

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки і електроенергетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

Оцінка перспективи застосування вакуумних та елегазових вимикачів в енергетичній системі з дослідженням перенапруги при їх комутації
(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2м курсу, групи ДЕБ-24 мг
спеціальності: 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____/ Вадим ФЕСЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____/ Ірина ПАНТЄЛЄЄВА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____/ Олег КОНДРАТЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____/ Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____/ Ігор КИРИСОВ ____
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2025 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

Навчально – науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Електричні станції, мережі та системи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

(підпис)

к.т.н., доцент Артем ЧЕРНЮК

(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

**на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти**

здобувачу вищої освіти Вадиму ФЕСЕНКУ

1. Тема «Оцінка перспективи застосування вакуумних та елегазових вимикачів в енергетичній системі з дослідженням перенапруги при їх комутації»

затверджена наказом по університету № 4801-5/3664 від « 06 » 10 2025 р.

2. Термін здачі закінченої роботи « 10 » 12 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: рівні напруги мережі, де застосовуються ці види вимикачів; статистичні дані інтенсивності відмов вимикачів; параметри струмів в дугогасних камерах вимикачів

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):

ВСТУП; РОЗДІЛ 1. ВАКУУМНІ ТА ЕЛЕГАЗОВІ ВИМИКАЧІ У СУЧАСНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ. РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВАКУУМНИХ ТА ЕЛЕГАЗОВИХ ВИМИКАЧІВ. РОЗДІЛ 3. ЗАСТОСУВАННЯ ВАКУУМНИХ ТА ЕЛЕГАЗОВИХ ВИМИКАЧІВ У МАЙБУТНЬОМУ. ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ. СПИСОК ПОСИЛАНЬ

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання « 07 » 10 2025 р.

Керівник

(підпис)

Ірина ПАНТЕЛЄЄВА

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Вадим ФЕСЕНКО

(ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної дипломної роботи

№ з/ п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження	07.10.25 – 10.10.25	
2	Проведення аналізу наукової літератури	11.10.25 – 18.10.25	
3	Виконання першого розділу дипломної роботи	19.10.25 – 29.10.25	
4	Виконання другого та третього розділу дипломної роботи	30.10.25 – 26.11.25	
5	Оформлення пояснювальної записки та підготовка презентації доповіді	27.11.25 – 10.12.25	

Студент (ка)

(підпис)

Вадим ФЕСЕНКО

(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

до магістерської роботи з теми «Оцінка перспективи застосування вакуумних та елегазових вимикачів в енергетичній системі з дослідженням перенапруги при їх комутації», виконаної магістрантом Вадимом ФЕСЕНКОМ

Магістерська робота виконана на 69 сторінок, містить 2 таблиць, 22 рисунків, що характеризують результати дослідження, використано літературних джерел 16.

Традиційні масляні вимикачі, що тривалий час використовувалися в електроустановках, мають низку суттєвих недоліків — високу пожежонебезпечність, значні витрати на технічне обслуговування, обмежений ресурс контактної системи та екологічні ризики.

Це обумовлює перехід на сучасні типи комутаційних апаратів, серед яких найпоширенішими є вакуумні та елегазові вимикачі. Вакуумні вимикачі відзначаються високою надійністю, компактністю та тривалим терміном служби, тоді як елегазові забезпечують ефективне гасіння дуги при високих напругах та стабільні параметри ізоляції навіть у складних експлуатаційних умовах.

Актуальність даного дослідження також зумовлена тенденцією переходу до «розумних» електричних мереж (Smart Grid), інтеграцією відновлюваних джерел енергії та підвищенням вимог до енергоефективності й автоматизації процесів керування. У цих умовах вибір оптимального типу комутаційного апарата, здатного забезпечити стабільну роботу системи з мінімальними втратами та перенапругою, є одним із ключових завдань сучасної електроенергетики.

Мета магістерської кваліфікаційної роботи — комплексна оцінка ефективності застосування вакуумних та елегазових вимикачів у системах електропостачання з урахуванням процесу виникнення перенапруги при їх комутації та визначення оптимальних умов їх використання для підвищення надійності, енергоефективності й безпеки електричних мереж.

Ключові слова: вакуумні вимикачі, елегазові вимикачі, втрати електроенергії, перенапруга, електрична мережа.

ABSTRACT

to the master's thesis on the topic "Assessment of the prospects for the use of vacuum and SF6 circuit breakers in the power system with the study of overvoltage during their switching", completed by master's student Vadim FESENKO

The master's work is executed on 69 pages, contains 2 tables, 22 drawings, which characterize the results of research, used literary sources 16.

Traditional oil circuit breakers, which have been used in electrical installations for a long time, have a number of significant disadvantages - high fire hazard, significant maintenance costs, limited contact system life, and environmental risks.

This necessitates the transition to modern types of switchgear, among which the most common are vacuum and SF6 circuit breakers. Vacuum circuit breakers are characterized by high reliability, compactness and long service life, while SF6 circuit breakers provide effective arc extinguishing at high voltages and stable insulation parameters even in difficult operating conditions.

The relevance of this study is also due to the trend of transition to "smart" electrical networks (Smart Grid), integration of renewable energy sources and increasing requirements for energy efficiency and automation of control processes. In these conditions, the selection of the optimal type of switching device capable of ensuring stable operation of the system with minimal losses and overvoltage is one of the key tasks of modern electric power engineering.

The purpose of the master's qualification work is a comprehensive assessment of the effectiveness of the use of vacuum and SF6 circuit breakers in power supply systems, taking into account the process of overvoltage occurrence during their switching and determining the optimal conditions for their use to increase the reliability, energy efficiency and safety of electrical networks.

Keywords: vacuum circuit breakers, SF6 circuit breakers, power losses, overvoltage, electrical network.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. ВАКУУМНІ ТА ЕЛЕГАЗОВІ ВИМИКАЧІ У СУЧАСНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ

- 1.1. Особливості роботи та експлуатації високовольтних вакуумних вимикачів
- 1.2. Сучасне елегазове електрообладнання енергосистем та особливості його експлуатації
- 1.3. Особливості діагностування високовольтного обладнання з елегазовою ізоляцією

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВАКУУМНИХ ТА ЕЛЕГАЗОВИХ ВИМИКАЧІВ

- 2.1. Комутаційні випробування вакуумного вимикача
 - 2.1.1. Ресурсні випробування вакуумних дугогасних камер полюса вимикача
 - 2.1.2. Оцінка величини струму у вакуумних дугогасильних камерах
- 2.2. Дослідження часу експлуатації елегазового обладнання на стан ізоляції

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

РОЗДІЛ 3. ЗАСТОСУВАННЯ ВАКУУМНИХ ТА ЕЛЕГАЗОВИХ ВИМИКАЧІВ У МАЙБУТНЬОМУ

- 3.1. Перспективи використання вакуумних та елегазових вимикачів для напруги 110-220 кВ
- 3.2. Дослідження перенапруги при комутації вакуумних вимикачів

3.3. Дослідження впливу параметрів елегазових вимикачів на величину комутаційної перенапруги

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- КЗ - коротке замикання
- КРПЕ - комплектний розподільний пристрій з елегазовою ізоляцією
- ЧР - частковий розряд
- ВДК - вакуумна дугогасна камера
- ГІН - генератор імпульсної напруги
- ГІС - генератор імпульсного струму
- ЛЕП - лінія електропередачі
- ДП - дугогасні пристрої
- ОЗЗ - однофазне замикання на землю
- КЛ - кабельна лінія
- ОПН - обмежувач перенапруги

ВСТУП

Актуальність теми дослідження.

Сучасна енергетична система України перебуває на етапі активної модернізації, що передбачає поступову заміну застарілого електротехнічного обладнання на сучасні, більш надійні та екологічно безпечні аналоги. Одним із ключових напрямів цього процесу є вдосконалення комутаційних апаратів, від надійності та технічних характеристик яких залежить безперервність електропостачання, рівень електробезпеки та стабільність роботи енергомережі.

Традиційні масляні вимикачі, що тривалий час використовувалися в електроустановках, мають низку суттєвих недоліків — високу пожежонебезпечність, значні витрати на технічне обслуговування, обмежений ресурс контактної системи та екологічні ризики. Це обумовлює перехід на сучасні типи комутаційних апаратів, серед яких найпоширенішими є вакуумні та елегазові вимикачі. Вакуумні вимикачі відзначаються високою надійністю, компактністю та тривалим терміном служби, тоді як елегазові забезпечують ефективне гасіння дуги при високих напругах та стабільні параметри ізоляції навіть у складних експлуатаційних умовах.

Разом із тим, робота таких вимикачів супроводжується виникненням комутаційної перенапруги, яка може суттєво впливати на ізоляцію електрообладнання, спричиняти пробой та прискорене старіння елементів системи. Особливої уваги потребує дослідження цих процесів при комутації ємнісних або індуктивних навантажень, коли амплітуда перенапруги може перевищувати допустимі межі. Тому порівняльна оцінка рівнів і характеру перенапруги, що виникає при роботі вакуумних та елегазових вимикачів, має важливе практичне значення для підвищення надійності й довговічності енергетичного обладнання.

Актуальність даного дослідження також зумовлена тенденцією переходу до «розумних» електричних мереж (Smart Grid), інтеграцією відновлюваних джерел енергії та підвищенням вимог до енергоефективності й

автоматизації процесів керування. У цих умовах вибір оптимального типу комутаційного апарата, здатного забезпечити стабільну роботу системи з мінімальними втратами та перенапругами, є одним із ключових завдань сучасної електроенергетики.

Мета дослідження: комплексна оцінка ефективності застосування вакуумних та елегазових вимикачів у системах електропостачання з урахуванням процесу виникнення перенапруги при їх комутації та визначення оптимальних умов їх використання для підвищення надійності, енергоефективності й безпеки електричних мереж.

Об'єкт дослідження: процеси комутації в енергетичних системах за участю вакуумних та елегазових вимикачів.

Предмет дослідження: вплив типу комутаційного апарата на виникнення, амплітуду та характер комутаційних перенапруг в електричних мережах.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- ✓ Проаналізувати сучасний стан розвитку комутаційної техніки, зокрема конструкцію, принцип дії та технічні характеристики вакуумних і елегазових вимикачів.

- ✓ Визначити основні причини виникнення комутаційної перенапруги і проаналізувати її вплив на елементи енергетичної системи.

- ✓ Дослідити шляхи зниження комутаційних перенапруг, зокрема за допомогою схемних та конструктивних рішень вимикачів і додаткових демпфуючих пристроїв.

- ✓ Розробити практичні рекомендації щодо вибору оптимального типу вимикача залежно від умов експлуатації та вимог до надійності електромережі.

Теоретичні результати дослідження: у ході дослідження вдосконалено теоретичні уявлення про процеси комутації в енергетичних системах при використанні вакуумних та елегазових вимикачів. Визначено закономірності формування комутаційної перенапруги залежно від типу середовища гасіння

дуги, швидкості відновлення діелектричної міцності та характеристик навантаження. Проведено порівняльний аналіз фізичних процесів гасіння дуги у вакуумі та в елегазовому середовищі, що дозволило з'ясувати їх вплив на енергію дуги та динаміку відновлення напруги після комутації. Сформульовано критерії вибору оптимального типу вимикача залежно від умов експлуатації, рівня напруги та характеру навантаження.

Практичні результати дослідження: полягають у проведенні порівняльної оцінки ефективності вакуумних та елегазових вимикачів і визначенні умов, за яких рівень комутаційних перенапруг є мінімальним. Розроблено рекомендації щодо вибору вимикачів для різних режимів роботи енергосистеми та запропоновано технічні заходи зі зниження перенапруги. Отримані результати можуть бути застосовані при проєктуванні, модернізації та експлуатації електричних підстанцій, що сприятиме підвищенню надійності, енергоефективності й довговічності енергетичного обладнання.

Методи дослідження: ґрунтуються на використанні аналітичних, порівняльних та розрахунково-моделювальних підходів. У роботі застосовано теоретичний аналіз процесів комутації в електричних мережах, математичне моделювання перенапруги при роботі вакуумних та елегазових вимикачів, а також порівняння отриманих результатів із відомими експериментальними даними. Для оцінки ефективності застосування вимикачів використано елементи електромагнітного моделювання, аналіз перехідних процесів та узагальнення практичного досвіду експлуатації енергетичного обладнання.

РОЗДІЛ 1. ВАКУУМНІ ТА ЕЛЕГАЗОВІ ВИМИКАЧІ У СУЧАСНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ

Вакуум володіє низкою унікальних фізичних характеристик, що роблять його ефективним середовищем для комутації високовольтних електричних кіл. Ще у 1920-х роках дослідники Каліфорнійського технологічного інституту дійшли висновку про перспективність його використання в електротехніці.

Основні властивості вакууму полягають у високій діелектричній міцності (приблизно 40 кВ/мм або 125 кВ на 1/8 дюйма) та здатності гасити струми короткого замикання. Природна спроможність відключення у вакууму становить близько 4 кА, а при застосуванні спеціальних конструктивних рішень може перевищувати 100 кА. Контактна система у вакуумі зберігає працездатність навіть після понад 50 000 циклів комутації при номінальних струмах. Крім того, у вакуумі можливе вимикання кола за струму менше ніж 0,4 А при мінімальних енерговитратах, необхідних для здійснення комутації. Важливою перевагою є також екологічна безпечність вакууму, що робить його придатним для застосування у сучасних енергетичних системах [1].

На фото представлено один із перших високовольтних вимикачів, застосованих у магістральних електричних мережах. Це вакуумний вимикач типу AEI на напругу 132 кВ, який з 1967 року функціонував у районі Вест-Гем (Лондон). Подібні апарати відзначалися високою надійністю та тривалим терміном служби, тому залишалися в експлуатації аж до 1990-х років.

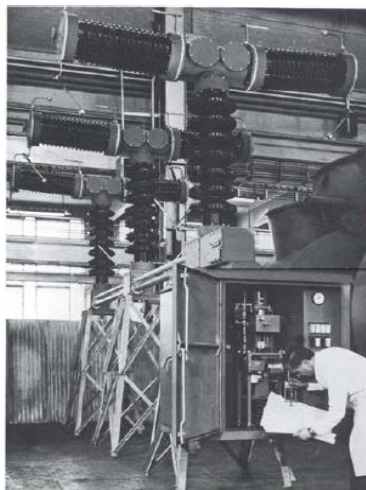


Рисунок 1.1 – Вакуумний вимикач VGL8 на 132кВ

Паралельно з розробленням високовольтних вакуумних вимикачів виробники електротехнічного обладнання поступово переходили від масляних і повітряних конструкцій до елегазових. Така тенденція була зумовлена простішою будовою та нижчими експлуатаційними витратами елегазових апаратів.

У вакуумних вимикачах високої напруги застосовувалося до восьми комутаційних камер на одну фазу, що потребувало складного механізму синхронного керування двадцятьма чотирма контактами в одному комплекті. Через це конструкція ставала технічно складною та дорогою. Крім того, подальше використання застарілих масляних вимикачів виявилось економічно недоцільним, що й сприяло широкому впровадженню елегазових пристроїв у практику енергетичних систем.

1.1. Особливості роботи та експлуатації високовольтних вакуумних вимикачів

На сьогодні вакуумні вимикачі належать до найперспективніших напрямів розвитку комутаційної техніки. Особливо інтенсивно зростає їх застосування у мережах середньої напруги, де вони поступово витісняють інші типи вимикачів. Така тенденція зумовлена поєднанням високих технічних характеристик і надійності конструкції, що забезпечують кращі експлуатаційні показники порівняно з масляними аналогами.

