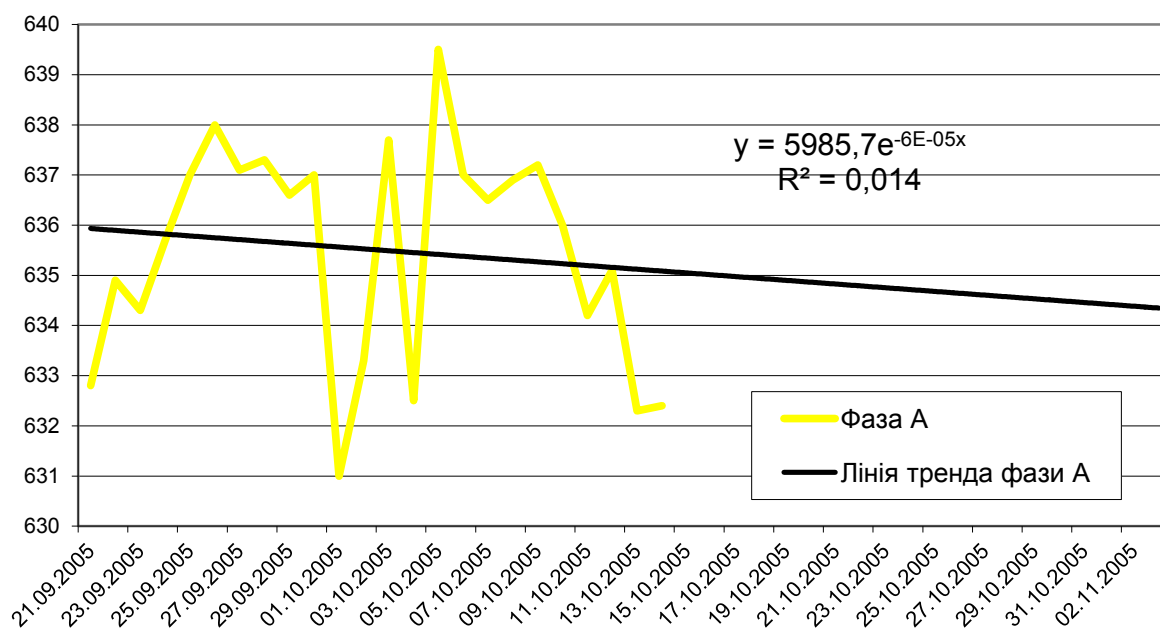


Рис. 4.8. Графік зміни густини з лінією тренду для фази А

На рис. 4.9 представлено графік довгострокового прогнозу зниження густини елегазу для фази А вимикача 750 кВ ВР-15, побудований на основі даних моніторингу за період з 01.03.2005 р. до 25.03.2005 р.



Рис. 4.9. Довгостроковий прогноз зниження густини SF₆

Після визначення функції зміни значення густини елегазу розраховується час, коли рівень густини зменшиться до уставки попереджальної сигналізації. Її спрацьовування, за розрахунком, буде більше ніж за 10000 діб. Витрачання елегазу, передбачене заводом, в межах 1% на рік. Але це лише за умов впливу на вимикач зовнішніх кліматичних чинників. При кожній комутаційній операції рівень густини зменшується, тому потрібно виконувати розрахунок (уточнення) довгострокового прогнозу густини елегазу.

Таким чином за поточними даними вимірювань технологічних параметрів ЕВ прогнозуються терміни, коли параметри елегазу досягають критичної межі і вимикач може бути заблокований. При сповіщенні оперативного персоналу він повинен вжити невідкладних заходів, щоб попередити аварійну ситуацію. В табл. 4.4 подані значення абсолютного тиску (МПа) газової суміші SF₆ (50%) +

CF₄ (50%) скориговані за температурою, які використовуються при розрахунку тиску поповнення камери вимикача чистим елегазом SF₆ і тетрафторметаном CF₄.

Таблиця 4.4

Значення абсолютного тиску (МПа) газової суміші

Температура, °C	Тиск, МПа	Температура, °C	Тиск, МПа	Температура, °C	Тиск, МПа	Температура, °C	Тиск, МПа	Температура, °C	Тиск, МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-40	0,774	-20	0,849	0	0,925	20	1	40	1,075
-39	0,778	-19	0,853	1	0,928	21	1,004	41	1,079
-38	0,782	-18	0,857	2	0,932	22	1,006	42	1,083
-37	0,785	-17	0,861	3	0,936	23	1,011	43	1,087
-36	0,789	-16	0,864	4	0,94	24	1,015	44	1,09
-35	0,793	-15	0,868	5	0,944	25	1,019	45	1,094
-34	0,797	-14	0,872	6	0,947	26	1,023	46	1,096
-33	0,801	-13	0,876	7	0,951	27	1,026	47	1,102
-32	0,804	-12	0,88	8	0,955	28	1,03	48	1,105
-31	0,808	-11	0,883	9	0,959	29	1,034	49	1,109
-30	0,812	-10	0,887	10	0,962	30	1,038	50	1,113
-29	0,816	-9	0,891	11	0,966	31	1,041	51	1,117
-28	0,819	-8	0,895	12	0,97	32	1,045	52	1,12
-27	0,823	-7	0,898	13	0,974	33	1,049	53	1,124
-26	0,827	-6	0,902	14	0,977	34	1,053	54	1,128
-25	0,831	-5	0,906	15	0,981	35	1,056	55	1,132
-24	0,834	-4	0,91	16	0,985	36	1,06	56	1,136
-23	0,838	-3	0,913	17	0,989	37	1,064	57	1,139
-22	0,842	-2	0,917	18	0,992	38	1,068	58	1,143

4.5 Висновки до розділу

1. На основі виконаного аналізу технічних характеристик і можливостей СМ ВВ різних виробників, що впроваджені в ЕЕС України, виявлені недоліки кожної з цих систем і запропоновано СМ, яка ґрунтується на комбінованому використанні рішень одного з провідних в світі виробників ВВ – фірми АВВ та розробок автора, технічних та програмних засобів запропонованих в цій роботі.

Впровадження розробленої системи забезпечує моніторинг ВВ будь-якого виробника, обробку будь-яких сигналів, отримуваних від датчиків ВВ, і пов'язаних з ними ПМ, інтеграцію СМ в інші системи ЕЕО, включно і в АСК ТП.

2. Встановлені чинники, що визначають потребу та впливають на вибір конкретної СМ, подано визначення оптимальної СМ, розкрита сутність трьох існуючих в міжнародній практиці методів визначення кількісних показників переваг, отримуваних в результаті реалізації процесу моніторингу ВВ.

3. На основі аналізу загальних вимог до інформаційних систем ЕЕО, вимог НЕК «Укренерго» до реалізації систем діагностики та моніторингу електричного обладнання, вимог вітчизняних і міжнародних стандартів сформовані технічні вимоги до СМ ВВ електричної ПС. СМ, що задовольняють цим вимогам, здатні забезпечувати постійний оперативний контроль технічного стану усіх ВВ ПС і встановлювати їх готовність до виконання головної цільової функції – здійснення комутаційного циклу в найбільш важких нормованих умовах з обумовленими в технічній документації характеристиками.

4. Визначені і обґрунтовані показники та фактори моніторингу елегазових вимикачів напругою 750 кВ, що стосуються стану та параметрів їх газової суміші. Розроблено метод моніторингового контролю параметрів газової суміші елегазових вимикачів на напругу 750 кВ, що полягає у вимірюванні та фіксації тиску і температури газової суміші в дугогасильній камері до і після кожної комутаційної операції, фіксації часу розмикання головних контактів і розрахунку часу горіння дуги кожного полюса вимикача, порівнянні отриманих даних з уставками контролю і формуванні на цій основі висновку про стан газової суміші в дугогасних камерах вимикача.

