

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

Аналіз сучасного електричного електрообладнання енергосистем та
особливостей його експлуатації
(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2м курсу, групи ДЕА-Е23мг
спеціальності: 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____/ Олександр СІВЕРЧУК
(підпис) (ім'я та прізвище)

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

Рецензент _____/ Антон СКОРКІН
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

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

Нормоконтроль _____/ Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я та прізвище)

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

Харків – 2024 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)

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

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

здобувачу вищої освіти Олександр СІВЕРЧУКУ

1. Тема «Аналіз сучасного елегазового електрообладнання енергосистем та особливостей його експлуатації»

затверджена наказом по університету № 4801-5/3345 від « 12 » 10 2024 р.

2. Термін здачі закінченої роботи « 10 » 12 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи/проекту: параметри, режими роботи високовольтного електрообладнання енергоустановок; рівні напруги мереж; особливості схем електричних з'єднань розподільних пристроїв

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

ВСТУП; РОЗДІЛ 1.ТИПИ ВИСОКОВОЛЬТНИХ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ, ВСТАНОВЛЕНИХ НА РП НАПРУГОЮ 6-110 КВ; РОЗДІЛ 2.ЕЛЕГАЗОВІ ТА ВАКУУМНІ ВИМИКАЧІ В СУЧАСНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ; РОЗДІЛ 3. РОЗПОДІЛЬНІ ПРИСТРОЇ З ЕЛЕГАЗОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ РОЗВИТКУ; ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

5.Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

6. Консультант:

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

7. Дата видачі завдання «_12_» _____ 10 _____ 2024_ р.

Керівник

(підпис)

Ірина ПАНТЕЛЄЄВА

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

_____ Олександр СІВЕРЧУК

(підпис)

(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	02.10.24 – 05.10.24	
2	Проведення аналізу наукової літератури	06.10.24 – 15.10.24	
3	Виконання першого розділу дипломної роботи	16.10.24 – 29.10.24	
4	Виконання другого та третього розділу дипломної роботи	30.10.24 – 26.11.24	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.24 – 07.12.24	

Студент (ка)

(підпис)

Олександр СІВЕРЧУК

(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль

(підпис)

Юлія ОЛІЙНИК

(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

до магістерської роботи з теми «Аналіз сучасного елегазового електрообладнання енергосистем та особливостей його експлуатації» магістрантом
Олександром СІВЕРЧУКОМ

Магістерська робота виконана на ____ сторінок, містить ____ таблиць, ____
рисуноків, що характеризують результати дослідження, використано
літературних джерел ____.

Одним із наслідків зростання попиту на електроенергію є активна модернізація мереж електропередачі в європейських країнах, де рівень напруги підвищується з 220 кВ до 380 кВ. У великих мегаполісах зростає кількість розподільних підстанцій, розрахованих на надвисоку напругу понад 380 кВ. Проте збільшення рівнів напруги має свою ціну: такі підстанції потребують великих площ, які в густонаселених міських районах стають дедалі дефіцитнішими.

У цьому контексті підстанції з елегазовою ізоляцією, розроблені близько 60 років тому, знову стають надзвичайно актуальними. Вони дозволяють суттєво зменшити розміри обладнання завдяки високій ізоляційній міцності елегазу. Це рішення допомагає розміщувати обладнання навіть у щільно забудованих зонах, економлячи простір і забезпечуючи при цьому надійну роботу системи. Таким чином, підстанції з елегазовою ізоляцією сьогодні знаходяться на передовій у розбудові сучасної енергетичної інфраструктури.

Мета магістерської кваліфікаційної роботи полягає у аналізі розвитку елегазу як ізоляційного середовища, дослідження сучасного стану питання та його перспектив у майбутньому з точки зору шкідливого впливу на навколишнє середовище.

Ключові слова: елегаз, елегазовий вимикач, розподільний пристрій з елегазовою ізоляцією, надійність роботи, екологічна шкода

ABSTRACT

to the master's thesis on the topic " Analysis of modern SF6 electrical equipment of power systems and features of its operation" by master's student Oleksandr SIVERCHUK

The master's work is executed on ____ pages, contains ____ tables, ____ drawings, which characterize the results of research, used literary sources_____.

One of the consequences of the growing demand for electricity is the active modernization of power transmission networks in European countries, where the voltage level is increasing from 220 kV to 380 kV. In large megacities, the number of distribution substations designed for extra-high voltages above 380 kV is increasing. However, the increase in voltage levels has its price: such substations require large areas, which are becoming increasingly scarce in densely populated urban areas.

In this context, SF6 insulated substations, developed about 60 years ago, are once again becoming extremely relevant. They allow for a significant reduction in the size of equipment due to the high insulating strength of SF6. This solution helps to place equipment even in densely built-up areas, saving space and ensuring reliable system operation. Thus, SF6 insulated substations are today at the forefront of the development of modern energy infrastructure.

The purpose of the master's qualification work is to analyze the development of SF6 as an insulating medium, to study the current state of the issue and its prospects in the future from the point of view of harmful effects on the environment.

Keywords: SF6, SF6 circuit breaker, SF6 insulated switchgear, reliability of operation, environmental damage

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. ЕЛЕГАЗОВІ ТА ВАКУУМНІ ВИМИКАЧІ В СУЧАСНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ

- 1.1. Елегаз та його застосування в електроенергетиці
- 1.2. Проблема експлуатації элегазових вимикачів
- 1.3. Переваги експлуатації комплектних РП з элегазовими вимикачами

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

РОЗДІЛ 2. ТИПИ ВИСОКОВОЛЬТНИХ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ, ВСТАНОВЛЕНИХ НА РП НАПРУГОЮ 6-110 КВ

- 2.1. Типи комутаційних элегазових апаратів напругою 35-110 кВ та оцінка їх остаточного ресурсу
- 2.2. Аналіз парку та оцінка комутаційного ресурсу вимикачів напругою 10 кВ
- 2.3. Сучасне элегазове електрообладнання підстанцій систем електропостачання та особливості його експлуатації

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

РОЗДІЛ 3. РОЗПОДІЛЬНІ ПРИСТРОЇ З ЕЛЕГАЗОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ РОЗВИТКУ

- 3.1. Особливості діагностування високовольтного обладнання з элегазовою ізоляцією
- 3.2. Результати ресурсних випробувань вакуумних дугогасних камер полюса високовольтного вимикача
- 3.3. Комутаційні випробування експериментального вакуумного вимикача

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

СПИСОК ПОСИЛАЊ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- ЕЕС- електроенергетична система
- КРПЕ – комплектний розподільний пристрій з елегазовою ізоляцією
- РП - розподільний пристрій
- КЗ - коротке замикання
- ППР - планово-попереджувальні ремонти
- ВДКЗ - відокремлювач-короткозамикач
- ВРП - відкритий розподільний пристрій
- ВДК - вакуумна дугогасильна камера
- ПВН - перехідна відновлювальна напруга
- ГІН - генератор імпульсної напруги
- ГІС - генератор імпульсного струму

ВСТУП

Актуальність. Елегаз, або гексафторид сірки (SF₆), є добре відомим у світі ізоляційним середовищем, яке вже майже 70 років широко використовується для електротехнічного обладнання середньої та високої напруги [1,2]. На жаль, наразі відсутня інформація про промислове виробництво елегазових вимикачів (англ. circuit-breakers) або комплектних розподільних пристроїв з елегазовою ізоляцією (КРПЕ) вітчизняними електротехнічними компаніями — принаймні у відкритих джерелах такої інформації не знайдено.