Серед головних переваг вакуумних вимикачів слід відзначити тривалий термін служби, високий комутаційний ресурс і мінімальні вимоги до технічного обслуговування. Їхня контактна система характеризується підвищеною зносостійкістю під час комутації як номінальних струмів, так і струмів відключення. У середньому вакуумні вимикачі здатні виконувати від 10 до 20 тисяч операцій вимкнення при номінальному навантаженні, що значно перевищує можливості більшості традиційних комутаційних апаратів.

Механічний ресурс вакуумного вимикача визначається довговічністю його сильфона, при цьому експлуатаційний ресурс вакуумної камери значно

перевищує ресурс механічних компонентів апарата. Конструктивні елементи вимикача не містять шкідливих речовин і можуть бути утилізовані без шкоди для навколишнього середовища, що підвищує екологічну безпеку його експлуатації. Контактна система вакуумного вимикача характеризується відсутністю потреби в технічному обслуговуванні протягом усього терміну служби, що сприяє зниженню експлуатаційних витрат і підвищенню надійності апарата. Для забезпечення його роботи застосовується механізм з відносно низьким енергоспоживанням, а сама конструкція вимикача дозволяє ефективно функціонувати у будь-якому просторовому положенні, що забезпечує гнучкість його застосування в різних схемах електричних мереж.

Вакуумний вимикач здатний ефективно працювати в умовах підвищеної експлуатаційної складності і практично не залежить від таких факторів, як температура, запиленість, вологість повітря або висота над рівнем моря. Його конструкція може передбачати застосування корозійностійких матеріалів, що підвищує довговічність і надійність апарата.

При розмиканні струму електрична дуга повністю локалізується у вакуумному середовищі, що виключає ризик вибуху навіть у потенційно вибухонебезпечному середовищі. Це дозволяє використовувати вакуумні вимикачі в електроустановках на об'єктах нафтогазовидобувної, вугільної та інших видобувних підприємств, де підвищені вимоги до безпеки і надійності комутаційних апаратів[2].

До основних обмежень вакуумних вимикачів відноситься їхня схильність до виникнення підвищених комутаційних перенапруг у електричних ланцюгах із великою швидкістю наростання струму. У вакуумі електрична дуга підтримується до того моменту, поки на контактах виділяється достатня енергія для утворення та підтримки концентрації металевих парів у міжконтактному проміжку, необхідної для існування дугового розряду.

У момент переходу струму через нуль енергія, що виділяється на електродах, різко знижується, і дуга гасне ще до досягнення нульового

значення струму. Внаслідок цього виникає зріз струму, який призводить до появи перенапруги у комутованому електричному ланцюзі.

Довжина дуги у вакуумних вимикачах значно менша порівняно з масляними та повітряними апаратами, тому її характеристики в значній мірі визначаються процесами, що відбуваються на електродах, особливо на катоді. При струмах відключення до 10 кА дуга у вакуумі набуває дифузної форми, а руйнування контактів здійснюється переважно за рахунок випаровування металу. Падіння напруги на такій дифузній дузі залежить від величини струму і зазвичай становить кілька десятків вольт, наприклад, близько 20 В для мідних електродів. При струмах, що перевищують 10 кА, дуга переходить у стислу форму, для якої характерне зростання падіння напруги зі збільшенням струму. Ці особливості визначають динаміку процесів комутації та впливають на рівень перенапруги у комутованих ланцюгах.

У цьому випадку збільшуються щільність струму та енергія, що виділяється на електродах, що призводить до суттєвого посилення дугової ерозії та збільшення часу розпаду дуги до кількох мілісекунд, тоді як для дифузної дуги цей час вимірюється мікросекундами. Тому для ефективного гасіння дуги під час відключення, особливо при наближенні струму до нуля, необхідно забезпечити збереження дифузної форми дуги.

Характеристики вакуумного вимикача значною мірою залежать від роботи його контактної системи. Під час комутаційних процесів на контактних поверхнях відбувається ерозія. Інтенсивність цієї ерозії визначається тривалістю горіння дуги, величиною струму, що відключається, температурою плавлення матеріалу контактів та ефективністю тепловідведення.

Важливими чинниками при виготовленні вакуумної камери (рис.1.2) є матеріал конструкції та її герметичність. Для більшості сучасних вакуумних камер ізоляційний корпус виготовляють із порцеляни з високим вмістом оксиду алюмінію. Герметизація камери від зовнішнього середовища забезпечується за допомогою зварних з'єднань, зокрема аргонодугового

зварювання, що гарантує збереження ізоляційних властивостей протягом усього терміну служби.

Матеріал контактів безпосередньо впливає на експлуатаційні характеристики вимикача. Він повинен поєднувати високу механічну міцність, добру електропровідність, стійкість до високих температур і корозійне збереження, щоб забезпечувати надійну роботу апарата протягом усього ресурсу.

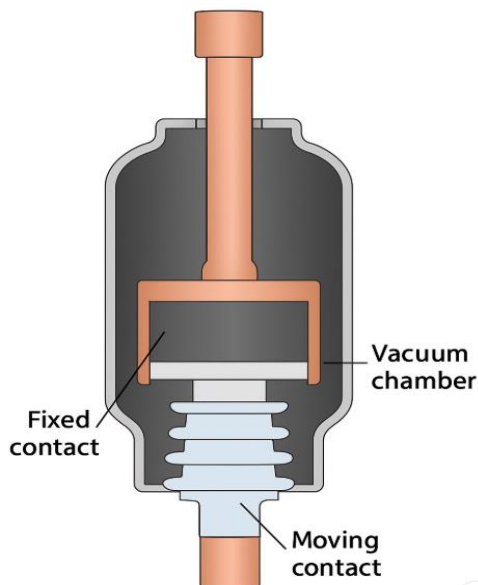


Рисунок 1.2 – Вакуумна дугогасильна камера

Контакти вакуумних вимикачів зараз не виготовляють із чистої міді через ускладнення дегазації, а також через те, що чиста мідь має меншу температуру плавлення, що може призвести до її розм'якшення, деформації, оплавлення та зварювання.

1.2. Сучасне елегазове електрообладнання енергосистем та особливості його експлуатації

Стрімке зростання популярності елегазових вимикачів на ринку зумовлене відмінними дугогасними властивостями елегазу (SF_6) та високим рівнем безпеки експлуатації такого комутаційного обладнання. Незважаючи на відносно високу вартість, елегазові вимикачі й досі не мають гідних конкурентів за ефективністю гасіння електричної дуги.

Елегазові високовольтні вимикачі призначені для оперативного керування та контролю режимів роботи високовольтних електричних мереж. За конструкцією вони подібні до масляних вимикачів, проте замість масла для гасіння дуги використовується газова суміш, найчастіше — шестифториста сірка (SF_6). Завдяки цьому такі вимикачі мають низку переваг, які докладніше розглянуто нижче.

Завдяки поєднанню швидкої ефективності гасіння дуги, вираженої високої діелектричної міцності, шестифториста сірка забезпечує елегазовим вимикачам вищу надійність в класах високої та надвисокої напруги. Саме ці властивості роблять середовище SF_6 надзвичайно придатним для припинення електричних розрядів та відновлення ізоляційних характеристик після вимкнення.

Ключова перевага елегазових вимикачів — їхня здатність до швидкого й ефективного гасіння дуги при збереженні високого ступеня електричної ізоляції та стабільності фізико-хімічних властивостей газу. Це поєднання забезпечує надійну роботу комутаційного обладнання в умовах підвищеної напруги та інтенсивних експлуатаційних навантажень.

Особливо важливою характеристикою є діелектрична міцність дугогасного середовища. SF_6 демонструє одні з найкращих показників пробивної напруги серед газів, що робить елегазові вимикачі особливо ефективними на рівні напруги 110 кВ і вище, де вимоги до відновлення ізоляції після розриву кола особливо суворі.

Елегаз є негорючим і хімічно інертним газом. Його розклад не супроводжується утворенням вибухонебезпечних речовин, тому ризик займання чи вибуху повністю відсутній.

Завдяки високій діелектричній міцності SF_6 , відстані між струмопровідними елементами в елегазових вимикачах можуть бути значно меншими, ніж у пристроях з іншими ізоляційними середовищами.

Крім того, для комутаційного обладнання, розрахованого на надвисокі напруги, елегазові вимикачі потребують меншої кількості дугогасильних

переривників на один полюс у порівнянні з повітряними та масляними вимикачами, що спрощує конструкцію і підвищує надійність роботи.

Елегазові вимикачі зовнішньої установки відзначаються простотою конструкції, компактністю, надійністю та невисокою вартістю. Вони практично не потребують технічного обслуговування та стабільно працюють за будь-яких атмосферних умов.

Під час експлуатації такі вимикачі мають низький рівень шуму, на відміну від пристроїв з повітряною ізоляцією, що створюють характерні звукові ефекти під час комутації. Крім того, елегаз не потребує частого оновлення, завдяки чому зменшується ерозія контактів. Самі контакти залишаються чистими, оскільки матеріал не піддається окисленню навіть після тривалої роботи [3].

Елегазовий високовольтний вимикач забезпечує ізоляцію фаз між собою за допомогою SF_6 , яка виступає як ізоляційне та дугогасне середовище. Під час подання сигналу на відключення електрообладнання контакти вимикача (у разі колонкової конструкції — у кожній окремій камері) розмикаються, утворюючи електричну дугу в газовому середовищі.

Під дією дуги частина елегазу розкладається на складові елементи, однак підвищений тиск у камері сприяє швидкому згасанню дуги та відновленню ізоляційних властивостей газу. Якщо система працює при зниженому тиску, для забезпечення ефективного гасіння дуги застосовують компресори, що створюють необхідне газове дуття.

Для стабілізації процесу комутації та рівномірного розподілу струму у схемі додатково використовують шунтувальні елементи.

Попри численні переваги, елегазові вимикачі мають і певні недоліки, серед яких варто відзначити такі:

- Елегаз є задушливим газом. У разі витоку з корпусу вимикача він, будучи важчим за повітря, накопичується в нижній частині приміщення, що може створювати небезпеку для персоналу через нестачу кисню. При цьому сам по собі елегаз не є токсичним.

-Продукти розкладу елегазу, що утворюються під час гасіння електричної дуги, мають токсичні властивості, тому слід уникати їхнього вдихання та забезпечувати належну вентиляцію.

-Обслуговування елегазових вимикачів вимагає особливої чистоти. У процесі профілактики внутрішні частини апарата необхідно ретельно очищати в сухому, чистому середовищі, видаляючи залишки пилу тефлону та сульфідів, які можуть утворюватися внаслідок розкладу газу.

Під час експлуатації елегазового обладнання необхідно враховувати кілька важливих аспектів. Після першого гасіння електричної дуги в середовищі елегазу утворюються хімічно активні сполуки, небезпечні для здоров'я людини. Їхня концентрація може бути настільки високою, що під час заміни або відкачування відпрацьованого газу SF₆ потрібно суворо дотримуватися правил безпеки: використовувати респіратори, засоби захисту очей і шкіри.

Внутрішні поверхні газових камер після розбирання обов'язково підлягають нейтралізації спеціальним розчином гашеного вапна для видалення залишків шкідливих речовин. Крім того, у закритих розподільних пристроях слід передбачати встановлення спеціальних датчиків для постійного моніторингу стану середовища та виявлення можливих витоків елегазу, що забезпечує безпечну експлуатацію обладнання.

На сьогодні елегазові вимикачі є найбільш поширеними у діапазоні напруги від 110 до 1150 кВ (рис.1.3). Водночас активно ведуться дослідження та розробки компактних моделей для мереж напругою 10–35 кВ, які можуть стати конкурентами вакуумним вимикачам.

Сучасна енергетика постійно розвивається: з'являються нові технології, удосконалюється електротехнічне обладнання, впроваджуються альтернативні джерела енергії. Проте вже сьогодні очевидно, що елегазові вимикачі залишаються одним із найсучасніших і найперспективніших типів комутаційних апаратів, які впевнено займають провідні позиції на ринку, успішно конкуруючи з вакуумними та масляними аналогами.



Рисунок 1.3 - Баковий елегазовий вимикач 100-SFMT-40E виробництва Mitsubishi Electric: дугогасний пристрій компресійного типу.

Однією з ключових особливостей експлуатації елегазового електрообладнання є частковий розклад SF_6 під впливом дугових або коронних розрядів. У результаті цього процесу утворюються хімічно активні сполуки, які можуть пошкоджувати ізоляційні та конструкційні матеріали комутаційного апарата і створювати потенційну загрозу для здоров'я обслуговуючого персоналу підстанцій.

Додатково слід враховувати низьку температуру зрідження елегазу — близько -64°C , що накладає певні обмеження на експлуатацію та зберігання обладнання в умовах низьких температур, забезпечуючи стабільну роботу та збереження фізико-хімічних властивостей газу.

В елегазовому вимикачі серії LF 6,10 кВ компанії «Schneider Electric» реалізовано принцип вихрового обертання дуги в газовому середовищі та механізм автогенерації тиску, що забезпечує оптимальні умови для її гасіння. Завдяки цьому підвищується ефективність гасіння дуги, що дозволяє збільшити номінальну напругу на один розрив вимикача [4].

В сучасній електроенергетиці набули широкого застосування герметизовані комплектні розподільчі пристрої (КРПЕ) (рис.1.4). У таких

пристроях усі елементи електрообладнання — струмопровідні частини, вимикачі, роз'єднувачі та інші апарати — розташовані всередині герметичної оболонки, яка заповнена елегазом під робочим тиском. Це дозволяє забезпечити високу надійність, безпеку експлуатації та компактність конструкції, оскільки газ виконує одночасно функції ізоляційного та дугогасного середовища.

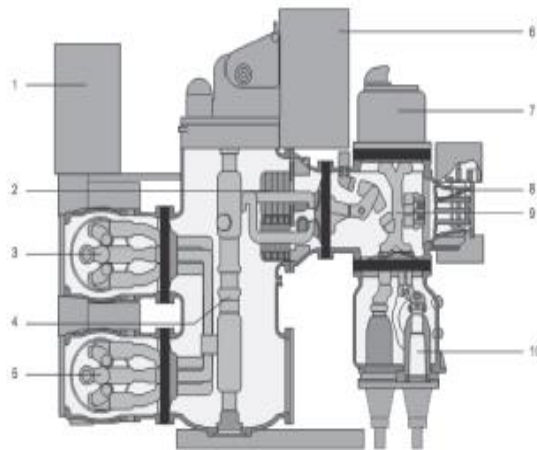


Рисунок 1.4 - Комірка КРПЕ компанії «Siemens» з подвійною системою збірних шин: 1 – шафа управління; 2 – трансформатор струму; 3, 5 – збірні шини з роз'єднувачами та заземлювачами; 4 – дугогасильна камера; 6 – пружинний привід; 7 – трансформатор напруги; 8 – швидкодіючий заземлювач; 9 – модуль лінії з роз'єднувачем та заземлювачем; 10 – кінцева кабельна муфта

Елегазові комплектні розподільчі пристрої дозволяють значно зменшити площу та об'єм підстанцій, займаних обладнанням, одночасно підвищуючи рівень захисту персоналу від впливу електричних і магнітних полів та забезпечуючи високу електробезпеку. Вони ефективно захищають ізоляцію електрообладнання від впливу атмосферних факторів, значно знижують рівень шуму під час роботи (завдяки властивостям елегазу як акустичного ізолятора) та усувають радіоперешкоди. Крім того, такі пристрої відзначаються високою надійністю та підвищеною сейсмостійкістю, що робить їх оптимальним рішенням для сучасних розподільних мереж.