5. Розроблено національну багатофункціональну мікропроцесорну систему онлайн моніторингу високовольтних ЕВ, теоретичну основу якої складають наукові положення дисертації, а технічні та програмні засоби являють собою комбінацію рішень автора цієї роботи та відомого в світі виробника вимикачів – фірми ABB.

Система інваріантна щодо типу ВВ та їх фірм-виробників, адаптована до використання сигналів будь-яких датчиків, підтримує різні протоколи передачі даних, а також забезпечує можливість інтеграції в інші системи автоматизації ЕЕО, включно і АСК ТП.

6. Подано результати практичного застосування розробленої СМ ВВ на ПС «Західноукраїнська-750 кВ» в частині моніторингового контролю ізоляційної системи ВВ, а саме: отримані графіки зміни густини елегазу протягом доби і місяця та відповідні їм за часом графіки зміни температури навколишнього середовища, за якими побудовано лінію тренду з прогнозом зниження густини елегазу на наступні 20 діб, а також розраховані значення абсолютного тиску (МПа) газової суміші SF_6 (50%) + CF_4 (50%) скориговані за температурою, які використовуються при розрахунку тиску поповнення камери вимикача чистим елегазом SF_6 і тетрафторметаном CF_4 .

Посилання: [1], [2], [6-9], [12-14], [21], [25], [29-31], [33], [35], [38], [39], [44], [48], [68], [77], [88], [100], [104], див. список використаних джерел стор. 127-137.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв'язано важливе для електроенергетичної галузі країни наукове завдання розвитку науково-технічних основ побудови СМ високовольтних ЕВ електричних підстанцій напругою 750 кВ шляхом розроблення нових методів моніторингу параметрів і технічного стану ЕВ та вдосконалення моделі оцінювання залишкового КР, що забезпечує підвищення надійності, безпеки та ефективності експлуатації цих апаратів і ЕЕС в цілому.

Основні наукові і практичні результати роботи

1. Аналіз практики експлуатації ЕВ свідчить про випадки їх пошкоджень, відмов і аварій. Для контролю технічного стану ЕВ в експлуатації використовуються методи та засоби технічного діагностування під час їх планових періодичних обстежень, а в багатьох випадках виконується лише візуальний контроль стану елегазу і положення контактної системи вимикача. Моніторинг параметрів і технічного стану цих апаратів до часу виконання цієї роботи не здійснювався.

2. Показано, що побудова систем онлайн моніторингу ЕВ є важливою умовою не лише підвищення надійності та безпеки їх експлуатації, а також і впровадження прогресивних систем ТО цього надто відповідального електричного обладнання енергосистем. Досліджено і сформульовано актуальні питання побудови таких систем: вибір контрольованих параметрів і характеристик ЕВ та відповідних їм ПМ; розробку, вибір і наукове обґрунтування ефективних методів обробки та аналізу сигналів різного роду давачів інформації про технічний стан вимикачів; реалізація системного підходу до моніторингу, охоплення ним максимальної кількості елементів ЕВ та розширення функціональних можливостей систем.

3. Обґрунтовано необхідність оновлення та гармонізації нормативного забезпечення ЕВ з міжнародними стандартами; розроблення відповідно до вимог чинних галузевих документів нормативного забезпечення моніторингу ЕВ; актуальність і значимість впровадження в електроенергетичній галузі

міжнародних стандартів щодо вибору СМ ЕВ, дослідження, аналізу та звітності про їх відмови. Впровадження зазначених нормативних документів сприятиме успішній реалізації технічної політики в галузі, дасть змогу вдосконалити моніторинг і підвищити керованість електроенергетичними об'єктами і ЕЕС.

4. Розроблено метод і алгоритм неперервного онлайн моніторингу технічного стану механічних елементів ЕВ, реалізація яких забезпечує одержання значної кількості важливих ПМ вимикача, що стосуються практично усіх його механічних елементів, підвищує достовірність результатів моніторингу механічних елементів і вимикача в цілому.

5. Доведена правомірність застосування класичної моделі визначення середньо-квадратичного значення струму та швидких перетворень Фур'є для розрахунків діючого значення різних за складом та характером СВ вимикача за вибірками їх миттєвих значень як для симетричних і квазістаціонарних струмів усталених режимів, так і несиметричних струмів перехідних режимів ЕЕС. Показано актуальність розв'язання задачі пошуку точного методу визначення діючого значення нестационарних струмів, якими є приведені до первинної обмотки вторинні струми ТС, у випадку насичення магнітопроводу ТС аперіодичною складовою струму КЗ.

6. На основі одержаних результатів кількісного оцінювання сукупного впливу точності апроксимації РХ, точності вимірювання миттєвих значень СВ в усталених і перехідних режимах ЕЕС і точності розрахунку їхніх діючих значень на точність визначення КР вимикача вдосконалена модель залишкового КР, використання якої дозволяє врахувати не лише дію СВ, але і їх тривалості на зношення контактної системи вимикача, що забезпечує більш точне визначення КР і підвищення ефективності експлуатації ЕВ.

7. Розроблено метод моніторингу параметрів газової суміші ЕВ на напругу 750 кВ, що забезпечує збільшення об'єму і підвищує достовірність даних моніторингу про параметри та технічний стан вимикача і дає змогу адекватно визначати існування загрози відмови вимикача та своєчасно приймати

обґрунтовані рішення про необхідність проведення ремонтно-профілактичних робіт.

8. Результати роботи впроваджені у МПП «АНІГЕР» у виробництво багатофункціональної мікропроцесорної системи комплексного онлайн моніторингу ЕВ на напругу 330-750кВ. Система інваріантна щодо типу ЕВ та їх фірм-виробників, адаптована до використання сигналів будь-яких датчиків, підтримує різні протоколи передачі даних, а також забезпечує можливість інтеграції в інші системи автоматизації електроенергетичних об'єктів, включно і АСК ТП.

9. Система моніторингу впроваджена на усіх 9-ти підстанціях напругою 750 кВ ОЕС України, де нею охоплено більш як 160 ЕВ, що практично виключає можливість відмов у спрацюванні вимикачів або їх вихід з ладу, сприяє скорішому впровадженні прогресивної системи ТО вимикачів, підвищенню надійності та ефективності функціонування електроенергетичного комплексу країни в цілому.

10. Достовірність та практичне значення отриманих в роботі результатів у вигляді наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджені свідоцтвом про державну метрологічну атестацію, сертифікатами відповідності і експертизи типу, двома деклараціями про відповідність розробленої СМ вимогам технічних регламентів, а також багаторічною експлуатацією цих систем на підстанціях 330-750 кВ ОЕС України.