Раніше винятком були КРПЕ з елегазовою ізоляцією на номінальну напругу 35 кВ, які випускав Рівненський завод високовольної апаратури. У 2010 році це обладнання було продемонстровано на виставці ELCOM-2010 у Києві. Однак зараз виробництво цих пристроїв зупинене, і на офіційному вебсайті компанії відсутня інформація про можливе відновлення їх випуску або доступність для продажу.

Сучасні технічні рішення провідних світових електротехнічних компаній здебільшого спрямовані на вдосконалення конструкції КРПЕ шляхом об'єднання функцій різних електричних апаратів в одному модулі. Наприклад, у межах одного пристрою об'єднуються функції вимикача (switch), роз'єднувача і заземлювача. Також у конструкції КРПЕ передбачають розміщення всіх трьох фаз в одній оболонці, що сприяє підвищенню компактності та ефективності обладнання. Такі технічні рішення дозволяють зробити електрообладнання більш компактным, зменшити площу, необхідну для розміщення КРПЕ, і тим самим підвищити загальні техніко-економічні показники. Крім того, світові корпорації активно працюють над можливістю заміни елегазу, який є парниковим газом [3], на суміші елегазу з іншими газами або ж на екологічно безпечні альтернативи, що не містять елегазу.

Електрична міцність елегазу, залежно від таких зовнішніх умов, як тиск і температура, у кілька разів перевищує міцність інших ізоляційних

середовищ. Висока електрична стійкість елегазу дозволяє суттєво зменшити ізоляційні проміжки та відстані в електроустановках середньої та високої напруги, що, у свою чергу, дає змогу істотно скоротити розміри комплектного розподільного пристрою.

Історія успіху КРПЕ, що розпочалася майже 60 років тому, сьогодні знову переживає підйом. Сучасні моделі КРПЕ здатні ефективно відповідати на численні виклики та вимоги, які висуває промисловість із високими енергетичними потребами. Як свідчить статистика [1, 3], світове споживання електроенергії щорічно зростає приблизно на 2–3 %. У зв'язку з цим виникає необхідність забезпечення передачі дедалі більших обсягів електроенергії до територій великих міст, приміських районів та промислових об'єктів із мінімальними втратами.

Одним із наслідків зростання попиту на електроенергію є активна модернізація мереж електропередачі в європейських країнах, де рівень напруги підвищується з 220 кВ до 380 кВ. У великих мегаполісах зростає кількість розподільних підстанцій, розрахованих на надвисоку напругу понад 380 кВ. Проте збільшення рівнів напруги має свою ціну: такі підстанції потребують великих площ, які в густонаселених міських районах стають дедалі дефіцитнішими.

У цьому контексті підстанції з елегазовою ізоляцією, розроблені близько 60 років тому, знову стають надзвичайно актуальними. Вони дозволяють суттєво зменшити розміри обладнання завдяки високій ізоляційній міцності елегазу. Це рішення допомагає розміщувати обладнання навіть у щільно забудованих зонах, економлячи простір і забезпечуючи при цьому надійну роботу системи. Таким чином, підстанції з елегазовою ізоляцією сьогодні знаходяться на передовій у розбудові сучасної енергетичної інфраструктури.

Світова практика показує, що для розміщення елегазових підстанцій потрібно значно менше простору порівняно з аналогічними підстанціями, які використовують повітряну ізоляцію, особливо при високих рівнях

робочої напруги. Елегазові підстанції вирізняються своєю компактністю та високою ефективністю ізоляції, що дозволяє розміщувати їх на обмежених територіях без шкоди для безпеки та продуктивності. Завдяки цьому вони нечутливі до змін у навколишньому середовищі, таких як вологість, температура або забруднення, що є суттєвою перевагою перед підстанціями з повітряною ізоляцією.

Компактність елегазових підстанцій відкриває можливості для їх інтеграції у вже забудовані або обмежені простори, що особливо важливо в умовах міських районів, де вільна територія є обмеженою. Такі підстанції можна розміщувати всередині громадських або офісних будівель, під спортивними стадіонами, торговельними центрами або навіть у підземних спорудах. Їхня здатність ефективно працювати в приміщеннях з обмеженим простором дозволяє вирішувати складні задачі міського енергозабезпечення та створювати надійні, економічні й безпечні електромережі у щільно забудованих районах.

У звичайних умовах експлуатації елегаз є безпечним: це інертний, прозорий газ без запаху, який не підтримує горіння та вибух, а також нетоксичний. Однак при температурах, що перевищують 1000 °C, елегаз починає розкладатися, утворюючи токсичні продукти розпаду. Це вимагає впровадження спеціальних заходів для запобігання і контролю цих потенційних ризиків, пов'язаних із застосуванням елегазу, особливо у випадках аварійних ситуацій або при підвищеному нагріванні обладнання.

Водночас, через високу токсичність продуктів розкладу елегазу, світова промисловість шукає нові рішення для зменшення залежності від цього газу в електротехнічному обладнанні. Одним із перспективних напрямків є розробка вакуумних вимикачів і вакуумних камер для більш високих класів напруги. Вакуумні технології обіцяють підвищити рівень екологічної безпеки і надійності в мережах, оскільки вакуум є природно безпечним середовищем, яке не створює небезпечних продуктів розпаду навіть при нагріванні.

У майбутньому застосування вакуумних вимикачів на високих класах напруги може стати основним технологічним стандартом, що дозволить значно зменшити ризики для довкілля і здоров'я людей, одночасно забезпечуючи надійну роботу енергетичного обладнання.

Повна відмова від використання елегазу є, ймовірно, найбільш ефективним способом зменшення його викидів, що мають негативний вплив на навколишнє середовище. З огляду на сучасні дослідження та технологічні розробки, ця перспектива виглядає цілком технічно здійсненною для електроенергетичної галузі. Однак реалізація цього кроку є надзвичайно затратною і вимагає значних фінансових інвестицій. Тому цей шлях розвитку потребує всебічної підтримки як з боку державних органів, так і від бізнесу, який зацікавлений у модернізації своїх виробничих потужностей та зменшенні екологічного впливу.

Заміна елегазу на альтернативні технології потребує не лише значних коштів для наукових досліджень, а й великих витрат на перепроєктування існуючої інфраструктури, адаптацію обладнання та навчання персоналу. Водночас це відкриває нові можливості для інновацій у виробництві енергетичних пристроїв, що відповідатимуть вимогам сталого розвитку і екологічної безпеки. Тому важливо, щоб цей процес здійснювався в партнерстві між державними структурами, що можуть надавати фінансування та стимулювати законодавчі ініціативи, і приватними компаніями, які мають технічні можливості для реалізації таких інновацій. З вищесказаного видно, що проблема застосування елегазу є доволі актуальною.