Під час експлуатації КРПЕ необхідно враховувати ризик внутрішнього короткого замикання на корпус, який може виникати при горінні дуги та супроводжується підвищенням тиску всередині оболонки. У зв'язку з цим висуваються підвищені вимоги до міцності та герметичності корпусів елементів. Для забезпечення електробезпеки передбачено надійне заземлення як окремих компонентів, так і всієї конструкції розподільчого пристрою.

Технічні характеристики сучасних КРПЕ приведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Технічні характеристики сучасних КРПЕ

№	Технічні характеристики	ABB	Hyundai	Siemens
1	Розрахункова номінальна напруга, кВ	72,5	72,5	72,5
2	Розрахункова короткочасна випробувальна змінна напруга (1 хв.), кВ	140	140	140
3	Розрахункова напруга, що витримується, грозового імпульсу (1,2/50 мкс), кВ	325	325	325
4	Розрахунковий робочий струм збірної шини/фідера, А	2500	2000	2500
5	Розрахунковий струм відключення короткого замикання, кА	50	40	31,5
6	Розрахунковий ударний струм, кА	125	81,9	85
7	Розрахунковий короткочасний струм термічної стійкості, кА	31,5	31,5	31,5
8	Привід силового вимикача	пружинно-гідравлічний	пружинно-моторний	пружинний
9	Габарити комірки, мм/мм/мм	1000/3600/2700	-	650/800/1200

КРПЕ виготовляються у вигляді комплексу функціональних осередків, кожен з яких виконує окрему роль у складі електричної схеми розподільного

пристрою. Осередки, як правило, трифазні, і складаються з окремих блоків, розміщених у герметичній металевій оболонці циліндричної або сферичної форми, яка заповнена елегазом під невеликим надлишковим тиском.

При оцінюванні токсичності газоподібних продуктів розкладу шестифтористої сірки особливу увагу слід приділяти фториду тіонілу (SOF_2), який характеризується високою швидкістю утворення (об'єм у літрах на кілоджоуль енергії дуги) та суттєвим токсичним впливом. Водночас внесок інших сполук, таких як сірчаний фторид (SO_2F_2) та дисульфід декафториду (S_2F_{10}) — навіть незважаючи на високу токсичність останнього — у загальний токсичний ефект продуктів розкладу SF_6 є незначним і може вважатися допустимим [5].

Контроль рівня забруднення елегазу продуктами його розкладу під дією електричної дуги є важливою складовою забезпечення надійної та безпечної експлуатації елегазових вимикачів. Така необхідність зумовлена тим, що хімічно активні сполуки, які утворюються під час розкладу елегазу, можуть негативно впливати на стан конструкційних і ізоляційних матеріалів, погіршуючи їхні електричні та механічні властивості. Крім того, у разі витoku газу з корпусу вимикача або під час проведення технічного обслуговування існує ризик потрапляння елегазу та продуктів його розкладу в атмосферу приміщення електричної підстанції, що створює додаткову небезпеку для персоналу та довкілля.

Гранично допустима концентрація елегазу в повітрі виробничих приміщень, де персонал перебуває протягом восьмигодинного робочого дня п'ять днів на тиждень, не повинна перевищувати 6000 мг/м^3 . Елегаз, який зазнав забруднення продуктами розкладу, може бути підданий процесу очищення та повторно використаний за умови дотримання встановлених критеріїв якості, що гарантують його безпечну та ефективну експлуатацію.

Компанією «DILO» розроблено спеціалізовані прилади, призначені для безперервного моніторингу складу повітря у приміщеннях електричних підстанцій з метою виявлення перевищення допустимого рівня концентрації

елегазу. Ці пристрої також забезпечують своєчасне виявлення витоків елегазу з електротехнічного обладнання. У разі, коли концентрація газу у контрольній зоні перевищує 2,0 % від об'єму приміщення, прилад автоматично подає попереджувальний сигнал, що дозволяє оперативно вжити заходів безпеки.

Систематичний оперативний контроль стану елегазу у високовольтному комутаційному обладнанні під час його експлуатації забезпечує ефективну оптимізацію строків і обсягів технічного обслуговування, а також сприяє підвищенню надійності та безпеки проведення робіт з живлення та ремонту електроустаткування.

У результаті можна зробити висновок про те, що: проведено огляд та аналітичне дослідження сучасного елегазового високовольтного електрообладнання, що використовується на підстанціях систем електропостачання промислових об'єктів та на розподільних пристроях електричних станцій.

Зі збільшенням кількості комутацій елегазового вимикача спостерігається зростання об'єму продуктів його розкладу на 1–2 % та зменшення залишкового об'єму чистого елегазу. Система діагностики стану елегазу у високовольтному вимикачі може бути використана для оперативного моніторингу його стану у складі автоматизованих систем управління електропостачанням.

1.3. Особливості діагностування високовольтного обладнання з елегазовою ізоляцією

Поглиблений аналіз вітчизняного та зарубіжного досвіду випробувань і експлуатації комплектних розподільчих установок елегазового типу показав, що специфічні властивості їхньої ізоляційної системи суттєво відрізняються від характеристик традиційного електрообладнання. Через це застосування стандартних методів випробувань підвищеною напругою, у яких критерієм оцінювання є лише факт наявності або відсутності пробую, є недоцільним. Такий підхід не враховує особливостей розподілу електричного поля в

герметичних елегазових комірках і може призвести до отримання хибних результатів. Зокрема, можливе виникнення подвійної помилки: по-перше, помилкове визначення справної ізоляції як дефектної через локальні перенапруги, а по-друге, невизначення реальних дефектів, що не проявляються під час короткочасного випробування. Таким чином, для КРПЕ необхідне удосконалення методології діагностики стану ізоляції, яка б враховувала її специфічну конструкцію, фізико-хімічні властивості елегазу та характер електричних навантажень під час експлуатації [6]:

1. Неможливість виявлення дефекту на ранніх етапах його формування.
2. Відсутність здатності випробування ініціювати виникнення дефектів у справній ізоляції.

Найбільш поширеними видами дефектів у КРПЕ є:

- а) пошкоджені або дефектні ізолятори;
- б) внутрішні порожнини чи повітряні включення в ізоляційному матеріалі;
- в) наявність дрібних сторонніх частинок (пилу, тирси, металевої стружки тощо);
- г) утворення під час заводських випробувань провідних «доріжок», які з часом можуть розвиватися та спричиняти часткові розряди;
- д) зміщення або неправильне розташування екранів;
- е) сторонні предмети, що потрапили у внутрішній об'єм КРПЕ.

Згідно з опублікованими дослідженнями, найбільш ефективним способом виявлення потенційних дефектів ізоляції КРПЕ є випробування підвищеною напругою змінного струму з одночасною реєстрацією параметрів часткових розрядів. Цей метод дає змогу не лише ідентифікувати наявність дефектів, але й визначити їхнє просторове розташування та оцінити ступінь небезпеки для подальшої експлуатації обладнання. Саме тому його прийнято як основний діагностичний засіб під час контролю стану ізоляції КРПЕ.

Для проведення випробувань ізоляції КРПЕ безпосередньо на місці їх встановлення необхідно забезпечити реалізацію двох основних технічних умов.

По-перше, слід розробити науково обґрунтовану та високоефективну методику діагностики ізоляції, яка дозволить своєчасно виявляти наявні та потенційні дефекти без порушення цілісності обладнання, тобто із застосуванням неруйнівних методів контролю.

По-друге, необхідно створити компактне та мобільне джерело випробувальної напруги, придатне для транспортування стандартними автотранспортними засобами та здатне до швидкого монтажу і введення в роботу безпосередньо на місці проведення випробувань. Такий підхід забезпечить оперативність діагностики, зниження експлуатаційних витрат і підвищення достовірності оцінки технічного стану ізоляції КРПЕ.

Розроблена методика неруйнівних випробувань, що дозволяє виявити можливі дефекти ізоляції на основі реєстрованих параметрів часткових розрядів (ЧР).

Методика діагностики стану ізоляції спирається на інтегроване застосування електричного та акустичного способів реєстрації часткових розрядів. Електричний метод забезпечує високу чутливість до параметрів імпульсів ЧР, їхніх амплітудно-часових характеристик і фазової залежності, що важливо для кількісної оцінки ступеня дефектності. Акустичний метод, у свою чергу, дозволяє локалізувати джерело розрядів у просторі та відокремити корисні сигнали від електромагнітних перешкод при зондуванні великогабаритних конструкцій. Суміщення обох підходів дає змогу компенсувати індивідуальні обмеження кожного методу і значно підвищити надійність, точність та інформативність діагностики ізоляції.

Діагностика ізоляції КРПЕ на наявність часткових розрядів за допомогою акустичного методу здійснюється як у процесі експлуатації обладнання під робочою напругою, так і під час його первинного введення в експлуатацію або після проведення ремонтних робіт. У випадку випробувань від стороннього

джерела живлення акустичний контроль виконується одночасно з електричними випробуваннями, що дозволяє комплексно оцінити стан ізоляції, своєчасно виявити дефекти та визначити їх місце розташування без порушення герметичності або конструкційної цілісності КРПЕ.

Акустична діагностика елементів КРПЕ застосовується також під час введення в експлуатацію елегазових підстанцій, паралельно з випробуваннями на наявність часткових розрядів, що проводяться електричним методом. Як правило, під час первинного введення в експлуатацію акустичний контроль використовується для уточнення просторового розташування дефектів ізоляції, виявлених у процесі реєстрації часткових розрядів електричним способом.

У випадках, коли діагностика охоплює обмежену кількість комірок КРПЕ (наприклад, при післяремонтному контролі), акустичні датчики встановлюються у кожному з герметичних об'ємів. Це дає змогу здійснювати одночасне виявлення часткових розрядів та точне визначення їх місця виникнення, що істотно підвищує ефективність контролю стану ізоляції.

Для діагностики елегазового обладнання також застосовують оптичний метод виявлення дефектів ізоляції, який дозволяє індексувати наявність порушень безконтактним способом. Цей підхід забезпечує додаткову інформацію про стан ізоляційних матеріалів і може ефективно доповнювати електричні та акустичні методи контролю.

Отже, запропонований метод дозволяє ефективно здійснювати діагностику стану ізоляційних конструкцій, встановлених на високовольтних лініях і підстанціях. Виявлення проблемних ділянок ізоляції може проводитися без використання спеціалізованих приладів і зберігатися протягом тривалого часу до проведення планового або позапланового огляду обладнання. Впровадження цього методу забезпечує підвищення надійності та ефективності дистанційного контролю стану ізолюючих елементів, зокрема при моніторингу з рухомих транспортних засобів, а також спрощує алгоритми автоматизації процесів контролю, роблячи їх більш оперативними та точними.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1:

Вивчення особливостей роботи та експлуатації сучасних вакуумних і елегазових вимикачів показує, що ці типи обладнання характеризуються високим ступенем надійності, компактністю та здатністю ефективно працювати у високовольтних мережах різного призначення. Вакуумні вимикачі відзначаються швидким гасінням електричної дуги у герметичному вакуумному середовищі, що дозволяє зменшити зношення контактів та забезпечує довготривалий ресурс роботи.

Елегазові вимикачі, у свою чергу, забезпечують стабільну роботу при великих номінальних струмах та напругах, завдяки високій діелектричній міцності SF₆, який використовується як ізолююче та дугогасне середовище. Особливості конструкції та ізоляції цих пристроїв визначають специфічні вимоги до їхнього обслуговування, технічного контролю та діагностики, оскільки навіть незначні дефекти ізоляції можуть призвести до часткових розрядів або аварійних режимів.

Діагностування обладнання з елегазовою ізоляцією потребує застосування спеціалізованих методів, що дозволяють виявляти дефекти без пошкодження конструкції. Найбільш ефективними є комбіновані методики, що включають реєстрацію часткових розрядів електричним і акустичним методами. Електричний метод забезпечує високу чутливість до параметрів розрядів, дозволяючи кількісно оцінювати ступінь дефектності, тоді як акустичний метод дає змогу локалізувати джерело дефекту та відокремлювати сигнали ЧР від електромагнітних перешкод. Крім того, для додаткової діагностики застосовують оптичні методи індикації дефектів, що дозволяють виявляти порушення ізоляції безконтактним способом і зберігати інформацію про проблемні ділянки протягом тривалого часу.

Інтегроване використання цих методів підвищує надійність і точність діагностики, дозволяє своєчасно виявляти дефекти на ранніх стадіях розвитку та знижує ризик пошкодження справної ізоляції під час контролю.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВАКУУМНИХ ТА ЕЛЕГАЗОВИХ ВИМИКАЧІВ

2.1. Комутаційні випробування вакуумного вимикача

Конструктивною особливістю даної вакуумної дугогасної камери (ВДК) є наявність феромагнітного екрана (рис.2.1), який характеризується низькою теплопровідністю та має гальванічний зв'язок із нерухомим контактом. Поєднання цих двох чинників — обмеженої теплопровідності матеріалу екрана та його електричного з'єднання з контактним вузлом — призводить до зниження відключаючої здатності вакуумної дугогасної камери [8].

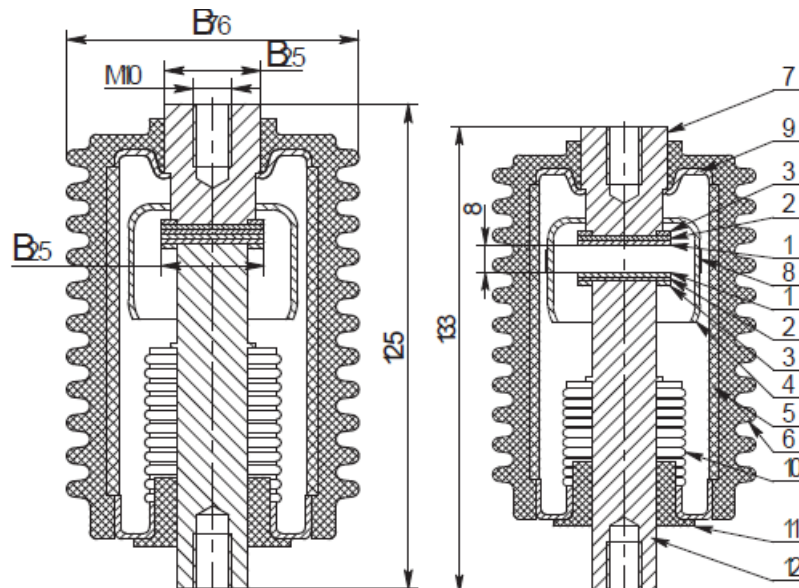


Рисунок 2.1 - Експериментальна вакуумна дугогасна камера: 1 – контактний майданчик; 2 – підкладка; 3 – полюс; 4 – феромагнітний екран; 5 – керамічний ізолятор; 6 – силіконовий ізолятор; 7 – нерухомий контакт; 8 – газопоглинач; 9 – фланець; 10 – сильфон; 11 - напрямна втулка; 12 – рухомий контакт

Іншою конструктивною особливістю є те, що відстань між розімкнутими контактами співрозмірна з проміжком між бічною поверхнею контакту та феромагнітним екраном. Подібна конфігурація сприяє утворенню дугових розрядів між екраном і контактом. При цьому зі збільшенням ходу контактів вакуумної дугогасної камери відстань між ними поступово зменшується, а за

наявності коливань рухомого контакту під час відключення вона може наблизитися до мінімального значення.