11. Подальше використання наукових і практичних результатів дисертаційної роботи доцільно здійснювати шляхом впровадження розробленої системи в енергосистемах України та за кордоном для моніторингу параметрів елегазового обладнання електроенергетичних об'єктів, а також при підготовці наукових та перепідготовці інженерних кадрів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Агафонов Г. Е., Бабкин И. В., Берлин Б. Е. Электрические аппараты высокого напряжения с элегазовой изоляцией. СПб.: Энергоатомиздат, 2002. 727 с.
2. Бедерак Я. С., Богатырев Ю. Л. Об интеграции устройств релейной защиты с системами технической диагностики электрооборудования. *Электронорама*. 2010. №9. С.46-49.
3. ГКД 34.20.507-2003. Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила. Затверджено наказом Мінпаливенерго України від 13.06.2003р. №296. ОЕП «ГРІФРЕ». Київ, 2003. 613 с.
4. ГКД 34.20.661-2003. Правила організації технічного обслуговування і ремонту обладнання, будівель і споруд електростанцій та мереж Міненерго України. ОЕП «ГРІФРЕ». Київ, 2003. 227 с.
5. ГНД 34.47.503-2004. Інструкція з експлуатації елегазових вимикачів. — К.: «ГІФРЕ», 2004. 40 с.
6. ГОСТ 12450-82. Выключатели переменного тока на номинальные напряжения от 110 до 750 кВ. Технические требования к отключению ненагруженных воздушных линий и методы испытаний. М., 1982. 8 с.
7. ГОСТ 18397-86. Выключатели переменного тока на номинальные напряжения 6–220 кВ для частых коммутационных операций. Общие технические условия. М., 1986. 31 с.
8. ГОСТ 4.176-85. СПКП. Аппараты электрические высоковольтные. Номенклатура показателей. М., 1986. 17 с.
9. ГОСТ 687-78. Выключатели переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Общие технические условия. М., 1980. 53 с.
10. Грабко В. В. Методы и средства технической диагностики выключателей больших электрических токов : дис. ... канд. техн. наук: 05.11.16 / Винницкий политехн. ин-т. Винница, 1990. 174 с.

11. Грабко В. В., Мокін Б. І. Моделі та системи технічної діагностики високовольтних вимикачів. Вінниця: «Універсум-Вінниця», 1999. 74 с.
12. ДСТУ 2848-94. Апарати електричні комутаційні. Основні поняття. Терміни та визначення. [Чинний від 23.11.1994]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 1994. 17 с.
13. ДСТУ EN 62271-104: 2016. Пристрої контрольні розподільчі високовольтні. Частина 104. Перемикачі змінного струму для номінальної напруги понад 52 кВ (EN 62271-104:2015, IDT). [Чинний від 22.08.2016]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2016. 55 с.
14. ДСТУ EN 62271-1:2015. Пристрої контрольні розподільчі високовольтні. Частина 1. Загальні технічні вимоги (EN 62271-1:2008, IDT). [Чинний від 25.12.2015]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2015. 8 с.
15. Калиткин Н. Н. Численные методы. Главная редакция физико-математической литературы изд-ва "Наука". М.: 1978. 512 с.
16. Кутін В. М., Рубаненко О. Є., Мисенко С. В. Визначення технічного стану елегазових високовольтних вимикачів в умовах експлуатації. *Вісник НТУ «ХП»*. 2014. Вип. 60. С. 57-67.
17. Максимчук В. Ф., Стогній Б. С., Сопель М. Ф., Тутик В. Л., Михайлевський О. С., Панов А. В. Мікропроцесорна система моніторингу і прогнозу залишкового ресурсу елегазових високовольтних вимикачів: пат. 73398 України: МПК G 07 C 3/10. №u 2012 02069; заявл. 23.02.12; опубл. 25.09.2012, Бюл. №18.
18. Минкина И. С., Романов А. А. Алгоритм оценки остаточного ресурса выключателя. *Электрические станции*. 2004. №12. С. 58-62.
19. Моніторинг та діагностування стану високовольтних вимикачів електричних станцій та підстанцій («МОНІД») : звіт про НДР (заклучн.) 23.11.2006 / Інститут електродинаміки НАН України ; кер. Б. С. Стогній; викон. : М. Ф. Сопель [та ін.]. Київ, 2006. 83 с. Інв. № 0104U006383.

20. Наумкин И. Е. Аварийные отказы элегазовых выключателей при коммутациях компенсированных ВЛ 500-1150 кВ. *Электричество*. 2012. №10. С. 22-32.

21. Панов А. В., Войтов Д. В., Нестриженний М. О. Деякі практичні питання моніторингу елегазових вимикачів. *Праці ІЕД НАНУ*. 2013. Вип. 36. С. 71-74.

22. Панов А. В., Паньків В. І., Сопель М. Ф., Стогній Б. С., Танкевич Є. М. Актуальні питання моніторингу і технічного обслуговування високовольтних вимикачів. *Технічна електродинаміка*. 2018. №2. С.75-85.

23. Панов А.В., Паньків В.І., Сопель М.Ф., Танкевич Є.М. Вдосконалення моніторингу технічного стану механічних елементів високовольтних вимикачів. *Праці ІЕД НАНУ*. 2018. Вип. 51. С. 99-109.

24. Побудова та експлуатація електричних мереж. Технічна політика. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. Київ, 2012. – 250 с. URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/officialcategory?cat_id=35016.

25. Приступчук А., Мовчан С., Панов А. Автоматизированные системы управления MICROSCADA PRO с применением удаленных терминалов RTU как надежное решение для всех уровней автоматизации. *Электрические сети и системы*. 2012. №3. С. 95-105.

26. Рогоза В. В., Сопель М. Ф., Чернякин В. П., Лесновская С. Л. Алгоритм определения остаточного ресурса выключателей : Автоматизация и релейная защита в энергосистемах. Сб. науч. трудов. Институт электродинамики АН Украины. Киев. 1992. С. 167-170.

27. Рубаненко О. Є., Ведміцький Ю. Г., Мисенко С. В. Вдосконалення методів визначення технічного стану високовольтних вимикачів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2016. №3. С.78-86.

28. Рубаненко О. Є., Мисенко С. В. Координація впровадження та забезпечення надійності елегазових вимикачів в умовах експлуатації. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2013. №1. С. 135-139.

29. Русов В. А., Богатырев Ю. Л. Организация расширенного мониторинга состояния высоковольтного оборудования. *Электропанорама*. 2010. №9. С. 50-52.
30. Русов В. А., Богатырев Ю. Л. Организация расширенного мониторинга состояния высоковольтного оборудования. *Электропанорама*. 2010. №12. С. 26-29.
31. Сопель М. Ф. Моніторинг в електроенергетиці: дис. ...доктора техн. наук: 05.14.02 / Нац. акад. наук України, Ін-т електродинаміки. Київ, 2015. 421 с.
32. Сопель М. Ф., Панов А. В., Паньків В. І. Танкевич Є. М. Нормативне забезпечення моніторингу високовольтних вимикачів електроенергетичних систем. *Праці ІЕД НАНУ*. 2018. Вип. 49. С. 17-27.
33. Сопель М. Ф., Тутик В. Л., Панов А. В., Пилипенко Ю. В. До визначення залишкового ресурсу елегазових високовольтних вимикачів 750 кВ. *Праці ІЕД НАНУ*. 2007. Вип. 16. С. 136-139.
34. Сопель М. Ф., Тутик В. Л., Панов А. В., Пилипенко Ю. В. Робочі алгоритми системи моніторингу режимів роботи електричних мереж та силових вимикачів *Праці ІЕД НАНУ*. 2006. Вип. 14. С. 22-25.
35. Сопель М. Ф., Тутик В. Л., Панов А. В., Ущатовський К. В. Аналіз типових схем з'єднань мікропроцесорних пристроїв в станційній мережі за стандартом ІЕС61850. *Технічна електродинаміка*. 2008. № 1. С. 42-46.
36. СОУ МЕВ ЕЕ 40.1-00100227-01:2016. Стандарт операційної безпеки функціонування Об'єднаної енергетичної системи України. Побудова та експлуатація електричних мереж. Технічна політика. Частина 1. Технічна політика у сфері побудови та експлуатації магістральних і міждержавних електромереж. СОУ. НТЦЕ ДП «НЕК»Укренерго». К., 2015. 111 с.
37. СОУ НЕК 20.261:2017. Технічна політика ДП НЕК «Укренерго» у сфері розвитку та експлуатації магістральних і міждержавних електричних мереж. ДП «НЕК»Укренерго». – К.: 2017. – 84 с. URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2016/12/Tehnichna-polityka-redaktsiya-2.pdf>.