Мета магістерської кваліфікаційної роботи полягає у аналізі розвитку елегазу як ізоляційного середовища, дослідження сучасного стану питання та його перспектив у майбутньому з точки зору шкідливого впливу на навколишнє середовище.

Об’єкт дослідження – процес передачі та розподілу електроенергії у системах з розподільними пристроями з елегазовим обладнанням.

Предмет дослідження - тенденції розвитку елегазового обладнання у сучасній енергетиці.

Задачі дослідження:

- ✓ Проаналізувати типи високовольтних вимикачів, встановлених на розподільних пристроях (РП) 6-110 кВ;
- ✓ Виявити їх остаточний комутаційний ресурс;
- ✓ Розглянути переваги та недоліки елегазу, його застосування в енергетиці та проблеми експлуатації елегазових вимикачів;
- ✓ Визначити для порівняння особливості вакуумних вимикачів;
- ✓ Визначити особливості діагностування високовольтного обладнання з елегазовою ізоляцією;
- ✓ Визначити шляхи подальшого розвитку обладнання з елегазовою ізоляцією.

Наукова новизна дослідження: пропонуються нові підходи до вдосконалення конструкції та технологічних рішень елегазового обладнання з метою підвищення його надійності, довговічності та екологічної безпеки. Розроблено методики оцінки впливу різних робочих умов на деградацію ізоляційних властивостей елегазу, що дозволяє оптимізувати параметри експлуатації обладнання. Вперше запропоновано використання альтернативних екологічно чистих замінників елегазу, які знижують негативний вплив на довкілля. Ці результати роблять вагомий внесок у розвиток сучасних енергетичних технологій, спрямованих на підвищення ефективності та екологічності електротехнічного обладнання.

Теоретичні результати дослідження: проведено системний аналіз взаємодії елегазу з матеріалами конструкцій обладнання, що дозволяє прогнозувати їхню довговічність та надійність. Запропоновано нові підходи до моделювання впливу високочастотних електромагнітних полів на ізоляційні властивості елегазу, що забезпечує підвищення точності

розрахунків під час проєктування обладнання. Розроблено теоретичні основи для визначення критичних параметрів, які впливають на стабільність роботи елегазового обладнання, з урахуванням його взаємодії з навколишнім середовищем. Ці результати формують наукову базу для оптимізації конструкцій та підвищення експлуатаційної ефективності елегазового обладнання.

Практичні результати дослідження: розроблені рекомендації щодо вибору оптимальних робочих параметрів для зменшення втрат енергії та підвищення надійності обладнання. Впроваджено вдосконалені методики діагностики стану елегазу та ізоляційних елементів, що дозволяють оперативно виявляти дефекти та прогнозувати термін служби обладнання. Запропоновано конструктивні зміни, спрямовані на зниження ризику електричних пробів та забезпечення стабільної роботи у складних експлуатаційних умовах. Отримані результати вже використовуються в модернізації обладнання та підвищенні ефективності систем електропостачання.

Методи дослідження. У процесі вирішення поставлених завдань використовувалися наступні методи: системний, порівняльно-правовий; управління режимами електроенергетичних систем; комп'ютерного моделювання; аналізу та синтезу простіших систем.

РОЗДІЛ 2. ТИПИ ВИСОКОВОЛЬТНИХ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ, ВСТАНОВЛЕНИХ НА РП НАПРУГОЮ 6-110 КВ

2.1. Типи комутаційних елегазових апаратів напругою 35-110 кВ та оцінка їх остаточного ресурсу

Надійність комутаційних апаратів безпосередньо впливає на надійність передачі та розподілу електроенергії, надійність електропостачання споживачів, підвищення якої нині є актуальним напрямом розвитку електроенергетики [4]. Відмови комутаційних апаратів у мережах 35 - 110 кВ призводять до значних збитків для споживачів та електромережових організацій, оскільки через них передаються значні потужності [5], у тому числі здійснюється електропостачання сільських населених пунктів, сільгосппідприємств, цілих сільських районів. У той же час відмови вимикачів даної напруги – не таке вже й рідкісне явище. Так, доведено, що при 283 вимикачах напругою 110 кВ, що належать до Дніпровської енергосистеми у період 2013-2018 рр. було виявлено 188 випадків їх відмов з різних причин. Надійність вимикачів залежить від багатьох факторів, серед яких: конструктивне виконання, термін експлуатації та залишковий комутаційний ресурс, правильність вибору по характеристикам, своєчасність обслуговування та діагностики.

Для забезпечення гарного технічного стану електрообладнання, що знаходиться в експлуатації, з метою виконання ним заданих функцій застосовується система планово-попереджувального ремонту (ППР). Нове електрообладнання, яке встановлюється на електроенергетичних об'єктах, має високу надійність та безвідмовність, при цьому в процесі експлуатації відбувається погіршення характеристик обладнання, що призводить до зниження надійності його роботи. У зв'язку з постійною появою на ринку та в експлуатації вимикачів нових типів напругою вище 1000 кВ, які також старіють і часто не підходять для нових типів

електроустановок, вченими розробляються нові методи їх контролю та діагностики [6].

На теперішній час постало завдання проаналізувати комутаційні апарати за типами, критеріями старіння та виробниками, зокрема, було проведено аналіз серед гасіння струмів навантаження і коротких замикань (КЗ).

Як приклад для оцінки залишкового ресурсу було обрано зарубіжний високовольтний елегазовий вимикач 3AP1DT145/ЕК виробництва компанії «SIEMENS» з номінальним струмом 2,5 кА і здатністю відключення 31,5 кА, встановлений на розподільчому пристрої 110 кВ підстанції «Західна» 110/35/10/6 кВ.

Оцінка залишкового ресурсу вимикача проведена згідно з способом, докладно розглянутим у роботі [4] на вимикачах на номінальну напругу 220 кВ типів ВВД220Б, У220Б, ВМТ220Б, ВЕК220. Відповідно до способу, здійснюється фіксація поточного струму комутації I_t , на підставі якого обчислюється величина поточного спрацьованого ресурсу високовольтного вимикача P_t у відносних одиницях, при цій комутації по формулі (2.1):

$$P_t = \left(\frac{I_t}{I_{\text{откл}}} \right)^2$$

де I_t - поточне значення струму комутації, кА; $I_{\text{відкл}}$ – здатність вимикача, що відмикає, кА.

Для того, щоб обчислити залишковий ресурс P_o з комутаційного ресурсу високовольтного вимикача P_k віднімають величину поточного спрацьованого ресурсу P_c по формулі (2.2):

$$P_o = P_k - P_c$$

де P_o - залишковий ресурс високовольтного вимикача; P_k - встановлений ресурс високовольтного вимикача; P_c – поточний спрацьований ресурс високовольтного вимикача.

Недоліком способу є його застосування в моделях з використанням відносних значень струмів комутації, не розглянутих на реальних електроенергетичних об'єктах, а також відсутність методичних рекомендацій щодо визначення числа комутацій, які можна здійснити при різних значеннях комутуваних струмів навантаження та коротких замикань.