Вимикач має конструкцію, що включає три експериментальні вакуумні дугогасні камери — по одній на кожен полюс, а також приводний механізм і систему керування. Усередині кожної камери розміщено два контакти: рухомий (12) і нерухомий (7).

У робочому (ввімкненому) положенні пружинний механізм забезпечує щільне з'єднання контактів, що гарантує надійний електричний контакт. Під час відключення струму контакти швидко розходяться зі швидкістю близько 1 м/с. У момент розриву електричного кола між контактами утворюються металеві пари внаслідок їх часткового плавлення. Ці пари формують електричну дугу, яка зберігається до моменту, коли струм у колі зменшується до нульового значення [9].

Із розплавленої поверхні контактів формується тонкий металевий місток, який тимчасово з'єднує їх електрично. Через проходження струму надвисокої густини цей місток швидко перегрівається і вибухоподібно руйнується. У результаті простір між контактами заповнюється мікро краплинами металу, що створюють провідне середовище, через яке ще певний час продовжує проходити струм. При цьому напруга між контактами залишається дуже низькою — становить лише кілька відсотків від номінального значення напруги вимикача.

Після згасання дуги між контактами встановлюється висока напруга, тоді як струм у колі вимикача вже відсутній. Це дозволяє під час випробувань відключаючої здатності вимикача застосовувати два синхронізовані джерела живлення: одне — для подавання великого струму за низької напруги, інше — для створення високої напруги за малого струму. Такий підхід покладено в основу проведення синтетичних випробувань вимикачів [9].

Для виконання синтетичних випробувань створено спеціалізований стенд, виконаний за схемою Вейля–Добке (рис.2.2). Стенд складається з двох синхронізованих електричних контурів: потужного струмового контуру

генератора імпульсних струмів (ГІС), у якому формуються струми короткого замикання, та високовольтного контуру генератора імпульсної напруги (ГІН), призначеного для створення прикладеної випробувальної напруги (ВН). Синхронізація обох контурів забезпечує відтворення реалістичних умов одночасної дії високого струму й високої напруги, необхідних для достовірного оцінювання відключаючої здатності вимикачів.

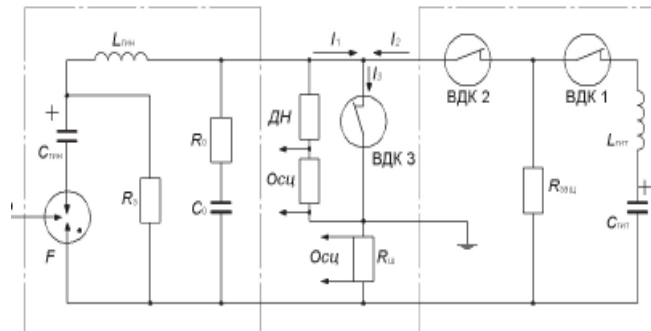


Рисунок 2.2 -Принципова схема випробувального стенду: $C_{ГІН}$ і $C_{ГІС}$ – конденсаторні батареї; $L_{ГІН}$ і $L_{ГІС}$ – індуктивності контурів; ВДК 1 – комутаційна ВДК; ВДК 2 – захисна ВДК; ВДК 3 – випробувальна ВДК; R_0 і C_0 – резистивний і ємнісний елементи схеми формування ПВН; R_3 – зарядний резистор; F – повітряний високовольтний керований розрядник; I_1 – струм ГІН; I_2 – струм ГІС; I_3 – струм у випробовуваній ВДК; ДН – резистивний дільник напруги; $R_{зах}$ – захисний резистор; $R_{ш}$ – опір струмового шунта

Відключаюча здатність вакуумної дугогасної камери визначається комплексом чинників, серед яких напруга, струм, геометричні розміри камери, відстань між контактами під час відключення, величина «вильоту» контактів, швидкість їх розходження, матеріал контактів, а також якість вакуумно-термічної обробки [10]. Серед усіх перелічених параметрів найбільш зручними для оперативного регулювання під час проведення випробувань є значення комутованого струму та прикладеної напруги.

Під час проведення синтетичних випробувань ГІН та ГІС використовувалися як уніполярні джерела живлення. Протягом усього часу випробувань рухомі та нерухомі контакти вакуумного дугогасного комутатора зберігали постійну полярність.

Відомо, що дугова ерозія анода і катода в дуговому розряді протікає неоднаково, що під час тривалих випробувань може викликати асиметричні зміни в контактній системі ВДК. Це, у свою чергу, створює нерівномірні умови для горіння та гасіння вакуумного розряду. Навпаки, якщо внутрішня конструкція ВДК є несиметричною, умови ініціації електричного пробою та гасіння дуги на аноді і катоді також відрізняються.

Виходячи з отриманих результатів, на третьому етапі випробувань було проведено експериментальне дослідження відключаючої здатності ВДК із урахуванням зміни полярності контактів фази А. Такий підхід дозволив оцінити вплив полярності на процес горіння та гасіння вакуумного розряду та виявити можливі асиметрії у роботі комутуючого апарата.

Після відкриття однієї з камер, що пройшли випробування, було встановлено, що ерозії піддалася лише частина поверхні контактів ВДК. Без проведення додаткових експериментальних досліджень неможливо однозначно встановити причину цього явища. Проте на даному етапі можна висунути обґрунтоване припущення, що конфігурація магнітного поля в досліджуваних ВДК сприяє переходу електричної дуги у контрагований стан, що негативно позначається на комутаційному ресурсі апарата.

Спираючись на результати, отримані під час випробувань, можна сформулювати низку рекомендацій, спрямованих на забезпечення оптимального режиму роботи ВДК під час дослідів з відключення: по-перше, зменшити хід контактів до мінімально допустимого значення; по-друге, скоротити «виліт» контактів ВДК під час відключення шляхом додаткового регулювання буфера відключення; по-третє, забезпечити максимальне збільшення швидкості руху контактів ВДК під час відключення.

Синтетичні випробування підтвердили, що досліджувані експериментальні ВДК у складі вакуумного вимикача типу ВВТ10–20 здатні ефективно відключати струм до 18,3 кА при робочій напрузі 0,85 кВ.

Попереднє припущення про те, що випробовуваний високовольтний вимикач, оснащений по одній експериментальній ВДК у кожному полюсі, здатний ефективно працювати в мережах напругою 10 кВ, не підтвердилося. Кількість відмов у комутації дугогасильних камер усіх фаз вимикача свідчить про те, що конструкція контактно-екранної системи випробуваної ВДК не забезпечує надійного відключення номінальних струмів 10 кА. Водночас встановлено, що послідовне включення двох ВДК у кожному полюсі вимикача дозволяє відключати струми 10 кА при робочій напрузі, характерній для апаратів класу напруги 10 кВ.

2.1.1. Ресурсні випробування вакуумних дугогасних камер полюса вимикача

Зі збільшенням напруги комутованого кола необхідно відповідним чином збільшувати зазор між контактами. Проте збільшення цього зазору ускладнює підтримання стабільних параметрів дуги та оптимального стану контактів, що робить неможливим повторний пробій вакуумного проміжку. Тому для напруги понад 100 кВ замість застосування однієї вакуумної дугогасної камери, розрахованої на повну напругу, у цієї конструкції вимикача використовуються полюси з послідовно з'єднаними декількома ВДК, кожен з яких має менші габарити та міжконтактні проміжки, розраховані на нижчу напругу.

У представленому полюсі вакуумні дугогасні камери з'єднуються між собою за допомогою шини. Утворення ємності «шина–земля» призводить до того, що окремі ВДК працюють у різних електричних режимах, а отже, їх контакти функціонують за різних експлуатаційних умов. Зі збільшенням величини цієї ємності відмінності в режимах роботи ВДК стають більш помітними та суттєвими.

Конструктивно полюс вимикача може виконуватися з вертикальним або горизонтальним розташуванням ВДК. Дослідження показують, що при вертикальному розташуванні камер величина ємності «шина—земля» перевищує аналогічний параметр для горизонтального виконання, що слід враховувати при проектуванні та експлуатації вимикачів.

Однак при вертикальному розташуванні ВДК спрощується конструкція полюса.

Нижче представлені результати детального аналізу стану контактів вакуумних дугогасних камер типу КДВА-60-31,5/2000 у складі полюса вимикача на 110 кВ після ресурсних випробувань при струмі короткого замикання (КЗ) 31,5 кА. У досліджуваному полюсі дві камери з'єднані послідовно та розташовані вертикально, що визначає специфічний розподіл електричних та термічних навантажень на контакти. Врахування вертикального розташування є важливим, оскільки воно підвищує ємність «шина—земля» та, як наслідок, впливає на різницю режимів роботи окремих камер.

Для оцінки ефективності та ресурсної стійкості проведено порівняльний аналіз стану контактів зазначених ВДК зі станом контактів камер типу КДВА5-10-20/1600 після ресурсних випробувань за струму короткого замикання 20 кА [11]. Це дозволяє оцінити вплив величини струму короткого замикання та конструктивних особливостей камер на інтенсивність зношування контактів та надійність роботи вимикача в експлуатаційних умовах.

Конструктивні характеристики зазначених ВДК наведено у табл.2.1. Як можна помітити, у ВДК типу КДВА5-10-20/1600 питоме струмове навантаження контактів є меншим. У ВДК КДВА-60-31,5/2000 контакти мають плоску форму, тоді як у ВДК КДВА5-10-20/1600 один контакт виконаний з опуклою, а інший — з увігнутою поверхнею. В обох типах камер контакти виготовлені з матеріалу ХД-70, при цьому в міжконтактному проміжку під час протікання струму формується аксіальне магнітне поле.

Таблиця 2.1 - Конструктивні дані ВДК

Тип ВДК	Діаметр контактів, мм	Відстань між контактами, мм
КДВА-60-31,5/2000	90	25 - 30
КДВА5-10-20/1600	45	6 - 8

При випробуванні ВДК КДВА-60-31,5/2000 у складі полюса спочатку виконувалось 15 операцій "відключення", а потім 15 операцій "включення-відключення". Після випробувань знос контактів обох камер однаковий і становить 0,8-0,9 мм.

Аналіз стану контактних поверхонь обох ВДК після комутаційних випробувань та дослідження структури їх поверхневого шару не виявив суттєвих відмінностей. На рис.2.3 представлено фотографію робочої поверхні одного з контактів. Як видно, робоча площа контакту зазнала оплавлення, а на бічній поверхні спостерігається наплавлення матеріалу контакту.

Ці спостереження свідчать про локалізоване термічне та електричне навантаження під час проходження струму комутації, що впливає на зношування контактів. Виявлені ознаки оплавлення та наплавлення матеріалу можуть слугувати критеріями оцінки ресурсу ВДК та прогнозування їхньої надійності в умовах експлуатації при високих струмах короткого замикання.



Рисунок 2.3 - Фото робочої поверхні контакту ВДК після ресурсних випробувань

Як видно, робоча поверхня контакту зазнала оплавлення, а на бічній поверхні спостерігається наплавлення матеріалу контакту. Це явище пояснюється видавлюванням розплавленого матеріалу під дією електричної дуги, яка виникає під час замикання контактів. Слід також зазначити, що замикання відбувається за додаткового підтискання контактів, що дорівнює 3000 Н, що сприяє інтенсивнішому переміщенню матеріалу. Видавлювання розплавленого матеріалу є додатковим чинником, який пояснює зношування контактів під час ресурсних випробувань полюса.

На рис.2.4 представлено фотографію шліфу поверхневого шару контакту ВДК після ресурсних випробувань. Внаслідок оплавлення на робочій поверхні утворився вторинний шар із зміненою мікроструктурою. Металографічний аналіз показав, що глибина оплавлення розподіляється наступним чином:

- у центральній частині контакту (приблизно на половині діаметра) – від 40–60 до 240–270 мкм;
- на решті плоскої поверхні контакту – від 40–60 до 240–270 мкм;
- у зоні переходу від плоскої частини до бічної поверхні – до 90–180 мкм.

Формування вторинного шару обумовлене локальним нагрівом і розплавленням матеріалу під дією дуги під час комутацій. Зміна структури шару призводить до модифікації механічних та електричних властивостей поверхні контакту, що, у свою чергу, впливає на зносостійкість та надійність ВДК у процесі експлуатації.

Особливо варто відзначити, що максимальна глибина оплавлення в центральній зоні відповідає ділянкам найбільшого струмового навантаження та термічного впливу, що дозволяє прогнозувати інтенсивність зношування контактів у різних зонах поверхні.

Під час проведення ресурсних випробувань ВДК КДВА5-10-20/1600 виконано 170 циклів комутації, у тому числі 54 операцій «включення-відключення». Ця ідентичність дозволяє зробити такі висновки.

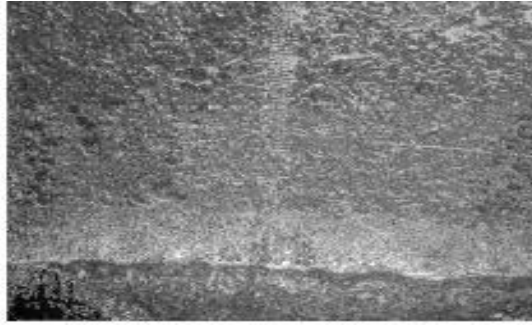


Рисунок 2.4 – Фото шліфу поверхневого шару контакту ВДК після ресурсних випробувань

1. Порівняльний аналіз максимальної глибини оплавлення робочих поверхонь обох камер свідчить про подібність структури дуги та рівень питомих теплових навантажень на ці поверхні. Глибина оплавлення за однакової густини струму визначається фізичними властивостями матеріалу контактів, а також характеристиками вторинного перехідного шару, що формується під дією дуги. Під час випробувань одночасно відбуваються процеси утворення вторинного шару на межі з основним матеріалом контакту та його часткове випаровування з поверхні. Унаслідок переважного випаровування міді у вторинному шарі змінюється співвідношення елементів хром–мідь, що зумовлює формування дрібнозернистої структури хрому.

2. Наявність шаруватої структури напливів на бічних поверхнях обох камер свідчить про те, що розплавлений матеріал витісняється з робочої зони в області, де дія дуги є менш інтенсивною. Значні напливи на бічних поверхнях контактів із сферичною формою зумовлені особливостями комутаційних циклів і підвищеним зношуванням крайових ділянок контактів такої геометрії.

Таким чином, аналіз стану робочих поверхонь контактів ВДК після ресурсних випробувань дозволяє стверджувати, що у процесі роботи ВДК у складі вимикача трапляється оплавлення цих поверхонь. При чому такий стан контактів не залежить від їх геометрії, значень струмів, що комутуються, та кількості циклів комутації.

2.1.2. Оцінка величини струму у вакуумних дугогасильних камерах

Нижче проводиться оцінка відмінності струмів, які протікають у двох ВДК у складі одного полюса. Полюси з таким числом ВДК набули найбільшого застосування.

Для проведення оцінювання застосовується еквівалентна електрична схема, подана на рис. 2.5. З рисунка видно, що дві вакуумні дугогасні камери (резистори R_1 і R_2) та ємність між шиною і землею (конденсатор $C_{ш-з}$) представлені у вигляді Т-подібного чотириполюсника, навантаженого на опір.