38. Стогний Б. С., Рогоза В. В., Кириленко А. В., Сопель М. Ф., Холоденко Ю. Н. Микропроцессорные системы в электроэнергетике. Наук. думка. Київ, 1988. 232 с.

39. Стогний Б. С. Сопель М. Ф., Тутик В. Л., Панов А. В. Методика контролю параметрів газової суміші в елегазових вимикачах 750 кВ. Зб. наук. ст. за результатами, отриманими в 2004-2006 рр. Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин». К., 2006. С. 269-272.

40. Стогний Б. С., Сопель М. Ф., Паньків В. І., Танкевич Є. М. Математична модель трансформатора струму на основі теорії феромагнітного гістерезису Джайсла-Атертона. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 3. С. 1-8.

41. Стогний Б. С., Сопель М. Ф., Третьякова Л. Д., Танкевич Є.М., Панов А. В., Паньків В. І. Визначення комутаційного ресурсу високовольтних вимикачів. *Технічна електродинаміка*. 2017. №1. С. 71-80.

42. Таран В. П. Диагностирование электрооборудования. Техніка. Київ, 1983. 200 с.

43. Теория и конструкции выключателей. пер. с англ. / под ред. В. В. Афанасьева. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр.отд-ние, 1982. 486 с.

44. Тутик В. Л., Максимчук В. Л., Панов А. В., Камінський Р. Б., Тарасевич П. Й., Невечеря І. В. Засоби моніторингу на електроенергетичних об'єктах. *Праці ІЕД НАНУ. Спец випуск*. 2011. С. 157-162.

45. Чернышев Н. А., Ракевич А. Л. Аппаратура и метод раннего обнаружения дефектов в механизмах высоковольтных выключателей. *Электрические станции*. 2004. №11. С.61-65.

46. Ai-min L. Xin L., Xiang-dong L. Fault diagnosis method of high voltage circuit breaker based on RBF artificial neural network : 2005 IEEE/PES Transmission and distribution conference and exhibition Asia and Pacific (18 August 2015, Dalian, China). China, 2005. P. 1-6.

47. ANSI C37.06. High-voltage circuit breakers on a symmetrical currents basis preferred ratings and related required capabilities. 2006. 41 p.

48. Application on diagnostic techniques for high voltage circuit breakers, Session papers and proceedings. CIGRE, 1992. 9 p.

49. Bosma A., Thomas R. Condition monitoring and maintenance strategies for high-voltage circuit breakers : Proceedings of 6th international conference on advances in power system control, operation and management (11-14 November 2003, Hong Kong). Hong Kong, 2003. P. 191-196.

50. CAN/CSA-Q634-91. Risk analysis requirements and guidelines. CSA, Toronto. 1991. 59 p.

51. CBWatch-2. Modular monitoring system. User`s manual. 07-2001 D1087EN/04. 2001. 53 p.

52. Chao L., Xiaoguang H. A new method of fault diagnosis for high-voltage circuit breakers based on Hilber-Huang transform : 2nd IEEE Conference on industrial electronics and applications (23-25 May 2007, Harbin, China). Harbin, 2007. P. 2697-2701.

53. Fan Y., Chenxi Q., Xiaohui Z., Jun D., Xiaoguang H. Integrated state test system of high voltage circuit breakers based on embedded technology : 6th IEEE Conference on industrial electronics and applications (21-23 June 2011, Beijing, China) Beijing, China, 2011. P. 1605-1609.

54. Fan Y., Xiaoquang H. Research on the mechanical state parameter extraction method of high voltage circuit breakers : 10th IEEE International conference on industrial informatics (25-27 July 2012, Beijing, China). Beijing, China, 2012. P. 1062-1066.

55. Fazio G., Muzi F., Ricci S., Sacerdoti G. Circuit-breaker diagnostics based on continuous wavelet transform : IEEE Bologna powertech conference (23-26 June 2003, Bologna, Italy). Bologna, Italy, 2003. P. 85-89.

56. Fu C., Hao J. On-line monitoring system based on vibration signal of high voltage circuit breaker. *Journal of multimedia*. 2014. Vol. 9, № 4. P. 598-604.

57. Geng P., Song J., Xu C., Zhao Y. Fault pattern recognition method for the high voltage circuit breaker based on the incremental learning algorithms for SVM :

2016 International conference on condition monitoring and diagnosis (25-28 September 2016, Xi'an, China). Xi'an, China, 2016. P. 693-696.

58. Grijp M. H. B., Bedet J. S., Hopkins R. A., Greyling J. E. Condition monitoring of high voltage circuit breakers : 1996 IEEE AFRICON 4th AFRICON conference in Africa, (25-27 November 1996, South Africa). 1996. P. 880-885.

59. Guenzi G., Politano D. EHV substation reliability improvement by means of circuit breakers autodiagnostic : 2003 IEEE Bologna powertech conference proceedings (23-26 June 2003, Bologna, Italy). Bologna, Italy, 2003.

60. Hoidalen H. K., Runde M. Continuous monitoring of circuit breakers using vibration analysis. *IEEE Transaction on power delivery*. 2005. Vol. 20, № 4. P. 2458-2465.

61. Hongxia M., Honghua W. Research on fault diagnosis method of high-voltage circuit breaker based on fuzzy neural network data fusion : 2010 International conference on computer application and system modeling (22-24 October 2010, Taiyuan, China). Taiyuan, China, 2010. V11. P. 231-235.

62. Hou P., Bai S., Ge Y., Zhang Y., Zhang H. Research on expert diagnosis system for mechanical fault of high voltage circuit breaker based on fuzzy matrix and neural network technology : 2016 International conference on condition monitoring and diagnosis (25-28 September 2016, Xi'an, China). Xi'an, China, 2016. P. 139-143.

63. Hu C., Tao F., Yang J., Liang Y., Wang Y. An assessment method for electrical life of vacuum circuit breakers based on cloud model : 2014 International conference on high voltage engineering and application (8-11 September 2014, Paznan, Poland). Paznan, Poland, 2014. P-2-29.

64. Hu X., Wang J., Ji Y., Yu W. The application of the wavelet analysis of analytic signals in mechanical fault diagnosis of circuit breakers. *IEEE Transaction on power delivery*. 1996. Vol. 11, №2. P. 2235-2240.

65. IEC 60812:2006. Analysis techniques for system reliability. Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA). 2006. 93 p.

66. IEC 62271-1:2007. High-voltage switchgear and controlgear – Part 1: Common specification. 2007. 252 p.

67. IEC 62271-100:2008. High-voltage switchgear and controlgear – Part 100: Alternating-current circuit-breakers. 2008. 1516 p.
68. IEC TS 61634: 1995, IEC technical report: High-voltage switchgear and controlgear use and handling of Sulphur hexafluoride (SF₆) in high-voltage switchgear and controlgear. 1995. 161 p.
69. IEEE 100-2000. The authoritative dictionary of IEEE standards terms, seventh edition. 2000. 1352 p.
70. IEEE 493-2007. IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Gold Book). 2007. 426 p.
71. IEEE C37.04-1999/Cor 1-2009. IEEE Standard for rating structure for AC high-voltage circuit breakers (Corrigendum to IEEE C37.04-1999). New York, 2009. 36 p.
72. IEEE C37.09-1999. IEEE Standard test procedure for AC high-voltage circuit breaker rated on a symmetrical current basis. New York, 1999. 36 p.
73. IEEE C37.10.1-2000. IEEE Guide for the selection of monitoring for circuit breakers. New York, 2001. 55 p.
74. IEEE C37.10-1995. IEEE Guide for diagnostics and failure investigation of power circuit breakers. New York, 1995. 59 p.
75. IEEE C37.10-2011. IEEE Guide for investigation, analysis, and reporting of power circuit breaker failures. 2011. 59 p.
76. IEEE C37.111-1999. IEEE Standard common format for transient data exchange (COMTRADE) for power system. New York, 1999. 47 p.
77. IEEE C37.1-2007. IEEE Standard definition, specification and analysis of system used for supervisory control, data acquisition and automatic control. New York, 2008. 143 p.
78. IEEE C37.12-2008. IEEE Guide for specifications of high-voltage circuit breaker (over 1000 Volts). New York, 2008. 44 p.
79. International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM): ISO/IEC Guideline 99/2007 (E/R). Geneva, 2007. 92 p.