У зв'язку з цим пропонуємо оцінювати число комутацій за формулою (2.3) з використанням раніше визначеного поточного спрацьованого ресурсу за формулою (2.4):

$$n = P_k / P_c ,$$

де n - число комутацій при поточному спрацьованому ресурсі P_c та повному комутаційному ресурсі P_k .

Наприклад, повний комутаційний ресурс вимикача 3AP1DT145/EK визначимо за положеннями стандарту «ДОСТ У 525652006. Вимикачі змінного струму напруги від 3 до 750 кВ. Загальні технічні умови», згідно до якого для елегазових вимикачів з відключаючою здатністю 31,5 кА можна зробити 20 комутацій номінального струму відключення.

Для розробки заходів, спрямованих на технічне переозброєння підстанцій та підвищення ефективності їх функціонування зробимо аналіз типів комутаційних апаратів, встановлених на підстанціях у філії ПАТ «Центру» "Дніпроенерго". Результати проведеного аналізу типів комутаційних апаратів представлені на рисунках 2.1, 2.2.

Виходячи з даних, представлених на рисунку 1.1, впливає, що майже половина, а саме 47% комутаційних апаратів підстанцій з вищою напругою 110 кВ – це працююча в сукупності система відокремлювач-короткозамикач (ВДКЗ).

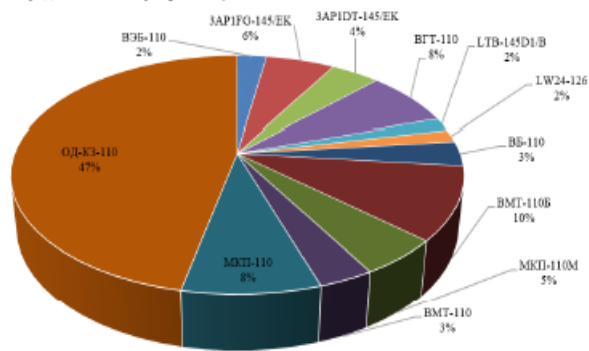


Рисунок 2.1 - Типи комутаційних апаратів встановлених на підстанціях філії «Дніпроенерго» з вищою напругою 110 кВ

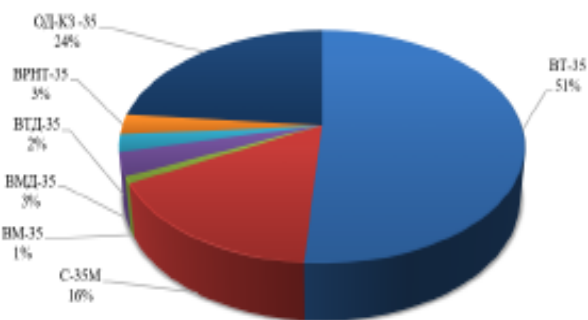


Рисунок 2.2 - Типи комутаційних апаратів встановлені на підстанціях філії «Дніпроенерго» з вищою напругою 35 кВ

Зробимо оцінку залишкового ресурсу елегазового високовольного вимикача 3AP1DT145/ЕК виробництва компанії «SIEMENS» з номінальним струмом 2,5 кА та відключаючою здатністю 31,5 кА, встановленого на розподільчому пристрої 110 кВ підстанції «Західна» 110/35/10/6 кВ. Як раніше згадувалося, даний вимикач може зробити 20 відключень свого максимального струму відключення. Тобто, згідно з формулою (2.1) при відключенні номінального струму відключення витрачається наступний ресурс:

$$P_t = (31,5 / 31,5)^2 = 1$$

Таким чином, згідно з формулою (2.2), залишковий комутаційний ресурс складає:

$$P_0 = 20 - 1 = 19$$

Здійснимо оцінку витрати комутаційного ресурсу при відключенні трифазного струму короткого замикання зі значенням 13,2 кА по формулі (2.1):

$$P_t = (13,2 / 31,5)^2 = 0,176$$

За набутим значенням також можна оцінити витрату комутаційного ресурсу за формулою (2.2), при цьому максимальна кількість відключень даного трифазного значення струму КЗ складає, згідно з формулою (2.3):

$$n = \frac{20}{0,176} \approx 113$$

Загалом можна зробити висновок, що даний комутаційний ресурс є дуже високим, оскільки за нормативний термін служби даного високовольтного вимикача, що становить 25 років, ймовірно не виникне такої великої кількості аварійний режимів роботи електроенергетичної системи, через які могла б з'явитися необхідність захисту електрообладнання підстанції «Західна» 110/35/10/6 кВ шляхом відключення трифазного струму короткого замикання.

Для того, щоб оцінити правильність вибору високовольтного вимикача зробимо порівняння з іншими технічними рішеннями, пропонованими компанією «SIEMENS», а саме: компанією розроблений такий же елегазовий високовольтний вимикач 3AP1DT145/EK з відключаючою здатністю 20 кА, є і вітчизняний варіант вимикача з відмикаючою здатністю 20 кА, зокрема ВГТ110. Так, у разі відключення трифазного струму КЗ даним вимикачем було б витрачено наступний комутаційний ресурс:

$$n = \frac{20}{0,436} \approx 45$$

Отримане значення також показує великий комутаційний ресурс вимикача при розрахункових струмах короткого замикання. Таким чином, можна зробити висновок, що встановлений на даний час на підстанції елегазовий високовольтний вимикач ЗАР1DT145/ЕК з відключаючою здатністю 31,5 кА обраний із запасом, що не цілком раціонально. У проекті реконструкції слід було розглянути технічні рішення з меншою відмикаючою здатністю, що призвело б до зниження капіталовкладень на реконструкцію підстанції. Так, наприклад, за даними ринкова вартість вимикача ЗАР1DT145/ЕК з відключаючою здатністю 31,5 кА становить 390000 грн. Загалом, використання електроустаткування українського виробництва дозволило б значно знизити витрати на придбання, монтаж, амортизацію та обслуговування електрообладнання.

Точнішу оцінку витрачання комутаційного ресурсу можна отримати шляхом встановлення на високовольтні вимикачі датчиків, що контролюють інтенсивність та тривалість горіння електричної дуги, потужність, що комутується, параметри електродинамічного та термічного впливів коротких замикань.

Виходячи з проведеної оцінки залишкового ресурсу встановленого в даний час на підстанції елегазового високовольтного вимикача ЗАР1DT145/ЕК з відключаючою здатністю 31,5 кА можна стверджувати, що облік комутуваного струму дозволяє найбільш точно оцінювати витрати комутаційного ресурсу високовольтного вимикача, що забезпечить збільшення терміну його експлуатації. Отримано розрахункову формулу, що дозволяє оцінити кількість допустимих комутацій від впливу експлуатаційних факторів, зокрема комутуваного струму. Розглянута методика може використовуватись для визначення залишкового ресурсу і інших типів високовольтних вимикачів.