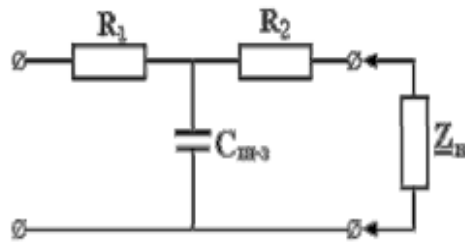


Рисунок 2.5 - Еквівалентна схема полюса вимикача на ВДК

$$\frac{I_2}{I_1} = \left[\left(1 + \frac{X_H}{X_c} \right)^2 + \left(\frac{R_H + R_2}{X_c} \right)^2 \right]^{-0,5},$$

співвідношення струмів ВДК полюсу вимикача, де: R_2 – сумарний опір ВДК на виході полюса та половини шини, що з'єднує ВДК у полюсі, X_c – опір ємності «шина-земля».

На рис.2.6 подано результати розрахунків за формулою, які демонструють залежність різниці струмів у вакуумних дугогасних камерах полюса від величини опору навантаження та його характеру. Отримані дані відповідають двом режимам роботи: коли контакти ВДК замкнуті та коли між ними горить дуга. З аналізу результатів випливає, що за наявності активного опору навантаження та індуктивної складової його реактивної частини струм у ВДК на виході полюса є меншим, ніж струм на його вході. За ємнісного характеру реактивного опору навантаження можливі ситуації, коли струм у ВДК на виході полюса перевищує струм на його вході. Розрахунки також показують, що зі збільшенням ємності «шина–земля» зростає різниця між струмами у ВДК. Відомо, що при горизонтальному виконанні конструкції полюса ємність «шина–земля» є меншою, ніж у вертикальному варіанті. Тому

для горизонтальної конструкції полюса відмінність струмів у ВДК буде меншою.

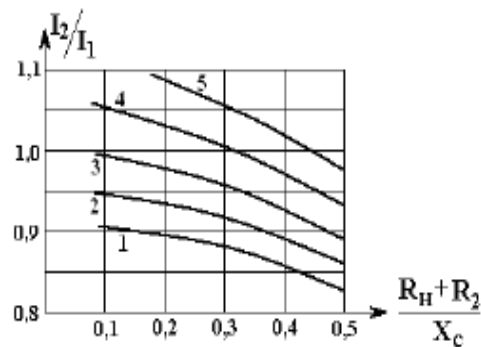


Рисунок 2.6 - Розрахункові залежності відмінності струмів у ВДК полюса від величин параметрів еквівалентної схеми

Відмінність струмів у ВДК полюса при комутації струмів короткого замикання визначається відношенням:

$$\frac{I_2}{I_1} = \left[1 + \frac{R_2^2}{X_c^2} \right]^{-0,5}.$$

Контакти ВДК, через які протікає більший струм i , відповідно, прикладається вища напруга, зазнають підвищеного теплового навантаження. Унаслідок цього комутаційний ресурс таких камер зменшується, що, своєю чергою, впливає на загальний комутаційний ресурс усього полюса. Отже, результати аналізу свідчать, що за показником комутаційної довговічності полюс, у складі якого застосовуються ВДК з аксіальним магнітним полем, має перевагу порівняно з полюсом, де використовуються камери іншого типу. Це підтверджує доцільність використання у вимикачах полюсів, побудованих на базі ВДК з аксіальним магнітним полем.

2.2. Дослідження часу експлуатації елегазового обладнання на стан ізоляції

Накопичено певний досвід експлуатації елегазового обладнання, проте дослідження, спрямовані на оцінку впливу тривалості його ізоляційного

ресурсу, не проводилися. У цьому контексті можна видокремити дві основні проблеми [12]:

1. З плином часу герметичність обладнання може знижуватися, що спричиняє проникнення атмосферного повітря всередину оболонок. Підвищена вологість і коронні розряди здатні викликати утворення небажаних домішок у електрообладнанні.

2. Тривала робота під дією високої напруги може спричинити порушення гладкості внутрішніх поверхонь елегазових пристроїв, що призводить до утворення локальної неоднорідності електричного поля та, як наслідок, до виникнення коронних розрядів.

Під час пусконаладжувальних робіт і сервісного обслуговування було виявлено низку типових відмов, зафіксованих на понад 20 підстанціях, де експлуатується близько 300 елегазових комірок.

До механічних причин відмов належать [13]:

- дефекти фіксувальних механізмів вимикача, що можуть спричиняти неповнофазне вмикання;
- несправності повітряно-пускових клапанів у режимах вмикання та вимикання;
- відмови засувки приводу вимикача;
- несправності, пов'язані з витіканням масла через ущільнення масляного демпфера.

Поодинокі відмови, що можуть розглядатися як виробничі дефекти, включають:

- дефекти опорного ізолятора;
- дефекти рухомих елементів дугогасної системи.

На початковому етапі експлуатації КРПЕ спостерігалися значні витіки елегазу через гумові ущільнення. Основною причиною цього були низькі якісні характеристики спеціальної елегазової гуми НО-68, а також частково недостатня точність обробки канавок у сполучних фланцях під круглі

ущільнювачі та недотримання рекомендованого коефіцієнта заповнення, близького до 0,94.

Для оцінки експлуатаційної надійності КРПЕ важливо розділяти відмови, що виникають у період налагодження та при первинному обкатуванні, і відмови, що трапляються під час нормальної експлуатації. Згідно з теорією надійності, будь-яка складна система проходить початковий етап «доопрацювання», протягом якого спостерігається максимальна інтенсивність відмов з поступовою тенденцією до зменшення.

Згідно зі статистичними даними експлуатації вітчизняних КРПЕ, можна виділити найбільш типові відмови:

- відмови комутаційних пристроїв, насамперед вимикачів та роз'єднувачів, а також їх приводів;
- відмови вимірювальних трансформаторів струму та напруги;
- витoki через ущільнення;
- відмови, спричинені діями персоналу.

Згідно зі статистичними даними щодо експлуатації вимикачів різної напруги у США, Канаді, Німеччині та інших країнах, включно з Україною, до основних видів відмов належать відмови механічного характеру.

Якщо не враховувати відмови механічного походження, найбільшу значимість мають відмови, пов'язані з не виконанням команд на вмикання та вимикання. Друге місце за поширеністю займають випадкові відключення, що в середньому складають близько 5 %, а для вимикачів напругою 500 кВ і вище перевищують 16 %.

Третє місце за поширеністю займають відмови, пов'язані з пробоем внутрішньої ізоляції у вимкненому положенні, що в середньому становить 4 %, а для вимикачів напругою 500 кВ і вище – 8,3 %.

Що стосується відмов, зумовлених електричними ланцюгами управління, їх частка досягає 14–19 %. Серед відмов механічного характеру, за даними опитувань закордонних компаній із США та Канади, значна частка

– від 19 до 28,4 % – припадає на клапани та інші елементи механізмів, що перебувають під робочою напругою.

За іншими даними, якщо не враховувати відмови механічного походження, наведено такий середній відсотковий розподіл причин відмов для всіх груп вимикачів [14]:

- дефекти конструкції та виробництва – 45,3 %;
- неточності в інструкціях щодо експлуатації та догляду – 0,7 %;
- недотримання інструкцій – 1,2 %;
- неналежне обслуговування – 8,1 %;
- перевантаження понад номінальні параметри – 48 %;
- інші зовнішні чинники (попадання тварин, птахів тощо) – 2,3 %;
- невстановлені причини – 28,3 %.

Спеціальний аналіз експлуатаційного досвіду 33 000 вимикачів у енергетиці США показав, що відмови, спричинені дефектами конструкції та виробництва, розподіляються між ними приблизно рівномірно.

За даними однієї німецької компанії, яка проаналізувала досвід експлуатації 3 000 вимикачів напругою 123 кВ із загальним обсягом 15 000 років спрацювання вимикачів, встановлено, що серед відмов, спричинених дефектами конструкції та виробництва, приблизно 70 % припадає на дефекти виробництва, а лише 30 % – на дефекти конструкції.

За результатами аналізу науково-технічної літератури встановлено, що тривалість експлуатації елегазового обладнання суттєво не впливає на його надійність. Надійність роботи забезпечується дотриманням правил технічної експлуатації обладнання.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2:

Аналіз результатів комутаційних випробувань вакуумного вимикача свідчить про те, що його робочі характеристики, зокрема здатність надійно здійснювати включення та відключення електричних ланцюгів, значною мірою залежать від конструктивних особливостей контактів та їх матеріалів. Під час випробувань виявлено, що формування вторинного перехідного шару на контактній поверхні та процеси локального оплавлення безпосередньо впливають на теплове навантаження контактів, а також на комутаційний ресурс вимикача. Розподіл струмів у полюсах ВДК, а також геометрія та форма контактів, визначають рівномірність теплового розподілу та довговічність обладнання, причому застосування ВДК з аксіальним магнітним полем демонструє переваги за показниками комутаційного ресурсу.

Ресурсні випробування вакуумних дугогасних камер дозволяють оцінити їхню роботу в умовах тривалих циклів включення та відключення. Дані випробувань показують, що структура контактів і вторинного шару визначає швидкість зносу та ступінь деградації матеріалів. Виявлено характерні особливості утворення напливів та дрібнозернистої структури хрому, що виникають унаслідок випаровування міді під час дугового процесу. Це дозволяє прогнозувати строки служби окремих елементів і визначати оптимальні режими роботи для продовження ресурсу вакуумних камер.

Дослідження часу експлуатації елегазового обладнання показують, що тривалість його роботи суттєво не впливає на надійність, якщо дотримуються правила технічної експлуатації та належного обслуговування. Основними причинами відмов є механічні дефекти, помилки персоналу, несправності в електричних ланцюгах управління, а також перевантаження понад номінальні параметри. Важливим є врахування герметичності обладнання, стану ущільнень та якісних характеристик матеріалів, що забезпечує стабільність ізоляційних властивостей і попереджає утворення коронних розрядів.

Загалом, узагальнення даних комутаційних та ресурсних випробувань вакуумних вимикачів та елегазового обладнання підтверджує, що надійність роботи сучасних високовольтних комутаційних пристроїв визначається поєднанням високоякісних конструкційних матеріалів, точності виготовлення, правильного підбору геометрії контактів, дотримання експлуатаційних норм і регулярного технічного обслуговування. Такий комплексний підхід дозволяє ефективно прогнозувати ресурс обладнання, зменшувати частоту відмов та підвищувати безпеку і стабільність роботи енергетичних систем.

РОЗДІЛ 3. ЗАСТОСУВАННЯ ВАКУУМНИХ ТА ЕЛЕГАЗОВИХ ВИМИКАЧІВ У МАЙБУТНЬОМУ

3.1. Перспективи використання вакуумних та елегазових вимикачів для напруги 110-220 кВ

Наразі вимикачі з вакуумними та елегазовими дугогасними пристроями (ДП) поступово витісняють масляні, електромагнітні та повітряні аналоги. Це зумовлено тим, що дугогасні камери вакуумних і елегазових вимикачів не потребують ремонту щонайменше протягом 20 років експлуатації. На відміну від них, у масляних вимикачах під час комутаційних процесів масло забруднюється частинками вільного вуглецю, а його ізоляційні властивості погіршуються через проникнення вологи та повітря. Унаслідок цього виникає необхідність заміни масла не рідше ніж один раз на чотири роки. Дугогасні пристрої повітряних вимикачів потребують періодичного очищення приблизно в ті самі терміни, що й масляні вимикачі. Крім того, у процесі експлуатації зношені повітряні вимикачі часто характеризуються витокami стисненого повітря з дугогасної системи, що унеможлиблює їхнє нормальне функціонування.

На відміну від них, дугогасні пристрої вакуумних та елегазових вимикачів розміщені в герметичних оболонках, завдяки чому їхня внутрішня ізоляція надійно захищена від впливу зовнішніх факторів. Електрична дуга, яка виникає під час комутацій у вакуумі або в елегазі, практично не впливає на властивості дугогасного та ізолювального середовища, забезпечуючи стабільність його параметрів упродовж тривалого часу.

Слід зазначити, що в елегазових вимикачах можливе незначне зниження тиску всередині дугогасної камери при суттєвих коливаннях температури навколишнього середовища, що потребує контролю для збереження оптимальних умов роботи обладнання. У разі зниження тиску елегазу нижче допустимого критичного рівня, який визначається окремо для кожного типу

дугогасної камери, з'являється ризик електричного пробоя ізоляційного проміжку або відмови вимикача під час виконання комутаційної операції.

Для запобігання подібним відмовам в елегазових вимикачах передбачено систему контролю робочого тиску в дугогасній камері за допомогою манометра, а також необхідність своєчасного поповнення об'єму елегазу до нормативного рівня. Водночас інтеграція таких вимикачів у цифрові підстанції суттєво підвищує витрати, оскільки вартість організації системи передавання даних про тиск елегазу може дорівнювати ціні самого вимикача. Натомість вакуумні вимикачі здатні надійно функціонувати в широкому температурному діапазоні: від +50 до -60 °C, без потреби у встановленні датчика контролю стану вакууму в дугогасній камері.

Вакуумні вимикачі відзначаються екологічною безпечністю, високою надійністю та значним комутаційним ресурсом, що дає змогу забезпечувати їхню стабільну роботу навіть за температур до -60 °C. У діапазоні напруги 6–35 кВ вони вже тривалий час упевнено заміщають елегазові аналоги та успішно експлуатуються понад п'ятнадцять років. Винятком залишаються лише закриті розподільні установки напругою 6 кВ на окремих АЕС і ТЕЦ, де, через поширені уявлення про можливі перенапруги під час роботи вакуумних вимикачів, усе ще застосовуються елегазові апарати, переважно імпортного виробництва — таких компаній, як Schneider Electric, ABB та Areva.

Історія розвитку ВДК для високовольтних вимикачів налічує вже багато десятиліть. Провідні країни світу — Німеччина, Франція, Велика Британія, США, Китай — активно здійснюють науково-дослідні роботи, спрямовані на створення вакуумних вимикачів, здатних ефективно працювати при високих напругах і великих струмах, що відключаються. Компанія Siemens розробила генераторні вакуумні вимикачі з номінальними струмами відключення до 80 кА. Досягнення пропускання таких великих струмів у цих пристроях забезпечується шляхом паралельного з'єднання кількох вакуумних дугогасних камер у кожному полюсі вимикача.

Найвагоміших результатів у розвитку вакуумних дугогасних камер досягнуто в Японії, що зумовлено як постійним зростанням споживання електроенергії, так і міркуваннями національної енергетичної безпеки. Завдяки інтенсивним дослідженням та технологічним розробкам на внутрішньому ринку Японії з'явилися ВДК, розраховані на напругу 126 кВ і 145 кВ (рис.3. 1), з довжиною 700 мм, діаметром 200 мм, контактами з мідно-хромового сплаву та аксіальним магнітним полем. Крім того, було створено порцелянову здвоєну вакуумну дугогасну камеру, розраховану на напругу 168 кВ.



Рисунок 3.1 - Вакуумна дугогасна камера на 145 кВ японської компанії
AE Power System Corporation

В енергосистемах Японії протягом останніх років успішно функціонують одно- та дворозривні вакуумні вимикачі, створені на основі вакуумних дугогасних камер, розрахованих на напругу 126–168 кВ. Ці апарати забезпечують роботу при номінальних струмах до 2000 А і здатні відключати струми до 40 кА. На рисунку 3.2 наведено приклади конструкцій таких вакуумних вимикачів.