80. Jeyaraj S. G., Yehdego H. Effective and efficient circuit breaker analysis : IET Conference on reliability of transmission and distribution networks, (22-24 November 2011, London, United Kingdom). London, United Kingdom, 2011. P. 157-163.

81. Jianwei G., Ying W., Ping X. Fuzzy theory application in the evaluation of high-voltage circuit breaker state : 2013 5th International conference on computational and information sciences (21-23 June 2013, Shiyan, Hubey, China). 2013. P. 829-832.

82. Jin X., LiuJun Z., Xiaoquang H., Liang L., Lei Z. Development of on-line monitoring system for SF6 circuit breaker : 2011 6th IEEE Conference on industrial electronics and applications (21-23 June 2011, Beijing, China). Beijing, China, 2011. P. 537-541.

83. Johan H., Mousavi M. J. Coil current analysis method for predictive maintenance of circuit breakers : 2008 IEEE/PES Transmission and distribution conference and exposition (21-24 April 2008, Chicago, USA). Chicago, USA, 2008. P. 1-7.

84. Jones C. Cigre working group 13.09 – Monitoring and diagnostic techniques for switching equipment : 2001 IEEE/PES Transmission and distribution conference and exposition. Developing new perspectives (2 November 2001, Atlanta, USA), Atlanta, USA, 2001. P. 1083-1087.

85. Kezunovic M., Sevcik D. R. Automated circuit breaker monitoring and analysis : IEEE Power engineering society summer meeting (21-25 July 2002, Chicago, USA). Chicago, USA, 2002. P. 559-564.

86. Kim M.-H., Kim K.-H., Smajkic A., Kapetanovic M., Muratovic M. Influence of contact erosion on the state of SF6 gas in interrupted chambers of HV SF6 circuit breakers : 2014 IEEE International power modulator and high voltage conference (1-5 June 2014, Santa Fe, New Mexico). Santa Fe, New Mexico, 2014. P. 466-469.

87. Kokorin E. L., Khalyasmaa A. I. Electrical equipment condition based maintenance strategy : 2016 International conference and exposition on electrical and

power engineering (20-22 October 2016, Iasi, Romania). Iasi, Romania, 2016. P. 748-753.

88. Kopejtkova D. Malony T. Kobayashi S, Welch I. A twenty-five year review of experience with SF6 gas-insulated substations (GIS) : CIGRE General meeting, Paris. 1992. P. 23-101.

89. Lee D. S. S., Lithgow B. J., Morrison R. E. New fault diagnosis of circuit breakers. *IEEE Transaction on power delivery*. 2003. Vol. 18, № 2. P. 454-459.

90. Liu M., Sun L., Zhen J., Li J. Fault diagnosis of high voltage circuit breaker based on multiple entropy strips method : 2011 6th IEEE Conference on industrial electronics and applications (21-23 June 2011, Beijing, China). Beijing, China, 2011. P. 504-508.

91. Manea I., Chiciu C., Balasiu F., Tulici N. Complex method to diagnose the technical state of the medium and high voltage circuit breakers after short-circuit events : 16th International conference and exhibition on electricity distribution (18-21 June, 2001, Amsterdam, The Netherlands). Amsterdam, The Netherlands, 2001. P. 1-5.

92. Mei F., Zhu K., Zheng J., Zhu M. Design of high voltage vacuum circuit breaker's on-line monitoring and fault diagnosis system : 2016 IEEE Advanced information management, communicates, electronic and automation control conference (3-5 October 2016, Xi'an, China). 2016. P. 408-413.

93. Munteanu R. A., Balan H., Pop A. A., Buzdugan M. Wavelet analysis in monitoring and diagnosis of power circuit breakers : 2014 International conference on applied and theoretical electricity (23-25 October 2014, Craiova, Romania). Craiova, Romania, 2014. P.1-6.

94. Mui L., Jian H., Xiaoguang H. Insulative condition monitoring of high voltage circuit breaker : 2010 the 5th IEEE Conference on industrial electronics and applications (15-17 June 2010, Taichung, Taiwan). Taichung, Taiwan, 2010. P. 94-98.

95. Rao P., Huang J., Hu X., Xiao J. Testing of breakers using coil current characteristics analysis : 2009 IEEE International conference on control automation (9-11 December 2009, Christchurch, New Zealand). Christchurch, New Zealand, 2009. P.

96. Razi-Kazemi A. A. Applicability of auxiliary contacts in circuit breaker online condition assessment. *Electric power systems research*. 2015. Vol. 128. P. 53-59.
97. Razi-Kazemi A. A. Circuit breaker condition assessment through a fuzzy-probabilistic analysis of actuating coil's current. *IET Generation, transmission, distribution*. 2015. Vol. 10, № 1. P. 48-56.
98. Razi-Kazemi A. A., Vakilian M., Niayesh K., Lehtonen M. Data mining of online diagnosed waveforms for probabilistic condition assessment of SF6 circuit. *IEEE Transaction on power delivery*. 2015. Vol. 30, № 3. P. 1354-1362.
99. Razi-Kazemi A. A., Vakilian M., Niayesh K., Lehtonen M. Circuit breaker automated failure tracking based on coil current signature. *IEEE Transaction on power delivery*. 2014. Vol. 29, № 1. P. 283-290.
100. Ruben D. Garzon, High voltage circuit breakers: design and application. 2nd edition, revised and expanded. New York, Basel: Marcel Dekker, Inc., 2002. 456 p.
101. Rusek B., Balzer G., Holstein M., Claessens M.-S. Timings of high voltage circuit breaker. *Electric power systems research*. 2008. Vol. 78. P. 2011-2016.
102. Scott M. S., Stephen D. J. McArthur, Bruce S., James R. McDonald, Angus C. Providing decision support for the condition-based maintenance of circuit breakers through data mining of trip coil current signatures. *IEEE Transaction on power delivery*. 2007. Vol. 22, № 1. P. 178-186.
103. Silva M. S., Jardini J. A., Magrini L. C. On-line condition monitoring system for in-service circuit breaker : 18th International conference on electricity distribution (6-9 June 2005, Turin). Turin, 2005. P. 1-7.
104. Stognii B., Voitov D. Panov. A. Automated system for gathering data from IEDs - implementation specifics in Ukrainian power engineering : Cigre session, France 22-26 August 2016. B5-113.
105. Sun L., Liu M., Qian H., Qiao C. A new method to fault diagnosis for circuit breakers based on characteristic entropy of wavelet packet : 2011 2th International conference on digital manufacturing and automation (5-7 August 2011, Zhangjiajie, Hunan, China). Zhangjiajie, Hunan, China, 2011. P. 63-68.