З аналізів типів комутаційних апаратів можна назвати такі становища. На підстанціях з вищою напругою 110 кВ не встановлено жодного вакуумного вимикача. Вважаємо, що це пов'язано з тим, що компанії виробники не пропонують варіанти повсюдного використання вакуумних вимикачів на напругу 110 кВ у зв'язку з тим, що найбільш раціональна область застосування вакуумних вимикачів – електричні мережі середнього класу напруги 6 – 35 кВ. Виготовлення вакуумної дугогасної камери на напругу 110 кВ потребує великих витрат, оскільки з підвищенням напруги потрібно значне збільшення її лінійних розмірів.

Рекомендується проводити заходи щодо підвищення ефективності електричних мереж та технічне переозброєння в наступній послідовності:

- замінити всі системи відділювач-короткозамикач на напрузі 35 кВ та 110 кВ на сучасні типи вакуумних та елегазових вимикачів;

- замінити вимикачі типів МКП110, МКП110М, ВМТ110, ВМТ110Б, ВТ35, С35М, ВМ35, ВМД35, ВТД35 на сучасні типи вакуумних та елегазових вимикачів.

2.2. Аналіз парку та оцінка комутаційного ресурсу вимикачів напругою 10 кВ

Виходячи з вище сказаного, можна резюмувати, про те, що практичну значимість має визначення комутаційного ресурсу при комутаціях струмів різної величини, що перебувають в експлуатації старих високовольтних вимикачів 10 кВ з плануванням заходів з технічного переозброєння шляхом встановлення сучасних вимикачів з визначенням їхнього комутаційного ресурсу на тих же електроустановках.

Технічний стан високовольтних вимикачів 10 кВ було визначено для кожного вимикача виходячи з результатів діагностичних досліджень, при цьому фахівцями «Дніпроенерго» не враховувалися комутовані

вимикачами струми нормального та аварійних режимів з огляду на відсутність можливості їх вимірювання на кожному об'єкті, що не дозволяє достовірно судити про діючий технічний стан вимикачів. Дані щодо технічного стану парку вимикачів 10 кВ, представлені в даній роботі, були отримані з урахуванням результатів місцевого контролю та діагностики.

Для розрахунку витрати комутаційного ресурсу вимикачів необхідно знати значення струмів короткого замикання у представлених лініях, що відходять. У зв'язку з цим були використані значення струмів короткого замикання на шинах 10 кВ підстанцій 35/10 кВ та 35/10 кВ, що становлять 1041 А та 1641 А, розраховані персоналом служби релейного захисту філії "Дніпроенерго". Розрахунок був зроблений за методикою, розглянутою в роботі [7] у відповідність до стандарту «ДОСТ У 52735-2007. Національний стандарт України. Короткі замикання в електроустановках. Методи розрахунку електроустановках змінного струму напругою понад 1 кВ».

Виходячи з цього, для вакуумного вимикача ВВВ-10-400/4 комутаційний ресурс R_k слід прийняти рівним 30 допустимим відключенням струму граничної комутаційної здатності I_{on} 4 кА, при цьому механічний ресурс вимикача згідно з технічними характеристиками становить 50000 комутацій, ВПМ-10-20/630, згідно з інструкцією з експлуатації, комутаційний ресурс R_k дорівнює 10 допустимим відключенням струму I_{on} 20 кА і 17 відключенням струму 12 кА при механічному ресурсі 2500 комутацій.

У свою чергу, передбачуваний до заміни вимикач типу ВВ/TEL-10-1000/20 був випущений відповідно до ДОСТу У 52565-2006, в якому встановлено допустиму кількість комутацій, яка представлена в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 - Допустимий комутаційний ресурс для високовольтних вимикачів при допустимій кількості комутацій при значеннях струму I_{on} кА

Види вимикачів	До 31,5	40	50	53
----------------	---------	----	----	----

На рисунку 2.4 представлені типи маломасляних вимикачів 10 кВ, що застосовуються в Дніпроенерго.

Так, найбільша частина парку представлена такими типами високовольтних вимикачів: 29% - 344 горщикові маломасляні вимикачі типу ВМГ, 24% - 283 вимикачі типу ВК, 15% - 184 вимикачі типу ВМПП.

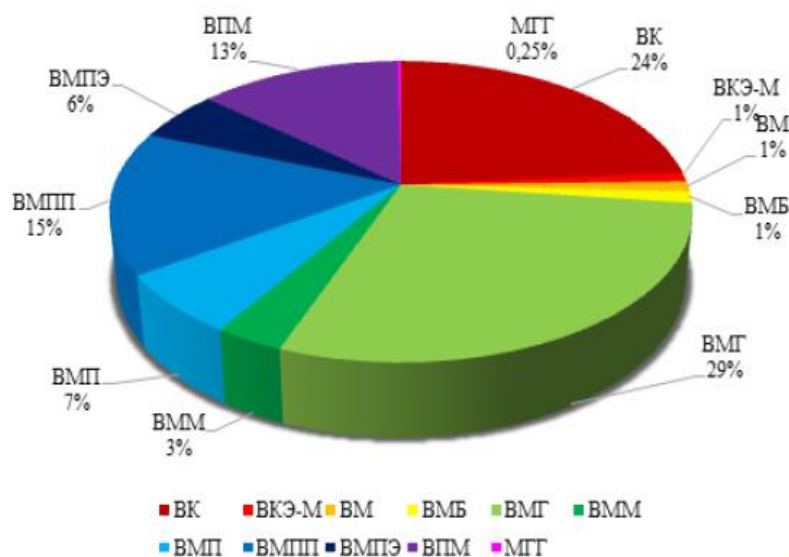


Рисунок 2.4 - Типи конструктивного виконання маломасляних вимикачів 10 кВ

В результаті аналізу технічного стану високовольтних вакуумних та маломасляних вимикачів 10 кВ було виявлено, що 1175 вимикачів парку мають дуже добрий технічний стан, що характеризується індексом технічного стану рівним або перевищує 85%. У хорошому технічному стані з індексом у діапазоні 70-85% знаходяться 587 вимикачів, що становлять 32% парку. При цьому 70 високовольтних вимикачів 10 кВ знаходяться у задовільному технічному стані з індексом 50-70%, що формує 4% від загального парку.

2.3. Сучасне елегазове електрообладнання підстанцій систем електропостачання та особливості його експлуатації

Електричні підстанції, що входять до системи електропостачання промислових підприємств в останні роки, комплектуються сучасним високовольтним електрообладнанням з елегазовим заповненням. До нього відносяться: силові трансформатори, комплектні розподільні пристрої, високовольтні вимикачі, вимикачі навантаження, трансформатори струму і напруги, електричні конденсатори та струмопроводи [8].

Елегаз SF₆ (шестифториста сірка) у високовольтному електрообладнанні підстанцій використовується в якості ізоляційного середовища та засобу, що забезпечує ефективне дугогасіння в комутаційних апаратів. При тиску елегазу 0,3-0,4 МПа його електрична міцність вище, ніж у трансформаторної олії.

Елегаз має підвищену тепловідвідну здатність і є гарним дугогасним середовищем, що дозволяє робити відключення великих струмів короткого замикання при великих швидкостях відновлення напруги. Крім

перерахованих властивостей, слід відзначити високу термостійкість елегазу (до 800 ° С). Він не утворює вибухонебезпечних сумішей і є хорошим акустичним ізолятором, не піддається старінню, хімічно не активний.