Зараз в Японії одним із пріоритетних напрямів розвитку енергетичного обладнання є використання вакуумних дугогасних камер не лише в системах середньої напруги, а й у високовольтних розподільчих пристроях підстанцій. Така тенденція зумовлена унікальними властивостями ВДК, серед яких — висока комутаційна здатність, тривалий експлуатаційний ресурс, підвищена безпека та економічна ефективність.

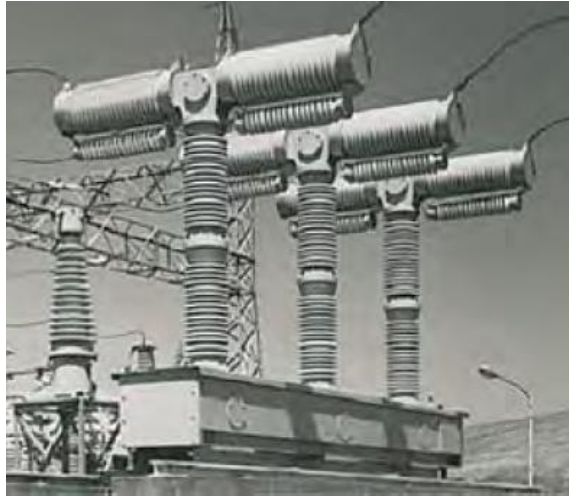


Рисунок 3.2 – Дворозрядний вакуумний вимикач VCB 168 кВ/31,5
КА/2000А

В Україні було успішно проведено випробування дослідних зразків вакуумних дугогасних камер типів КДВ-60-31,5/2000 та КДВ-126-40/3150, призначених для роботи на напругу 60 та 126 кВ змінного струму частотою 50 Гц. Ці камери розроблено для використання у складі одно розрядних вакуумних вимикачів класу напруги 110–220 кВ.

Зокрема, камера типу КДВА-60-31,5/2000 розрахована на номінальну напругу 60 кВ та частоту 50 Гц і призначена для дворозрядного вакуумного вимикача напругою 110 кВ (з максимальною робочою напругою 126 кВ), з номінальним струмом відключення 31,5 кА та номінальним струмом 2000 А.

Камеру наступного покоління КДВ-126-40/3150 планується використовувати для комплектування однорозрядного вакуумного вимикача напругою 110 кВ, 50 Гц, з номінальним струмом 3150 А та номінальним струмом відключення 40 кА. Крім того, у перспективі на її основі може бути створено вакуумний вимикач для роботи на напрузі 220 кВ [13].

Застосування вакуумних вимикачів напругою 110–220 кВ є особливо доцільним у комплектних підстанціях, що не обслуговуються, та трансформаторами струму та напруги, що не містять масла чи елегазу. Такі трансформатори, оснащені оптичними датчиками, широко використовуються в Північній Америці та Канаді, де питання екологічної безпеки обладнання є пріоритетним. Оптичні трансформатори струму та напруги легко інтегруються

у системи цифрових підстанцій, оскільки забезпечують на виході цифрові сигнали.

У високовольтних електричних мережах напругою 110–220 кВ використання вакуумних вимикачів є вкрай обґрунтованим. Вони забезпечують стабільну та надійну експлуатацію обладнання, значно спрощують проведення ремонтних і обслуговуючих робіт, а також відзначаються тривалим комутаційним ресурсом, що підвищує ефективність та довговічність роботи енергетичних систем.

Перспективне застосування вакуумних та елегазових вимикачів сприяє підвищенню надійності, безпеки та стабільності роботи електричних мереж, а також дозволяє зменшити обсяг технічного обслуговування і продовжити комутаційний ресурс обладнання. Вакуумні вимикачі доцільні в середньо- та високовольтних мережах завдяки екологічній безпеці, стійкості до низьких температур та простоті інтеграції з цифровими системами. Елегазові вимикачі ефективні у високовольтних підстанціях, де важлива здатність до відключення і стабільність роботи під великими струмами. Оптимальний вибір між ними визначається класом напруги, специфікою навантажень, умовами експлуатації та вимогами до довговічності та екологічної безпеки.

3.2. Дослідження перенапруги при комутації вакуумних вимикачів

Ушкодження виникають внаслідок несприятливих явищ, що супроводжують комутаційні процеси вимикачів: перенапруги, що спричинені струмами зрізу; ескалації перенапруги у циклі високочастотних (ВЧ) повторних пробіїв; перенапруги при включенні та у циклі ВЧ зустрічних пробіїв; перенапруги, що зумовлені віртуальними струмами зрізу; а також ВЧ кидки струму високої амплітуди.

Перераховані процеси характерні лише для вимикачів із жорсткими дугогасними середовищами, до яких належить вакуум. Значні кратності перенапруги становлять особливу небезпеку для електричних машин, рівень ізоляції яких складає приблизно 2,8 U_{фм}. Крім того, високочастотні

компоненти перехідних процесів при комутаціях вакуумних вимикачів створюють серйозну загрозу для ізоляції витків високовольтного обладнання, кабельних муфт та кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену.

На сьогодні повністю вирішити проблему високочастотної перенапруги при комутації вакуумних вимикачів не вдалося ні зарубіжним, ні вітчизняним виробникам комутаційних апаратів [14].

За результатами досліджень [14], активне впровадження вакуумних вимикачів у мережах 6–10 кВ, наприклад, на гірничо-металургійних підприємствах призвело до зростання кількості однофазних замикань на землю (ОЗЗ), викликаних комутаційною перенапругою. Зокрема, зазначено, що протягом шести років експлуатації ВР (2012–2022 рр.) кількість аварійних відключень, пов'язаних із ними, зросла в середньому в 3,8 рази.

При комутаційних процесах у вимикачах найбільш критичними з точки зору комутаційної перенапруги є механічні та електричні перехідні процеси, що протікають у мікро секундному діапазоні при відстанях між контактами до 2 мм. На перебіг механічних перехідних процесів істотно впливає якість роботи приводу: наявність або відсутність люфтів, відсутність брязкоту, швидкість і водночас плавність руху, а також синхронність та лінійність переміщення полюсів вимикача. Механічні процеси, у поєднанні з характеристиками ВДК, безпосередньо впливають на електричні перехідні процеси, визначаючи особливості високочастотних явищ під час комутацій та їхню потенційну небезпеку. Отже, механічні та електричні перехідні процеси слід розглядати як єдиний комплекс, взаємозалежний і взаємопов'язаний.

У сучасній електроенергетиці найбільш зношеним обладнанням на підстанціях є вимикачі, частка яких у структурі комутаційного обладнання перевищує 20 % [12]. Тому одним із пріоритетних напрямів модернізації є заміна застарілих комутаційних апаратів. На зміну масляним вимикачам у середньому класі напруги все частіше приходять вакуумні та елегазові вимикачі.

За оцінками деяких виробників, вакуумні вимикачі не потребують регулярних перевірок. Проте практичний досвід їх експлуатації свідчить про інше.

Також необхідно розробити відповідну методику, яка доповнюватиме раніше використані методики оцінки характеристик вимикачів із дугогасними середовищами та включатиме нові розділи, спрямовані на оцінку параметрів, характерних саме для вакуумних вимикачів. При цьому слід здійснювати оцінку характеристик вакуумних дугогасних камер як окремо, так і в складі вимикача.

Для отримання більш повної та наочної інформації доцільно осцилографувати перехідні процеси під час комутацій у вакуумних вимикачах. Для цього необхідно створити спеціальний стенд, який дозволяє комутувати задане навантаження та реєструвати перехідні процеси в різних точках схеми. Це дасть змогу вимірювати струм зрізу, величину перенапруги у різних вузлах, тривалість зустрічних пробойів, швидкість наростання пробивної напруги та електричну міцність на відстанях до 2 мм.

Електрична міцність вакуумних дугогасних камер на малих зазорах між контактами до 2 мм. У вакуумі залежність пробивної напруги від відстані між контактами є нелінійною, тому електрична міцність у зоні малих зазорів, де відбуваються ключові процеси під час комутацій, суттєво відрізняється від міцності при повністю розведених контактах. Передбачається визначати електричну міцність вакуумної дугогасної камери за даними осцилограм зустрічних пробойів під час включення, вимірюючи швидкість наростання пробивної напруги. Далі, з урахуванням швидкості руху контактів, обчислюється електрична міцність на малих зазорах до 2 мм.

Швидкість зміни пробивної напруги є важливою характеристикою, яка визначається як похідна електричної міцності на відстанях до 2 мм щодо швидкості руху контактів, і відображає динаміку процесів пробоем у вакуумі. Швидкість зміни пробивної напруги може бути визначена за допомогою осцилограм, отриманих під час комутацій вакуумних вимикачів.

Тривалість зустрічних пробойів є характеристикою, що залежить від швидкості наростання пробивної напруги і також може бути оцінена на основі осцилограм, зафіксованих під час випробувань на стенді.

Струм зрізу. Сучасні вакуумні вимикачі обладнані контактами з новітніх матеріалів, переважно зі сплавів міді та хрому у різних пропорціях. У вимикачах, оснащених такими вакуумними дугогасними камерами, спостерігаються незначні струми зрізу, що, відповідно, не спричиняє значної перенапруги, безпосередньо зумовленої цими струмами. Струм зрізу є одним із факторів, що спричиняє ескалацію перенапруги, тому важливо прагнути до його мінімізації. Величина струму зрізу значною мірою залежить від матеріалу контактів.

Оцінку струму зрізу слід проводити на випробувальному стенді за допомогою осцилографа, фіксуючи одночасно струм через вимикач та перенапруги з боку навантаження. Основним вихідним параметром при цьому є амплітуда діючого струму.

Рівень вакууму. Одним із ключових факторів, що впливають на електричну міцність вакуумних дугогасних камер, є тиск у ВДК. Рівень вакууму оцінюється за величиною іонного струму.

Електрична міцність ВДК при розведених контактах, вимірювана в кВ/мм, зменшено залежить від стану контактів, тоді як вплив рівня вакууму на міцність значно зростає. Неодночасність замикання або розмикання полюсів під час увімкнення чи вимкнення.

Під час комутації, якщо полюси замикаються або розмикаються неодноразово, виникає короткочасний неповнофазний режим, у якому можуть з'являтися перенапруги високої кратності. Зі збільшенням розбіжності у часі замикання або розмикання контактів амплітуда перенапруги зростає.

Швидкість руху контактів. Одним із ключових параметрів вакуумних дугогасних камер є швидкість руху їхніх контактів. Разом із електричною міцністю ВДК вона визначає швидкість зміни пробивної напруги, що, у свою чергу, впливає на тривалість зустрічних пробойів під час включення та

повторних пробів при відключенні, коли час між початком розходження контактів і моментом проходження струму відключення промислової частоти через нуль невеликий. Зі збільшенням швидкості руху контактів скорочується тривалість дії високочастотної перенапруги та знижується ймовірність ескалації перенапруги.

Характеристики брязкоту. За відсутності належного демпфуючого ефекту під час змикання контактів можливе їх відскакування. У результаті цього відбувається короткочасний обрив струму дуги, що супроводжується виникненням одиничних або багаторазових високочастотних повторних пробів. Характеристики брязкоту належать до механічних параметрів і можуть визначатися за допомогою приладу ПКВ, зокрема під час проведення планових випробувань комутаційного обладнання.

Перехідний опір контактів у ВДК. Контроль перехідного опору контактів у ВДК має важливе значення не лише як показник технічного стану контактної пари, а й через його безпосередній вплив на подальшу зміну цього стану під час експлуатації. Підвищене значення перехідного опору призводить до ускладнення теплового режиму контактів, що стикаються, та сприяє інтенсифікації дифузійних процесів у металі під дією зусилля пружини притискання. Унаслідок цього може виникати ефект «холодного зварювання» контактів, який ускладнює процес їх розмикання та призводить до деградації поверхонь під час комутаційних операцій вимикача.

Особливістю проведених випробувань на ТЭЦ є осцилографування перехідних процесів при комутаціях вимикачів на те саме навантаження. У процесі комутаційних операцій проводилося осцилографування напруги на шинах секції КРП-6 кВ, напруги на початку кабельної лінії (КЛ) — безпосередньо за вимикачем, а також напруги через обмежувачі перенапруги (ОПН), та у кінці КЛ, поблизу електродвигуна. Вимірювальні схеми наведено на рисунку 3.3. Характерні осцилограми перехідних процесів подано на рисунках 3.4 - 3.6, а на рисунку 3.7 представлено залежність тривалості зустрічних пробів від швидкості зниження пробивної напруги.

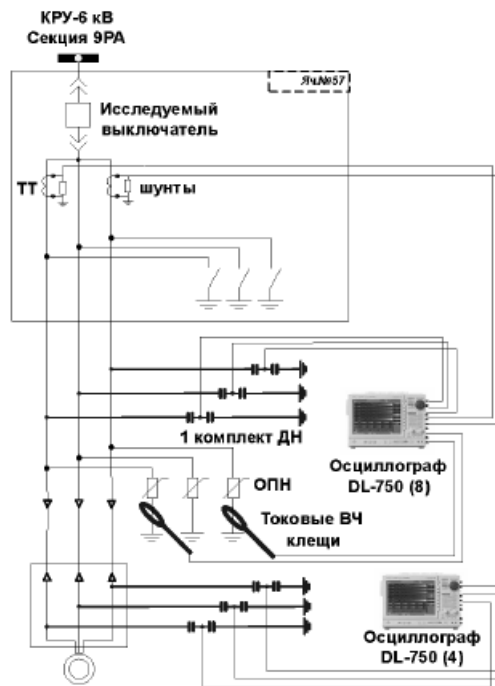


Рисунок 3.3 - Схема підключення вимірювального обладнання для дослідження перехідних процесів при комутаціях електродвигунів ШМ-9Б комір: КРУ-6 кВ з підключеними ОПН

Під час комутаційних процесів зафіксовано, що кратність перенапруги на початку КЛ не перевищує $2,0U_{фм}$, тобто залишається нижчою за граничне значення, яке може ефективно обмежувати ОПН. Це свідчить про відсутність доцільності встановлення ОПН безпосередньо за вимикачем, оскільки його робота у цій точці не забезпечує додаткового захисту від перенапруги.

Натомість у кінці кабельної лінії, в безпосередній близькості до електродвигуна, амплітуда перенапруги є значно більшою. Це зумовлено дією хвильових процесів, що виникають у системі «ємність кабелю – індуктивність двигуна». Такі процеси спричиняють відбиття та накладання хвиль напруги, внаслідок чого локальні значення перенапруги перевищують рівень, який здатен обмежити ОПН.

З огляду на це, найбільш ефективним рішенням є розміщення апаратів типу ОПН у кінці кабельної лінії — безпосередньо біля електротехнічного обладнання, що потребує захисту. Такий підхід мінімізує вплив хвильових

явищ і забезпечує більш надійну роботу системи під час комутаційних режимів.