106. Sun L., Yang P., Liu M., Wang K. A method of classified HV circuit breaker fault signal based on EEMD and BP neural network : 2016 IEEE International conference on electronic information and communication technology (20-22 August 2016, Harbin, China). Harbin, China, 2016. P. 244-248.
107. Suwanasri T., Wattanawongpitak S., Homkeanchan T., Suwanasri C. Failure statistics and inventory management for high voltage circuit breaker using statistical distribution techniques : 2012 IEEE International conference on condition monitoring and diagnosis (23-27 September 2012, Bali, Indonesia). Bali, Indonesia, 2012. P. 513-516.
108. Switch monitor OLM. User reference manual. ELCON REG NO R90895-02 1998. Edition 2.1, 2006. 39 p.
109. Watanabe T., Sugimoto T., Imagawa H. Chan K. K., Chew T. Y. Qin S. Z. Practical application of diagnostic method of circuit breaker by measuring three current waveforms : 2008 International conference on condition monitoring and diagnosis (21-24 April 2008, Chana, Beijing). Chana, Beijing, 2008. P. 398-401.
110. Wenhua L., Xiaoquang Y., Jun L., Man Y., Sheng Z. Study on the comprehensive test technology of circuit breaker mechanical life and its accessories based on virtual instrument : 26th International conference on electrical contacts (14-17 May 2012, Beijing, China). Beijing, China, 2012. P. 465-470.
111. Xue J., Sun L., Liu M., Qiao C., Qiao H. A new method of fault diagnosis for high voltage circuit breakers based on vibration signals : Proceedings of the 2009 International conference on mechatronics and automation (9-12 August 2009, Changchun, China). Changchun, China, 2009. P. 4817-4821.
112. Zhong C., Yang R.-G., Cui J. Mathematical morphology method for pre-processing of coil current waveforms of circuit breakers : 2010 Asia-Pacific power and energy engineering conference (28-31 March 2010, Chengdu, China). Chengdu, China, 2010. P. 1-4.

ДОДАТОК А

Список опублікованих праць за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Наукові праці в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Панов А. В., Паньків В. І., Сопель М. Ф., Стогній Б. С., Танкевич Є. М. Актуальні питання моніторингу і технічного обслуговування високовольтних вимикачів. *Технічна електродинаміка*. 2018. №2. С.75-85.
2. Сопель М. Ф., Панов А. В., Паньків В. І. Танкевич Є. М. Нормативне забезпечення моніторингу високовольтних вимикачів електроенергетичних систем. *Праці ІЕД НАНУ*. 2018. Вип. 49. С. 17-27.
3. Панов А.В., Паньків В.І., Сопель М.Ф., Танкевич Є.М. Вдосконалення моніторингу технічного стану механічних елементів високовольтних вимикачів. *Праці ІЕД НАНУ*. 2018. Вип. 51. С. 99-109.
4. Стогній Б. С., Сопель М. Ф., Третьякова Л. Д., Танкевич Є.М., Панов А. В., Паньків В. І. Визначення комутаційного ресурсу високовольтних вимикачів. *Технічна електродинаміка*. 2017. №1. С. 71-80.
5. Панов А. В., Войтов Д. В., Нестриженний М. О. Деякі практичні питання моніторингу електричних вимикачів. *Праці ІЕД НАНУ*. 2013. Вип. 36. С. 71-74.
6. Приступчук А., Мовчан С., Панов А. Автоматизированные системы управления MICROSCADA PRO с применением удаленных терминалов RTU как надежное решение для всех уровней автоматизации. *Электрические сети и системы*. 2012. №3. С. 95-105.
7. Тутик В. Л., Максимчук В. Л., Панов А. В., Камінський Р. Б., Тарасевич П. Й., Невечеря І. В. Засоби моніторингу на електроенергетичних об'єктах. *Праці ІЕД НАНУ*. Спец випуск. 2011. С. 157-162.
8. Сопель М. Ф., Тутик В. Л., Панов А. В., Ущаповський К. В. Аналіз типових схем з'єднань мікропроцесорних пристроїв в станційній мережі за стандартом ІЕС61850. *Технічна електродинаміка*. 2008. № 1. С. 42-46.

9. Сопель М. Ф., Тутик В. Л., Панов А. В., Пилипенко Ю. В. Робочі алгоритми системи моніторингу режимів роботи електричних мереж та силових вимикачів. *Праці ІЕД НАНУ*. 2006. Вип. 14. С. 22-25.

10. Стогній Б. С. Сопель М. Ф., Тутик В. Л., Панов А. В. Методика контролю параметрів газової суміші в елегазових вимикачах 750 кВ. Зб. наук. ст. за результатами, отриманими в 2004-2006 рр. Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин». К., 2006. С. 269-272.

11. Сопель М. Ф., Тутик В. Л., Панов А. В., Пилипенко Ю. В. До визначення залишкового ресурсу елегазових високовольтних вимикачів 750 кВ. *Праці ІЕД НАНУ*. 2007. Вип. 16. С. 136-139.

Наукові праці апробаційного характеру

12. Stognii B., Voitov D. Panov. A. Automated system for gathering data from IEDs - implementation specifics in Ukrainian power engineering : Cigre session, France 22-26 August 2016. B5-113.

Патенти України

13. Максимчук В. Ф., Стогній Б. С., Сопель М. Ф., Тутик В. Л., Михайлевський О. С., Панов А. В. Мікропроцесорна система моніторингу і прогнозу залишкового ресурсу елегазових високовольтних вимикачів: пат. 73398 України: МПК G 07 C 3/10. №и 2012 02069; заявл. 23.02.12; опубл. 25.09.2012, Бюл. №18.

ДОДАТОК Б

Документи, що засвідчують метрологічну атестацію, сертифікацію та високу якість розробленої системи моніторингу

- Б1. Свідоцтво про державну метрологічну атестацію
- Б2. Сертифікат відповідності
- Б3. Сертифікат експертизи типу
- Б4. Декларація про відповідність продукції вимогам технологічного регламенту з електромагнітної сумісності обладнання.
- Б5. Декларація про відповідність продукції вимогам технологічного регламенту низьковольтного обладнання



МІНЕКОНОМРОЗВИТКУ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО "ВСЕУКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ
ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦІЇ, МЕТРОЛОГІЇ, СЕРТИФІКАЦІЇ ТА ЗАХИСТУ ПРАВ СПОЖИВАЧІВ"

(ДП "Укрметртестстандарт")

НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ ІНСТИТУТ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ВИМІРЮВАНЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВЕЛИЧИН
(НВІ МЗ ВЕМВ)

СВІДОЦТВО
про державну метрологічну атестацію
№ 25-01/A-141 від " 05 " серпня 2014 р.

Пристрій моніторингу технологічних параметрів високовольтних елегазових вимикачів
RSM1 № 0304

назва, позначення, порядковий номер, дата виготовлення засобу вимірювальної техніки

Виробник **МПП "Анігер"**

назва підприємства

Належить **МПП "Анігер"**

назва підприємства або організації

Призначення (галузь застосування) ЗВТ: вимірювання сили постійного струму, тривалості імпульсів, густини і температури елегазу, кута зсуву двох прямокутних сигналів амплітудою 3 В

Умови проведення: температура 21,9 °С; атмосферний тиск 101 кПа; відн. вологість повітря 54 %