Головною особливістю експлуатації елегазового електрообладнання є часткове розкладання елегазу при впливі дугового або коронного розрядів. Продукти розкладання можуть викликати руйнування ізоляційних та конструкційних матеріалів комутаційного апарату та надавати негативний вплив на здоров'я обслуговуючого персоналу підстанції.

Крім того, слід відзначити низьку температуру зрідження елегазу - мінус 64° С, яка у разі підвищення тиску збільшується. Тому експлуатація вимикача за таких умов потребує пристрою підігріву.

В елегазових вимикачах, що використовуються на сучасних електричних підстанціях, гасіння електричної дуги відбувається за її інтенсивного охолодження потоком газу. В елегазі канал стовпа дуги має високу електричну провідність, і його руйнація не відбувається до

природного переходу струму через нуль, що виключає появу перенапруги, наприклад, при відключенні ненавантажених трансформаторів. Висока здатність елегазу гасити дугу обумовлена його властивістю захоплювати вільні електрони перед переходом струму через нуль. При цьому кількість вільних електронів у стовпі дуги зменшується, і дуга гасне.

Елегазовий вимикач представляє собою замкнуту систему без викиду газу назовні. Елегаз у вимикачі знаходиться при невеликому надлишковому тиску. Баковий елегазовий вимикач типу ВДБ зображено на рисунку 2.5.

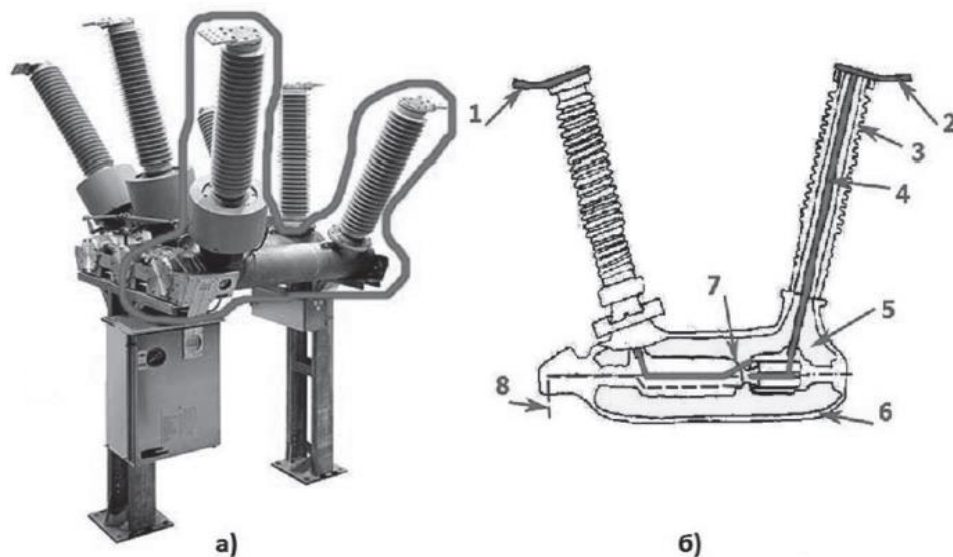


Рисунок 2.5 – Баковий елегазовий вимикач (ВДБ): а) зовнішній вигляд; б) вид у розрізі, де: 1, 2 – виводи для приєднання високовольтного дроту; 3 – ізолятор; 4 – струмопровід; 5 – елегаз; 6 – бак; 7 – контакти; 8 – механічний зв'язок із приводом

В елегазовому вимикачі серії LF 6,10 кВ, наприклад, фірми «Schneider Electric» застосовано принцип обертання дуги в елегазі та принцип автогенерації тиску, що створює найкращі умови для гасіння дуги. Підвищення ефективності дугогасіння сприяє збільшенню напруги на один розрив вимикача [9].

В електроенергетиці почали застосовувати герметизовані комплектні розподільні пристрої (КРПЕ) (рис.2.6), в яких усе електрообладнання (струмоведучі частини, вимикачі, роз'єднувачі та ін.) розташоване всередині герметичної оболонки, заповненої елегазом під тиском.

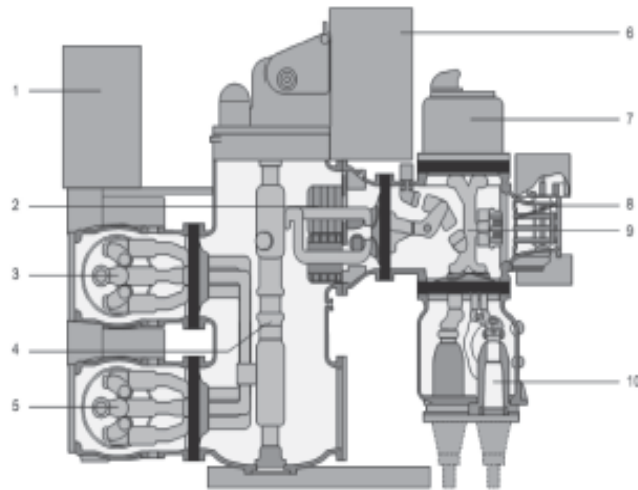


Рисунок 2.6 - Осередок КРПЕ компанії «Siemens» з подвійною системою збірних шин: 1 – шафа управління; 2 – трансформатор струму; 3,5 – збірні шини з роз'єднувачами та заземлювачами; 4 – дугогасильна камера; 6 – пружинний привід; 7 – трансформатор напруги; 8 - швидкодіючий заземлювач; 9 – модуль лінії з роз'єднувачем та заземлювачем; 10 – кінцева кабельна муфта

Елегазові комплектні розподільні пристрої зменшують площі та обсяги підстанцій, займані обладнанням, підвищують рівень захисту персоналу від впливу електричних та магнітних полів та його електробезпеку, усувають атмосферний вплив на ізоляцію електроустаткування. Крім того, знижується рівень шуму при роботі обладнання (елегаз хороший акустичний ізолятор), усуваються радіоперешкоди, забезпечується висока надійність і сейсмостійкість.

Елегазові трансформатори є пожежо- і вибухобезпечні, малошумні, мають високий рівень герметичності. Якщо в силовому елегазовому трансформаторі виникає електрична дуга, то через стисливість елегазу

внутрішній тиск у корпусі підвищиться набагато менше, ніж у масляному. Це знижує загрозу втрати герметичності баку [10].

Говорячи про екологічні аспекти особливостей експлуатації елегазового електрообладнання, слід мати на увазі те, що у високовольтних вимикачах під впливом високої температури електричної дуги відбувається часткове розкладання елегазу та утворення хімічно активних сполук, які можуть викликати руйнування ізоляційних та конструкційних матеріалів електричного апарату, та які при достатній концентрації надаватимуть негативний вплив на здоров'я обслуговуючого персоналу підстанції при попаданні елегазу в атмосферу приміщення.