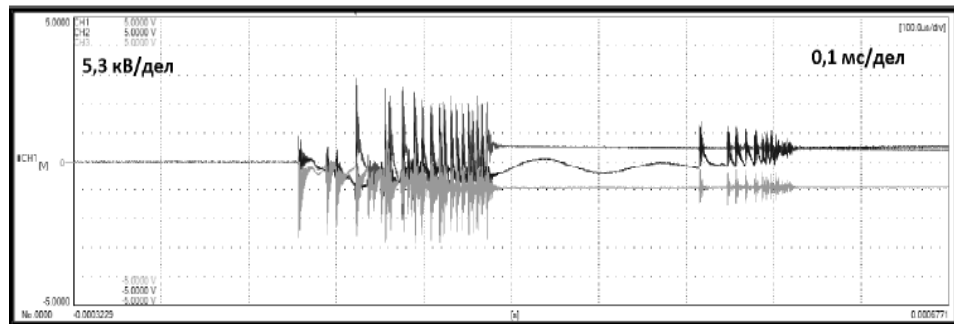


Рисунок 3.4 - Характерна осцилограма фазної напруги на фідері ШМ-9Б в кінці КЛ безпосередньо у двигуна при включенні ВВ/TEL-10-20/1000

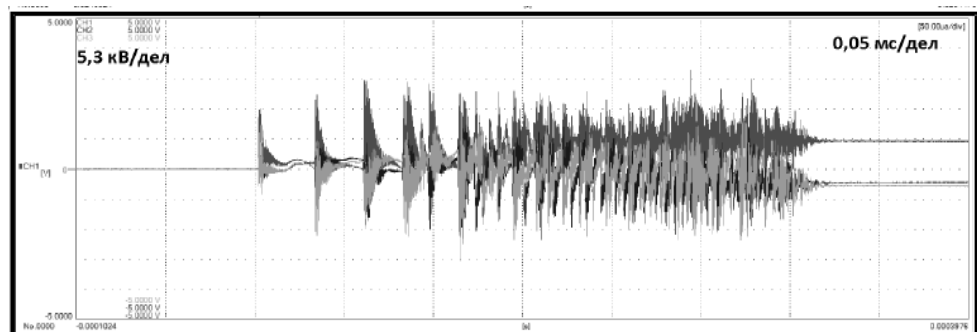


Рисунок 3.5 - Характерні осцилограми фазної напруги на фідері ШМ-9Б в кінці КЛ безпосередньо у двигуна при включення ВВП-10-20/630

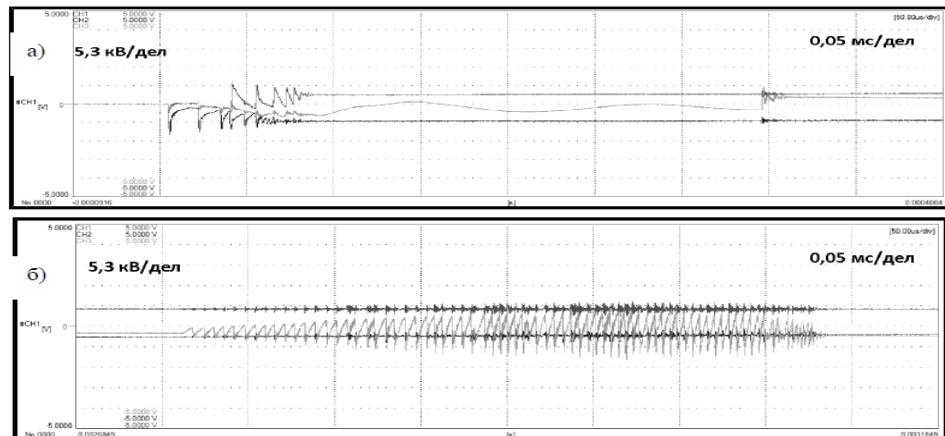


Рисунок 3.6 - Характерні осцилограми фазної напруги на фідері ШМ-9Б в кінці КЛ безпосередньо у двигуна при: а) зустрічні пробой під час зближення контактів; б) множинні пробой в час відскоку контакту

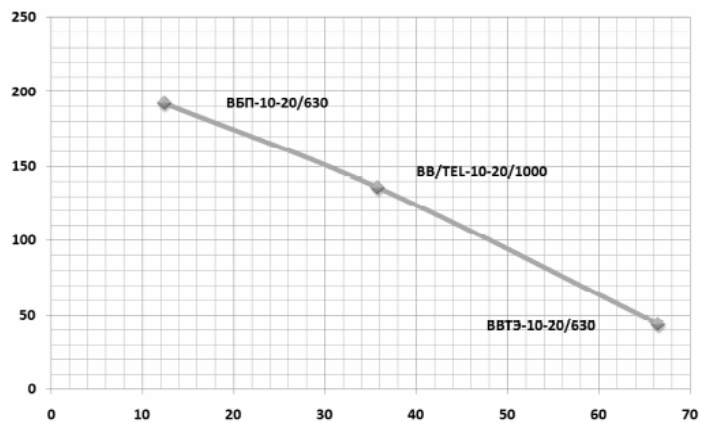


Рисунок 3.7 - Залежність тривалості зустрічних пробивів від швидкості падіння пробивної напруги

Найбільше значення неодночасності під час замикання спостерігається у вимикача ВВ/TEL-10-20/1000, що, ймовірно, пов'язано з відсутністю механічного зв'язку між його полюсами — кожен полюс приводиться в дію окремим електромагнітом.

Для вимикача ВМП-10-20/600 максимальна неодночасність замикання перевищує 1 мс, що, вірогідно, зумовлено тривалим строком його експлуатації (понад 40 років). Саме зношеність механізмів і погіршення характеристик рухомих частин спричиняють не лише збільшення неодночасності замикання, а й підвищення рівня брязкоту контактів під час роботи вимикача.

Під час відключення спостерігаються перенапруги, що перевищують 1,9Уфм, що зумовлено малими значеннями струмів зрізу. У сучасних вакуумних вимикачах завдяки використанню спеціально підібраних контактних матеріалів величина струму зрізу, як правило, не перевищує 3,5–5 А. Такі низькі значення струму зрізу самі по собі не є причиною виникнення перенапруги значної кратності, проте вони сприяють умовам, за яких можливе формування високочастотних коливань у колі, що, у свою чергу, може впливати на амплітуду комутаційної перенапруги.

Оскільки під час зрізу струму спостерігається підвищення напруги, цей параметр слід розглядати як один із ключових факторів, що визначають імовірність розвитку ескалації перенапруги під час відключення.

Проведений аналіз показує, що перехідні процеси під час комутацій у вакуумних вимикачах значною мірою залежать від механічних та електричних характеристик апарата, зокрема від швидкості руху контактів, неодночасності їх замикання, рівня брязкоту, а також величини струму зрізу.

Встановлено, що під час відключення можуть виникати перенапруги понад $1,9U_{фм}$, причиною яких є низькі значення струмів зрізу. Хоча сучасні вимикачі завдяки вдосконаленим контактним матеріалам обмежують цей струм до 3,5–5 А, навіть такі незначні величини здатні спричиняти короточасні високочастотні коливання, що впливають на рівень комутаційної перенапруги.

Важливу роль у формуванні цих явищ відіграє також неодночасність спрацьовування полюсів і знос механічних елементів, що підвищує ймовірність деградації контактів і погіршення параметрів вимикача.

Таким чином, для забезпечення стабільної та безпечної роботи вакуумних вимикачів необхідно: контролювати величину струму зрізу та прагнути її зменшення без зниження здатності апарата до відключення; підтримувати механічну синхронність дії полюсів і мінімізувати брязкіт контактів; здійснювати регулярну діагностику технічного стану вимикачів, особливо після тривалого терміну експлуатації.

Реалізація цих заходів дозволить зменшити ризик ескалації перенапруги під час комутацій і підвищити надійність роботи електричних мереж.

3.3. Дослідження впливу параметрів елегазових вимикачів на величину комутаційної перенапруги

Основною причиною пошкодження елегазових вимикачів є електричний пробій ізоляції в зоні днища елегазової камери. У свою чергу, для кінцевих муфт найтиповішою причиною відмови є пробій ізоляції однієї з фаз, що призводить до ОЗЗ.

Щодо перетворювальних трансформаторів, то їхні відмови, як правило, пов'язані з порушенням цілісності ізоляції обмоток високої напруги, що

виникає внаслідок дії перенапруги під час комутаційних або аварійних процесів. Виходячи з наведеного вище, метою даного дослідження є визначення ступеня впливу робочих струмів елегазових вимикачів на рівень перенапруги, що виникає під час комутації, наприклад, перетворювальних трансформаторів [14,15].

Під час використання вакуумних та елегазових вимикачів для підключення силових трансформаторів основним джерелом комутаційних перенапруг є ефект зрізу струму в момент відключення трансформатора. Це явище проявляється переважно тоді, коли трансформатор працює в режимі холостого ходу або за умов низьких навантажень, що становлять лише 10–15% від його номінального струму. У таких режимах енергія, накопичена в магнітному полі трансформатора, не встигає розсіятися природним шляхом, що призводить до різкого підвищення напруги в колі й утворення комутаційної перенапруги.

Під час комутаційних процесів у колі виникають високочастотні складові струму, які замикаються через міжфазні ємності кабельних ліній та елементів електрообладнання. Внаслідок цього може відбуватися накладання високочастотних компонент у протифазі на основну гармоніку струму. Така взаємодія призводить до спотворення форми струму — у точці накладання спостерігається переривання кривої струму, що за своєю природою нагадує ефект зрізу струму, характерний для комутацій у вакуумних і елегазових вимикачах.

Рівень перенапруги оцінювався за допомогою коефіцієнта кратності перенапруги, який становить:

$$K_{\text{КП}} = \frac{u(t)}{u_{\text{н}}},$$

де: $u(t)$ - максимальна миттєва напруга в момент часу t , В; $u_{\text{н}}$ - номінальна амплітуда напруги мережі, В.

У свою чергу:

$$u(t) = i_0 \sqrt{\frac{L}{C}},$$

де: i_0 - реальний або віртуальний струм в момент зрізу, А; L - індуктивність трансформатора, Гн; C - ємність обмоток фаза-корпус трансформатора Φ .

На рис. 3.8 представлені закономірності зміни коефіцієнта кратності комутаційної перенапруги у залежності від потужності та типу вимикача [16].

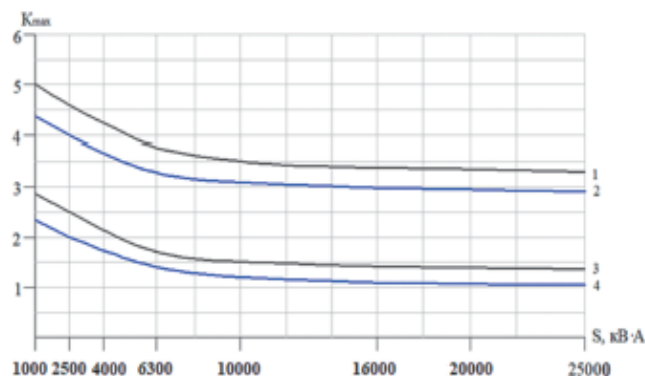


Рисунок 3.8 - Залежність Кп від потужності трансформатора та типу вимикача: 1 – вакуумний; 2 – елегазовий; 3 – масляний; 4 – електромагнітний

Аналіз кривих, поданих на рисунку 3.8, свідчить, що коефіцієнт кратності комутаційної перенапруги під час увімкнення силових трансформаторів визначається як типом вимикача, так і потужністю самого трансформатора. При цьому встановлено, що вакуумні вимикачі створюють найвищі значення перенапруги, порівняно з іншими типами комутаційних апаратів. Це пояснюється особливостями процесу гасіння дуги та характером зрізу струму у вакуумному проміжку, який сприяє утворенню короткочасних високочастотних коливань напруги.

Із підвищенням струму навантаження силових трансформаторів рівень комутаційної перенапруги поступово зменшується. Це пояснюється тим, що при більших струмах тривалість горіння дуги між контактами вимикача збільшується, внаслідок чого зменшується ефект зрізу струму. Такий процес

пов'язаний із посиленою іонізацією проміжку між контактами та збільшенням кількості парів металу, що підвищує електропровідність середовища. У результаті цього зростає кут комутації, а комутаційний процес відбувається більш плавно, з меншою перенапругою. Цей процес відображено на рис. 3.9.

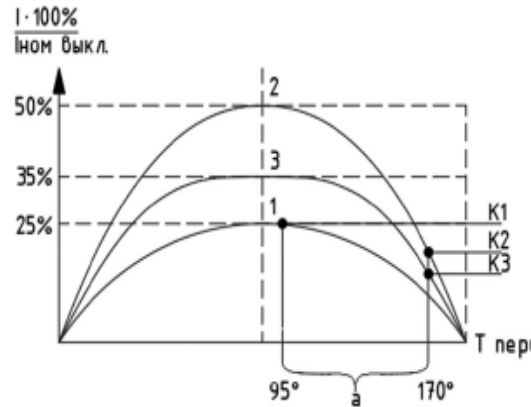


Рисунок 3.9 - Залежність струму навантаження вимикача від кута комутації, що призводить до різної кратності комутаційної перенапруги на секції шин

Синусоїдальні криві 1, 2 та 3 відповідають режимам роботи трансформатора при струмах навантаження, що становлять 25%, 35% і 50% від його номінального значення. У випадку навантаження 25% кут відключення дорівнює приблизно 90–95°, що свідчить про те, що зріз струму у цьому режимі відповідає коефіцієнту перенапруги K_1 .

Для навантажень 35% і 50% кут відключення зростає до 170–180°, тому відповідні режими характеризуються коефіцієнтами перенапруги K_2 і K_3 . Як показано на рис. 3.9, значення коефіцієнта K_1 є найбільшим серед наведених, перевищуючи K_2 та K_3 .

Збільшення кута відключення до діапазону 170–180° пояснюється посиленою іонізацією міжконтактного проміжку вимикача та утворенням металевих парів, що виникають унаслідок інтенсивнішого горіння електричної дуги. Це призводить до підвищення електропровідності середовища й більш плавного згасання струму.

Експлуатаційна практика перетворювальних трансформаторів свідчить [13], що відключення таких трансформаторів при струмах навантаження в межах 15–30% від номінального струму елегазового вимикача суттєво підвищує ризик відмов обладнання. Зокрема, частота пошкоджень кабельних муфт, елегазових вимикачів та самих перетворювальних трансформаторів у таких умовах зростає приблизно у п'ять разів протягом одного року експлуатації.

Схему підключення апаратури, призначеної для вимірювання комутаційної перенапруги, наведено на рис.3.10. Дільник напруги при цьому під'єднувався до вводу перетворювального трансформатора, що забезпечувало реєстрацію напруги безпосередньо в зоні її виникнення.

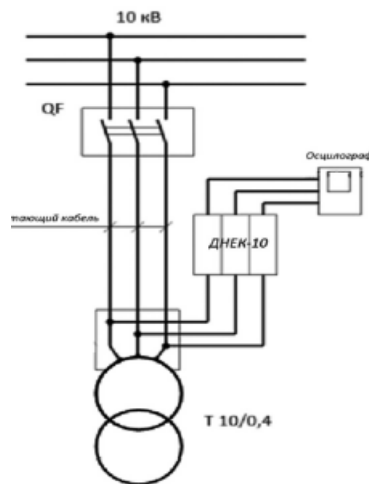


Рисунок 3.10 - Схема підключення апаратури для вимірювання комутаційної перенапруги

Типові осцилограми комутаційних перенапруг, що виникають під час увімкнення перетворювального трансформатора в режимі холостого ходу, наведено на рис.3.11.