Результати метрологічної атестації

Назва метрологічної характеристики	Одержане значення метрологічної характеристики	Назва, тип робочих еталонів, застосованих під час атестації
Основна відносна похибка пристрою при вимірюванні сили постійного струму в режимі подання вхідної напруги постійного струму пропорційної струму соленоїда в діапазоні до 1 А	від мінус 0,98 % до 0,01 %	Багатофункціональний калібратор Fluke 9100; мультиметр цифровий прецизійний Fluke 8508A
Основна відносна похибка пристрою при вимірюванні сили постійного струму в режимі подання вхідної напруги змінного струму (частотою 50 Гц) пропорційної струму заводу пружини в діапазоні від 15 до 75 А	від мінус 0,31 % до 0,73 %	Багатофункціональний калібратор Fluke 9100; мультиметр цифровий прецизійний Fluke 8508A
Основна відносна похибка пристрою при вимірюванні тривалості імпульсів амплітудою 24 В в діапазоні від 10 до 99 мс	0%	Генератор Siglent SPG 5082
Основна відносна похибка пристрою при вимірюванні густини елегазу в діапазоні до 50 кг/м ³	від 0,1 % до 0,2 %	Багатофункціональний калібратор Fluke 9100
Основна абсолютна похибка при вимірюванні температури елегазу в діапазоні до 85 °С	від 0,755 °С до 0,971 °С	Багатофункціональний калібратор Fluke 9100
Основна відносна похибка пристрою при вимірюванні кута зсуву двох окремих прямокутних сигналів амплітудою 3 В на 90°	0%	Генератор Siglent SPG 5082

За результатами державної метрологічної атестації (протокол № А-141 від "05" серпня 2014 р.)
Пристрій моніторингу технологічних параметрів високовольтних елегазових вимикачів

RSM1 № 0304

назва, позначення, порядковий номер, дата виготовлення засобу вимірювальної техніки

визнано таким, що відповідає

технічному опису виробника

назва технічної документації, яка містить вимоги до метрологічних характеристик

та придатний до застосування.

Повірку проводити відповідно до ПМА 081/25.616-14 п.п. 8.1-8.5 та технічного опису "RSM1"

Міжповірочний інтервал

1 рік

Директор НВІ МЗ ВЕМВ




підпис

А П
Т
1 5 2 9 9 1

О. М. Величко
прізвище, ініціали



МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА СИСТЕМА СЕРТИФІКАЦІЇ УкрСЕПРО

Серія ВГ

СЕРТИФІКАТ ВІДПОВІДНОСТІ

Зареєстровано в Реєстрі за № **UA1.190.0032114-16**
Зареєстрован в Реєстрі

Термін дії з **27 липня 2016** до **26 липня 2017**
Срок действия с

Продукція **Система моніторингу параметрів електричних вимикачів 'Регіна-Е'**
Продукция

код УКТ ЗЕД, ТН ЗЕД

26.51.6

код ДКПП, ОКП

Відповідає вимогам **ДСТУ EN 55022:2014 п.п. 5.1; 5.2;**
Соответствует требованиям **ДСТУ EN 55024:2014 п.п. 4.2.1; 4.2.2; 4.2.5; 4.2.6;**
ДСТУ EN 60950-1:2014 п.п. 2.1; 2.9; 3.3; 6.1

Виробник продукції **МПП 'АНІГЕР', Україна, 03680, м. Київ, вул. Гарматна, 2, код ЄДРПОУ: 30309961**
Изготовитель продукции

Сертифікат видано **МПП 'АНІГЕР', Україна, 03680, м. Київ, вул. Гарматна, 2, код ЄДРПОУ: 30309961**
Сертификат выдан

Додаткова інформація **Продукція, що виготовляється серійно в період з 27.07.2016 р. до 26.07.2017 р. з урахуванням гарантійного терміну. Технічний нагляд один раз на рік. Добровільна сертифікація**
Дополнительная информация

Сертифікат видано органом з сертифікації
Сертификат выдан органом по сертификации

ОС ТОВ 'ВИПРОБУВАЛЬНО-СЕРТИФІКАЦІЙНИЙ ЦЕНТР 'ПІВДЕНТЕСТ' - адреса: Україна, м. Дніпропетровськ, вул. Миронова 7а, оф. 14 свідоцтво про призначення № UA.P.190 від 11.03.2013 р., свідоцтво про уповноваження № UA.PN.190 від 11.03.2013 р.

На підставі
На основании

Протоколу сертифікаційних випробувань № T155/07-16 від 22.07.2016 р., виданих ВЛ 'ВСЦ 'Південтест', 49054, м. Дніпропетровськ, пр-т Калініна, 50, атестат акредитації № 2Н485 від 25.10.2013 р. до 24.10.2018 р.

Керівник органу з сертифікації
Руководитель органа по сертификации



підпис

О.Г. Торба
ініціали, прізвище

Чинність сертифіката відповідності можна перевірити в Реєстрі системи УкрСЕПРО за тел. (044) 528-54-35



ОРГАН З ОЦІНКИ ВІДПОВІДНОСТІ ТОВ «ВСЦ «ПІВДЕНТЕСТ»

СЕРТИФІКАТ ЕКСПЕРТИЗИ ТИПУ

СЕРТИФИКАТ ЭКСПЕРТИЗЫ ТИПА/CERTIFICATE OF TYPE EXPERTISE

СИСТЕМА СЕРТИФИКАЦІЇ ПРОДУКЦІЇ ТОВ «ВСЦ «ПІВДЕНТЕСТ»

Зареєстровано в Реєстрі органу з оцінки відповідності за № **UA-YT.d.076.0109-16**

Зарегистрирован в Реестре органа по оценке соответствия

Registered at the Record of conformity assessment body under

Термін дії з **22 липня 2016 р. до 21 липня 2019 р.**

Срок действия с

Term of validity is from

Продукція (тип)

Продукция (тип)

Production (type)

Система моніторингу параметрів електричних вимикачів

«Регіна-Е» (зображення наведені в додатку)

код УКТ ЗЕД, ТН ЗЕД

26.51.6

код ДКПД, ОКП

Відповідає вимогам

Соответствует требованиям

Comply with the requirements

ДСТУ EN 55022:2014; ДСТУ EN 55024:2014; ДСТУ EN 60950-1:2014

Виробник (и) продукції

Изготовитель (и) продукции

Producer (s)

МПП «АНІГЕР», Україна, 03680, м. Київ, вул. Гарматна, 2, код ЄДРПОУ: 30309961

Сертифікат видано

Сертификат выдан

Certificate is issued on

МПП «АНІГЕР», Україна, 03680, м. Київ, вул. Гарматна, 2, код ЄДРПОУ: 30309961

Додаткова інформація

Дополнительная информация

Additional information

Продукція, що виготовляється серійно в період з 22.07.2016 р. по 21.07.2019 року, з урахуванням гарантійного терміну.

Сертифікат видано органом з оцінки відповідності

Сертификат выдан органом по оценке соответствия

Certificate is issued by the conformity assessment body

Орган з оцінки відповідності ТОВ «Випробувально-сертифікаційний центр «Південтест», атестат акредитації № 10194

49000, м. Дніпропетровськ, вул. Митрофанова, 7а, оф. 14, т. (056) 370-12-27

На підставі

На основании

On the grounds of

протоколу випробувань продукції № Т155/07-16 від 22.07.2016 р., ВЛ ТОВ ВСЦ «Південтест», атестат акредитації № 2Н485 від 25.10.2013 до 24.10.2018р. (Дніпропетровськ, 49064, пр-т. Калініна, 50); сертифікату відповідності системи управління якості вимогам стандарту ISO 9001:2008 № 450817QM08 від 07.04.2014 р., виданий «DQS GmbH», August-Schanz-Str. 21, 60433 Frankfurt am Main, Germany, Німеччина; звіту про перевірку та оцінку СУЯ

Керівник органу з оцінки відповідності

Руководитель органа по оценке соответствия

Director of the conformity assessment body

М.П.

О.Г. Торба

підпис

ініціали, прізвище

Чинність сертифікату можна перевірити в Реєстрі Системи органу на сайті www.yugtest.com та за тел. (056) 370-12-27

ДЕКЛАРАЦІЯ про відповідність

ПРОДУКЦІЇ ВИМОГАМ ТЕХНІЧНОГО РЕГЛАМЕНТУ З ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ОБЛАДНАННЯ

1. Модель апаратури/виріб: Система моніторингу параметрів електричних вимикачів «Регіна-Е», код ДКПП 26.51.6

(номер виробу, тип, номер партії чи серійний номер)

2. Найменування та адреса виробника або його уповноваженого представника:

МПП «АНІГЕР», Україна, 03680, м. Київ, вул. Гарматна, 2, код ЄДРПОУ: 30309961

3. Ця декларація видана під відповідальність виробника.