В заключенні можна сказати, що:

- виконаний огляд та аналіз сучасного елегазового високовольтного електрообладнання підстанцій системи електропостачання промислових об'єктів;
- при збільшенні кількості комутацій елегазового вимикача об'єм продуктів розкладання зростає (на 1–2 %), а залишковий обсяг чистого елегазу зменшується;
- система діагностики стану елегазу у високовольтному вимикачі може бути використана для оперативного контролю в автоматизованій системі керування електропостачанням.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2:

Проаналізовані види електрообладнання з елегазовою ізоляцією; визначений та оцінений комутаційний ресурс вимикачів напругою 10 кВ та 110 кВ.

В результаті аналізу технічного стану високовольтних вакуумних та маломасляних вимикачів 10 кВ було виявлено, що 1175 вимикачів парку мають дуже добрий технічний стан, що характеризується індексом технічного стану рівним або перевищує 85%. У хорошому технічному стані з індексом у діапазоні 70-85% знаходяться 587 вимикачів, що становлять 32% парку. При цьому 70 високовольтних вимикачів 10 кВ знаходяться у задовільному технічному стані з індексом 50-70%, що формує 4% від загального парку.

Електричні підстанції, що входять до системи електропостачання промислових підприємств в останні роки, комплектуються сучасним високовольтним електрообладнанням з елегазовим заповненням. До нього відносяться: силові трансформатори, комплектні розподільні пристрої, високовольтні вимикачі, вимикачі навантаження, трансформатори струму і напруги, електричні конденсатори та струмопроводи.

Приведена методика розрахунку комутаційного ресурсу вимикачів різних рівнів напруги.

РОЗДІЛ 1. ЕЛЕГАЗОВІ ТА ВАКУУМНІ ВИМИКАЧІ В СУЧАСНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ

1.1. Елегаз та його застосування в електроенергетиці

Варто зазначити, що на кожній електричній підстанції основним елементом захисту ланцюгів є силові вимикачі. Вимикачі є ключовими елементами обладнання розподільчих пристроїв підстанцій. Цей комутаційний апарат здійснює включення та відключення ділянок електричної мережі під робочим струмом навантаження в нормальному режимі, а у разі формування аварійних режимів - дуже великі струми, струми КЗ, здатний відключити за частки секунд аварійну ділянку мережі.

Наприкінці ХХ століття у світовій енергетиці відбулося відкриття у технологіях комутаційних апаратів високої напруги. Масляні та повітряні вимикачі стали поступово йти на другий план, поступаючись місцем елегазовим вимикачам. Таке стрімке поширення на ринку елегазових вимикачів пояснюється досить хорошими властивостями елегазу, що гасять дугу, та підвищеною безпекою експлуатації комутаційного обладнання з їх застосуванням. І хоча цей тип вимикачів є недешевим, поки що не знайдено гідних конкурентів за способами гасіння дуги в елегазі.

Елегазові високовольтні вимикачі - це пристрої оперативного керування та контролю високовольтних електричних мереж. Дані пристрої мають дуже схожу конструкцію з масляними, але при цьому використовують для гасіння дуги не масляну суміш, а з'єднання газів. Найчастіше - це сірка. Завдяки таким властивостям елегазу, як швидке гасіння електричної дуги, гарна електронегативна природа, і чудова діелектрична міцність, елегазові вимикачі набули популярності в класах високої та надвисокої напруги.

Найголовніша перевага елегазових вимикачів полягає в практично 100% ізоляції, ступеня гасіння дуги, фізичних та хімічних властивостях газу SF₆. Електрична міцність дугогасного середовища є однією зі значущих характеристик вимикачів. Елегаз має найвищу діелектричну міцність, особливо при рівні напруги 110 кВ та вище. Елегаз не підтримує горіння і не є хімічно активним. Продукти розпаду цього газу не вибухонебезпечні, тобто ризик спалаху та вибуху відсутній. Також у зв'язку з діелектричною міцністю з'єднання SF₆ електричні зазори досить малі. Ще однією перевагою даного типу вимикачів є те, що для надвисокої напруги вони вимагають меншої кількості переривачів на полюс, ніж вимикачі з повітряною ізоляцією та масляні вимикачі.

Елегазові вимикачі зовнішньої установки прості, відносно недорогі, компактні, та не вимагають обслуговування. На роботу цих вимикачів не впливає зміна атмосферних умов. Під час експлуатації мають низький рівень шуму, не виробляючи таких звуків, які видають під час роботи вимикачі із повітряною ізоляцією. Не потрібно частої заміни елегазу внаслідок чого ерозія контактів знижена. Контакти також не схильні до окислення.

Елегазовий вимикач може виконувати різні завдання, такі як блокування відмов КЗ, розрив ліній передачі електроенергії, що не мають навантаження, конденсаторна комутація, реакторне перемикання тощо. Елегазовий високовольтний вимикач високої напруги працює за рахунок ізоляції фаз одна від одної за допомогою газу. У момент спрацювання сигналу про те, що необхідно зробити вимкнення електрообладнання, контакти окремих камер (якщо колонковий пристрій) розмикаються. Таким способом вбудовані компоненти утворюють дугу, поміщену в газове середовище. Ця дуга сприяє розпаду газу на окремі компоненти, але при цьому сама зменшується через високий тиск у ємності. Якщо система встановлена на низькому тиску, то застосовуються додаткові компресори

для нагнітання тиску та створення газового дуття. Для вирівнювання струму додатково використовується шунтування.

Крім плюсів, елегазові вимикачі мають ряд недоліків, такі як:

- елегаз якоюсь мірою – це задушливий газ. У разі витоку з корпусу вимикача, елегаз, будучи важчим за повітря, заповнює навколишнє приміщення, та може призвести до задушення обслуговуючого персоналу. При цьому він не отруйний;

- елегаз, в якому відбулося гасіння дуги - отруйний, і слід намагатися не вдихати його;

- внутрішні частини елегазового вимикача вимагають ретельного очищення в період профілактичного обслуговування у чистому та сухому оточенні. Необхідно видаляти пил тефлону та сульфідів.

Також при порушенні технології виробництва елегазу або під час проходження через нього електричного розряду (дугового, коронного, часткового) він розкладається на складові гази, серед них SF_6 – надзвичайно токсичний газ, про що вже йшла мова. Інтенсивність утворення таких домішок та шкідливі наслідки значно посилюються за наявності в елегазі домішок кисню та, особливо, домішок пари води. Стабільність молекулярного складу елегазу сильно впливає на екологію екології: гексафторид сірки має величезний Потенціал Глобального Потепління (у 24900 разів вище, ніж у CO_2), а час його життєздатності становить 3200 років.

Тому, згідно з Кіотським протоколом, SF_6 класифіковано як газ обмеженого застосування. Так як елегаз важчий за повітря, то в низько розташованих закритих приміщеннях елегаз, що накопичився, може витіснити повітря. Ці недоліки елегазу обумовлюють високі вимоги до якості герметичності електротехнічного обладнання.