Найбільші значення комутаційних перенапруг спостерігаються під час увімкнення перетворювального трансформатора, коли струм навантаження перебуває в діапазоні 18,5–27,8% від номінального. У цьому випадку коефіцієнт кратності перенапруги може досягати значення 3,0.

Під час відключення трансформатора максимальна кратність перенапруги є меншою і не перевищує 2, що свідчить про меншу інтенсивність перехідних процесів у цьому режимі.

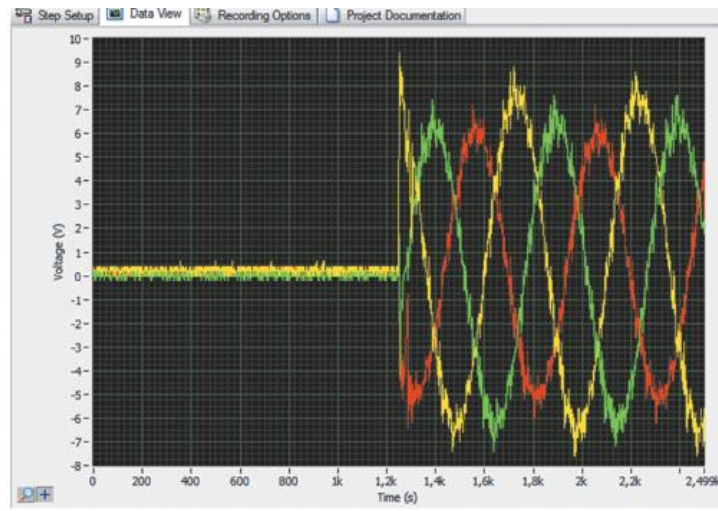


Рисунок 3.11 - Характерна осцилограма напруги при включенні перетворювального трансформатора в режимі холостого ходу

Необхідність застосування елегазових вимикачів з номінальними струмами 2000 А і більше для комутації перетворювальних трансформаторів зростає зі збільшенням робочих струмів навантаження. При цьому коефіцієнт навантаження може підвищуватися до 28%, що, у свою чергу, спричиняє зростання кратності комутаційних перенапруг. Однак подальше збільшення струму навантаження супроводжується різким зниженням рівня цих перенапруг, оскільки процес комутації відбувається за більш стабільних умов і з менш вираженим ефектом зрізу струму (рис.3.12).

Результати натурних досліджень показали, що під час комутації перетворювальних трансформаторів можуть виникати перенапруги з кратністю до 3,0. Такі значення становлять потенційну небезпеку для ізоляції обмоток трансформаторів, кабельних муфт та елегазових вимикачів, оскільки, за даними Schneider Electric, імпульсна електрична міцність елегазової камери обмежується рівнем 30 кВ, що може бути перевищено у разі розвитку комутаційних перенапруг високої кратності.

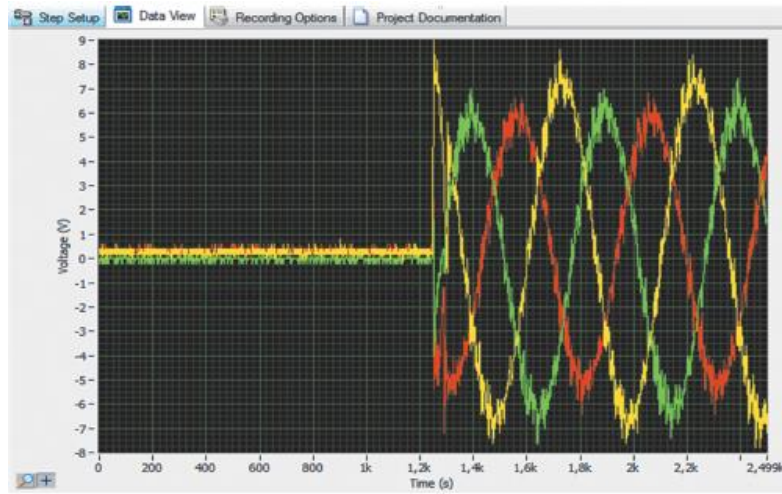


Рисунок 3.11 - Характерна осцилограма напруги при включенні перетворювального трансформатора під навантаженням

В даний час для зниження комутаційних перенапруг активно застосовуються нелінійні обмежувачі перенапруги (ОПН) та активно-ємнісні RC-гасники (рис.3.12).

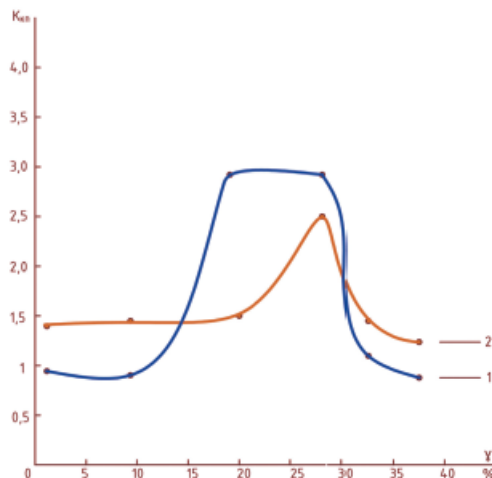


Рисунок 3.12 – Залежність $K_{кп} = f(\gamma)$: 1 - включення; 2 – відключення

Із підвищенням відключаючої здатності комутаційних апаратів одночасно зростає й їхній номінальний струм. Внаслідок цього реальні робочі струми вимикачів зазвичай становлять не більше 40% від номінального значення ($\gamma \leq 40\%$) [16], тобто апарати часто працюють у режимах, далеких від повного навантаження.

Проведені дослідження засвідчили, що зі збільшенням робочого струму елегазового вимикача LF2 до рівня, який трохи перевищує 27,8% від його номінального значення (параметр γ), спостерігається зростання кратності комутаційних перенапруг до 3,0.

У разі, коли $\gamma \leq 27,8\%$, кут комутації в елегазових камерах вимикача LF2 майже не змінюється, що зумовлює збільшення зрізу струму. Це, своєю чергою, призводить до підвищення рівня комутаційної перенапруги і потенційного погіршення електричної стійкості ізоляції вимикача.

Подальше підвищення робочих струмів елегазових вимикачів понад 27,8% від номінального значення супроводжується помітним зменшенням кратності комутаційної перенапруги. Це зниження пояснюється ослабленням ефекту зрізу струму, який відбувається внаслідок збільшення тривалості горіння дуги та підвищення її енергії, що забезпечує більш плавне розсіювання накопиченої енергії в колі під час відключення. Внаслідок цього відбувається активна іонізація міжконтактного проміжку та утворення металевих парів, що сприяє збільшенню кута комутації.

Виміряна кратність комутаційних перенапруг, що досягає 3,0, створює потенційну загрозу для ізоляції обмоток трансформатора, кабельних ліній та елегазових вимикачів. Такий рівень перенапруги потребує застосування ефективних засобів захисту, здатних забезпечити надійне обмеження напруги та запобігти пошкодженню обладнання.

Використання РС-гасників дозволяє ефективно запобігати виникненню перенапруги, небезпечної для ізоляції, під час комутації перетворювальних трансформаторів, забезпечуючи стабільність роботи обладнання та підвищення його експлуатаційної надійності.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3:

Перспективне застосування вакуумних та елегазових вимикачів сприяє підвищенню надійності, безпеки та стабільності роботи електричних мереж, а також дозволяє зменшити обсяг технічного обслуговування і продовжити комутаційний ресурс обладнання. Вакуумні вимикачі доцільні в середньо- та високовольтних мережах завдяки екологічній безпеці, стійкості до низьких температур та простоті інтеграції з цифровими системами. Елегазові вимикачі ефективні у високовольтних підстанціях, де важлива здатність до відключення і стабільність роботи під великими струмами. Оптимальний вибір між ними визначається класом напруги, специфікою навантажень, умовами експлуатації та вимогами до довговічності та екологічної безпеки.

Для забезпечення стабільної та безпечної роботи вакуумних вимикачів необхідно: контролювати величину струму зрізу та прагнути її зменшення без зниження здатності апарата до відключення; підтримувати механічну синхронність дії полюсів і мінімізувати брязкіт контактів; здійснювати регулярну діагностику технічного стану вимикачів, особливо після тривалого терміну експлуатації.

Відзначено, що виміряна кратність комутаційної перенапруги, що досягає 3,0, створює потенційну загрозу для ізоляції обмоток трансформатора, кабельних ліній та елегазових вимикачів. Такий рівень перенапруги потребує застосування ефективних засобів захисту, здатних забезпечити надійне обмеження напруги та запобігти пошкодженню обладнання.

Використання RC-гасників дозволяє ефективно запобігати виникненню перенапруги, небезпечної для ізоляції, під час комутації перетворювальних трансформаторів, забезпечуючи стабільність роботи обладнання та підвищення його експлуатаційної надійності

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ:

Вивчення особливостей роботи та експлуатації сучасних вакуумних і елегазових вимикачів показує, що ці типи обладнання характеризуються високим ступенем надійності, компактністю та здатністю ефективно працювати у високовольтних мережах різного призначення. Вакуумні вимикачі відзначаються швидким гасінням електричної дуги у герметичному вакуумному середовищі, що дозволяє зменшити зношення контактів та забезпечує довготривалий ресурс роботи.

Елегазові вимикачі, у свою чергу, забезпечують стабільну роботу при великих номінальних струмах та напругах, завдяки високій діелектричній міцності SF₆, який використовується як ізолююче та дугогасне середовище. Особливості конструкції та ізоляції цих пристроїв визначають специфічні вимоги до їхнього обслуговування, технічного контролю та діагностики, оскільки навіть незначні дефекти ізоляції можуть призвести до часткових розрядів або аварійних режимів.

Аналіз результатів комутаційних випробувань вакуумного вимикача свідчить про те, що його робочі характеристики, зокрема здатність надійно здійснювати включення та відключення електричних ланцюгів, значною мірою залежать від конструктивних особливостей контактів та їх матеріалів. Під час випробувань виявлено, що формування вторинного перехідного шару на контактній поверхні та процеси локального оплавлення безпосередньо впливають на теплове навантаження контактів, а також на комутаційний ресурс вимикача.

Дослідження часу експлуатації елегазового обладнання показують, що тривалість його роботи суттєво не впливає на надійність, якщо дотримуються правила технічної експлуатації та належного обслуговування. Основними причинами відмов є механічні дефекти, помилки персоналу, несправності в електричних ланцюгах управління, а також перевантаження понад номінальні параметри. Важливим є врахування герметичності обладнання, стану

уцільнень та якісних характеристик матеріалів, що забезпечує стабільність ізоляційних властивостей і попереджає утворення коронних розрядів.

Загалом, узагальнення даних комутаційних та ресурсних випробувань вакуумних вимикачів та елегазового обладнання підтверджує, що надійність роботи сучасних високовольтних комутаційних пристроїв визначається поєднанням високоякісних конструкційних матеріалів, точності виготовлення, правильного підбору геометрії контактів, дотримання експлуатаційних норм і регулярного технічного обслуговування. Такий комплексний підхід дозволяє ефективно прогнозувати ресурс обладнання, зменшувати частоту відмов та підвищувати безпеку і стабільність роботи енергетичних систем.

Перспективне використання вакуумних та елегазових вимикачів забезпечує підвищення надійності, безпеки та стабільності функціонування електричних мереж, одночасно зменшуючи потребу в технічному обслуговуванні та подовжуючи комутаційний ресурс електрообладнання.

Вакуумні вимикачі є доцільними для застосування в середньо- та високовольтних мережах, оскільки характеризуються екологічною безпечністю, високою стійкістю до низьких температур і сумісністю з цифровими системами керування.

Елегазові вимикачі, своєю чергою, виявляють високу ефективність у роботі в умовах великих струмів і високої напруги, що робить їх оптимальними для використання на розподільних пристроях високої напруги, де особливо важлива стабільність і надійність комутаційних процесів.

Вибір між вакуумними та елегазовими вимикачами має базуватися на класі напруги мережі, характері навантаження, умовах експлуатації, а також на вимогах до довговічності, надійності та екологічної безпеки.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. David Helštýn, Petr Kačor, Zdeněk Hytka Elektrické přístroje spínací ochranné a jisticí. Vysoká škola báňská. Technická univerzita Ostrava Fakulta elektrotechniky a informatiky, Ostrava 2013. С 165 – 175.
2. Garzon D.R. High Voltage Circuit Breakers: Design and Applications. New York, Basel: Marcel Dekker, Inc, 2022. 425 p.
3. Arc Behaviors in Vacuum Interrupters with Axial Magnetic Fields Electrodes. W. Zhongyi, Z. Yuesheng, L. Zhiyuan, C. Shaoyog. Plasma science and technology. 2017. V. 5. № 5. P. 570–574.
4. Agarwal M.S., Goswami P.K. Study of Highcurrent Vacuum Arcs in Axial Magnetic Fields International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). Mumbai, 2024. P. 157–160.
5. Slade P. G. The Vacuum Interrupter. Theory, Design und Application. P.G. Slade. CPC Press. 2018. 510 p.
6. Романченко Ю.А. Порівняльний аналіз високовольтних вимикачів різних типів. Вісник східноукраїнського національного університету імені В. Даля, №2(272). С. 116-119.
7. Рубаненко О.Є., Лесько В.О., Поліщук А.В. Особливості експлуатації високовольтних електричних вимикачів. Вісник Вінницького політехнічного університету. 2021. №6. С. 82-87.
8. Дідушок О.В. Мікропроцесорний пристрій для діагностування електромагнітного приводу вакуумного вимикача. Вісник ВПУ, №6, 2019. С.31-36.
9. Сопель М.Ф., Панов А.В., Паньків В.І. Нормативне забезпечення моніторингу високовольтних вимикачів електроенергетичних систем. Технічна електродинаміка. 2018. Вип. 49. С. 17-27.
10. Рубаненко О.С., Мисенко С.В. Координація впровадження та забезпечення надійності елегазових вимикачів в умовах експлуатації. Вісник Хмельницького національного університету: технічні науки. №1, 2016. С. 135-139.

11. Онищук О.О. Дослідження перенапруги при комутації вакуумних вимикачів. Вісник ВНТУ, №3, 2020.

12. Ashraf N., Abbas G., Abbassi R., Jerbi H. Power quality analysis of the output voltage of AC voltage and frequency controllers realized with various voltage control techniques. Applied Sciences (Switzerland). 2021. Vol. 11. Iss. 2. <https://doi.org/10.3390/app11020538>

13. Dutta N., Kaliannan P., Subramaniam U. Experimental analysis of PQ parameter estimation of VFD drives. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2020. Vol. 937. Iss. 2. P. 012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/937/1/012042>

14. Jyothi R., Sumitgupta, Rao K.U., Jayapal R. IoT application for real-time condition monitoring of voltage source inverter driven induction motor. Innovative Data Communication Technologies and Application. 2021. Vol. 59. P. 97–105. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-9651-3>

15. Guo Yaxun, Jiang Xiaofeng, Chen Yun, Zheng Ming, Liu Gang, Li Xiaohua, Tang Wenhui. Reignition overvoltages induced by vacuum circuit breakers and its suppression in offshore wind farms. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2020. Vol. 122. P. 106227. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106227>.

16. Fritz N., Engelmann G., De Doncker R.W. RC snubber design procedure for enhanced oscillation damping in wide-bandgap switching cells. 21st European Conference on Power Electronics and Applications. 2019. <https://doi.org/10.23919/EPE.2019.8915541>.