4. Об'єкт декларації (ідентифікація апаратури, яка дає змогу забезпечити її простежуваність; може включати кольорове чітке зображення у разі потреби для ідентифікації зазначеної апаратури): див. Додаток до декларації.

5. Об'єкт декларації відповідає вимогам відповідних технічних регламентів: Технічний регламент з електромагнітної сумісності обладнання (ПКМУ № 1077 від 16.12.2015 р.).

6. Посилання на відповідні стандарти, включені до переліку національних стандартів, що були застосовані (із зазначенням дат видання стандартів), або посилання на інші технічні специфікації (із зазначенням дат видання специфікації), стосовно яких декларується відповідність: ДСТУ EN 55022:2014 Обладнання інформаційних технологій. Характеристики радіозавад. Норми та методи вимірювання (EN 55022:2010, IDT); ДСТУ EN 55024:2014 Обладнання інформаційних технологій. Характеристики несприйнятливості до завад. Норми та методи вимірювання (EN 55024:2010, IDT);

Декларація складена на підставі:

- сертифікату експертизи типу UA-YT.d.076.0109-16 від 22.07.2016 р. до 21.07.2019 р. зареєстрованого ООВ «Південтест», атестат акредитації № 10194
- сертифікату відповідності системи управління якості вимогам стандарту ISO 9001:2008 № 450817QM08 від 07.04.2014 р., виданий «DQS GmbH», August-Schanz-Str. 21, 60433 Frankfurt am Main, Germany, Німеччина
- звіту про перевірку та оцінку СУЯ
- протоколу випробувань: № T155/07-16 від 22.07.2016 р. виданого ВЛ ТОВ ВСЦ «Південтест», атестат акредитації № 2H485 від 25.10.2013 до 24.10.2018р. (Дніпропетровськ, 49064, пр-т. Калініна, 50)
- технічного опису продукції.

7. Призначений орган з оцінки відповідності: ТОВ "Випробувально-сертифікаційний центр "Південтест", атестат акредитації № 10194, 49000, м. Дніпропетровськ, вул. Митрофанова, 7а, оф. 14
(найменування, ідентифікаційний номер згідно з реєстром призначених органів)

виконав процедуру оцінки відповідності за модулями В + С

(опис виконаних робіт)

8. Додаткова інформація: декларація про відповідність взята на облік у добровільному порядку та складена з урахуванням вимог ДСТУ ISO/IEC 17050-1:2006.

Підписано від імені та за дорученням МПП «АНІГЕР», Україна, 03680, м. Київ, вул. Гарматна, 2, код ЄДРПОУ: 30309961

(найменування виробника або його уповноваженого представника)

Директор
(посада особи, що безпосередньо виконала)

(підпис)

22.07.2016 р.
(дата)

Дашенко Д.В.
(ініціали та прізвище)

UA-TR.076.D.0769-16
Обліковий №
Керівник
Органу з оцінки відповідності
МПП

22 липня 2016 р.
дата реєстрації
(підпис)

21 липня 2019 р.
термін дії декларації до
О.Г. Торба

Чинність декларації можна перевірити за тел.(056) 370-12-27

ДЕКЛАРАЦІЯ про відповідність

ПРОДУКЦІЇ ВИМОГАМ ТЕХНІЧНОГО РЕГЛАМЕНТУ НИЗЬКОВОЛЬТНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

1. Модель виробу/виріб: Система моніторингу параметрів елегазових вимикачів «Регіна-Е», код ДКПП 26.51.6

(номер виробу, тип, номер партії чи серійний номер)

2. Найменування та місцезнаходження виробника або його уповноваженого представника:
МПП «АНІГЕР», Україна, 03680, м. Київ, вул. Гарматна, 2, код ЄДРПОУ: 30309961

3. Ця декларація про відповідність видана під виключну відповідальність виробника.

4. Об'єкт декларації (ідентифікація низьковольтного електричного обладнання, яка дає змогу забезпечити його простежуваність; може включати кольорове зображення достатньої чіткості, якщо це необхідно для ідентифікації зазначеного електрообладнання): див. Додаток до декларації.

5. Об'єкт декларації, описаний вище, відповідає вимогам відповідних технічних регламентів: Технічний регламент низьковольтного електричного обладнання (ПКМУ № 1067 від 16.12.2015 р.)

6. Посилання на відповідні стандарти з переліку національних стандартів, що були застосовані, або посилання на інші технічні специфікації, стосовно яких декларується відповідність: ДСТУ EN 60950-1:2014 Апаратура оброблення інформації. Безпека. Частина 1. Загальні технічні вимоги (EN 60950-1:2006, IDT).

Декларація складена на підставі:

- сертифікату експертизи типу UA-UT.d.076.0109-16 від 22.07.2016 р. до 21.07.2019 р. зареєстрованого ООВ «Південтест», атестат акредитації № 10194
- сертифікату відповідності системи управління якістю вимогам стандарту ISO 9001:2008 № 450817QM08 від 07.04.2014 р., виданий «DQS GmbH», August-Schanz-Str. 21, 60433 Frankfurt am Main, Germany, Німеччина
- звіту про перевірку та оцінку СУЯ
- протоколу випробувань: № T155/07-16 від 22.07.2016 р. виданого ВЛ ТОВ ВСЦ «Південтест», атестат акредитації № 2H485 від 25.10.2013 до 24.10.2018р. (Дніпропетровськ, 49064, пр-т. Калініна, 50)
- технічного опису продукції.

7. Додаткова інформація: декларація про відповідність взята на облік у добровільному порядку та складена з урахуванням вимог ДСТУ ISO/IEC 17050-1:2006.

Підписано від імені та за дорученням МПП «АНІГЕР», Україна, 03680, м. Київ, вул. Гарматна, 2, код ЄДРПОУ: 30309961

Директор
(посада особи, що склала декларацію)



22.07.2016 р.
(дата)

Дашенко Д.В.
(ініціали та прізвище)

UA.TR.076.D.0770-16
Обліковий №

22 липня 2016 р.
дата реєстрації

21 липня 2019 р.
термін дії декларації до

Керівник
Органу з оцінки відповідності
МН



(підпис)

О.Г. Торба

Чинність декларації можна перевірити за тел.(056) 370-12-27

ДОДАТОК В**Довідка про впровадження**

Довідка
про впровадження систем моніторингу високовольних елегазових
вимикачів на підстанціях ДП «НЕК «Укренерго»

Мікропроцесорна система on-line моніторингу високовольних елегазових вимикачів, розроблена в Інституті електродинаміки НАН України спільно з МПП «АНПЕР», впроваджена на всіх 9-ти підстанціях напругою 750 кВ ДП НЕК «Укренерго». Системою охоплено більш як 160 вимикачів.

Система характеризується широкими функціональними можливостями і забезпечує комплексний моніторинг технічного стану механічних елементів, параметрів елегазу та залишкового комутаційного ресурсу вимикачів.

Широке впровадження системи забезпечило підвищення рівня інформатизації підстанцій і технічної досконалості систем їх автоматизації. Завдяки впровадженню цих систем вдосконалена стратегія технічного обслуговування вимикачів, підвищена надійність та ефективність функціонування як вимикачів, так і усього електротехнічного обладнання підстанцій і електроенергетичних систем в цілому.

Головний інженер

ДП «НЕК «Укренерго»



Белкін М.М.