У процесі експлуатації елегазового обладнання існує кілька суттєвих моментів. Після першого гасіння дуги в елегазовому середовищі формуються хімічно активні та шкідливі для людини домішки. Рівень

їхньої небезпеки великий настільки, що, в процесі заміни відпрацьованого газу SF₆ слід бути особливо обережним: застосовувати респіратори, передбачити захист очей, а внутрішню поверхню газових корпусів необхідно обов'язково нейтралізувати за допомогою розчину гашеного вапна. Крім цього, у закритих розподільних пристроях необхідне встановлення спеціальних датчиків, які здійснюють контроль витоків елегазу [2.3].

В даний час елегазові вимикачі найбільш популярні на напругу 110 ... 1150 кВ. Ведуться численні дослідження з розробки малогабаритних електричних вимикачів на напругу 10...35 кВ, які складають конкуренцію вакуумним вимикачам.

Можна сказати, що елегаз, як дугогасне середовище знайшло широке застосування в різних електротехнічних пристроях, в силу ряду своїх переваг перед вже існуючими діелектричними середовищами, які використовуються в електротехнічному устаткуванні. Завдяки його властивостям, у обладнання, що використовує елегаз, суттєво зменшуються маса та габарити, а також знижуються витрати на обслуговування.

В даний час елегаз почав широко застосовуватися і у високовольтних кабелях та струмопроводах. Використання елегазу в високовольтній ізоляції кабелів пояснюється дуже високою пропускнуою здатністю елегазу, такі кабелі застосовуються: у передачі електроенергії в райони з численною щільністю промислових підприємств та забезпечують з'єднання електричних станцій з трансформаторними підстанціями або розподільними пристроями.

Сучасна енергетика не стоїть на місці і часто робить великі відкриття, знаходить альтернативні джерела енергії, модернізує обладнання, але ясно одне, що на сьогоднішній день елегазові вимикачі є сучасними і прогресивними, а також стійко тримаються на ринку, складаючи стабільну конкуренцію вакуумним та масляним вимикачам.

1.2. Проблема експлуатації елегазових вимикачів

Елегазові вимикачі – це пристрої оперативного керування для спостереження за високовольтною лінією енергопостачання. За конструкцією дані механізми схожі на масляні вимикачі, але відмінністю є те, що для гасіння дуги застосовуються гази, а не олія. Масляні вимикачі складні в експлуатації з тієї причини, що необхідна часта заміна цього масла і часте очищення робочих контактів. До елегазових такі вимоги не пред'являються. На рис.1.1 приведений зовнішній вид елегазового вимикача.



Рисунок 1.1 – Елегазовий вимикач

Елегазові вимикачі класифікуються на:

- колонковий. Використання такого типу допустиме лише для мережі 220 кВ. Такий механізм працює на одну фазу. Конструкція складається із двох систем. Вони встановлюються у ємності з елегазом. Це контактна та дугогасна система. Ці системи можуть працювати як у ручному режимі, так і в дистанційному. Ця умова є причиною того, що вони мають такі великі габарити;
- баковий. Розміри таких пристроїв менші, ніж у колонкових. У будові знаходиться ще один привід, що має кілька фаз. Через це з'являється можливість плавно керувати включенням та вимкненням напруги. Також

система має трансформатор струму, завдяки якому пристрій може переносити великі навантаження [11,12].

Крім конструктивних відмінностей, вимикачі елегазового типу діляться за способом гасіння дуги:

- Автокомпресійні чи повітряні;
- Обертальні;
- Поздовжнього дуття;
- Поздовжнього дуття з додатковим розігрівом елегазу.

Переваги елегазових вимикачів:

1. Універсальність. Такі вимикачі застосовуються для керування мережами різної напруги;
2. Швидкість дії. Реакції елегазу на наявність електричної дуги відбувається за частки секунди, що гарантує миттєве відключення всієї системи чи обладнання в аварійній ситуації;
3. Допустима експлуатація в умовах пожежної небезпеки та вібрації;
4. Довговічність. Контакти, що стикаються з елегазом, практично не зношуються, газові суміші не потребують заміни, а у зовнішній оболонці - високі показники захисту;
5. Підходять для відключення змінного та постійного струму високої напруги, в той час як їх аналоги – вакуумні моделі - не можуть використовуватись на високовольтних мережах.

Також є такі недоліки:

1. Висока ціна, пов'язана з труднощами виробництва та дорожнечою елегазової суміші;
2. Монтаж проводиться безпосередньо на фундамент або спеціальний електрощит з наданням інструкції;
3. Вимикачі не функціонують за низьких температур;
4. Для обслуговування потрібне спеціальне обладнання.

Дугогасний пристрій вимикача елегазового типу характеризується малими розмірами та легкістю конструкції. Гасіння дуги здійснюється при

малій кількості розривів і швидко. Далі представлені конструктивні особливості та спосіб гасіння дуги у вимикачі (рис.1.2).

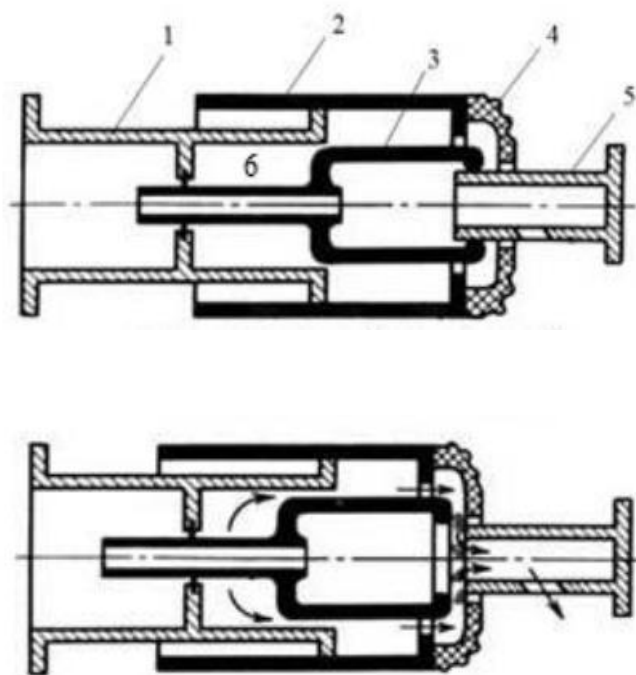


Рисунок 1.2 - Конструктивні особливості гасіння дуги: в положенні «включено» та «відключено»

Кожен із трьох полюсів розглянутого комутаційного апарату – герметичний резервуар з металу, який заповнений елегазом з тиском 0,6 МПа. У полюсі вимикача знаходиться автопневматичний механізм для гасіння дуги. При включеному положенні нерухомий контакт 5 щільно з'єднаний з ламелями рухомого контакту 3. При відключенні вимикача циліндр 4 рухомий контакт 3 і сопло з фторопласту 4 опускаються вниз, стискаючи при цьому елегаз в камері 6. Електричний газ, що знаходиться під тиском, рухається в сопло, де гасить електричну дугу, що виникає при розходженні рухомого та нерухомого контактів.

Експлуатація елегазового вимикача на підстанціях з обслуговуючим оперативним персоналом.

Елегазові вимикачі, що використовуються на відкритих розподільних пристроях електроустановок, схильні до появи конденсату, що утворюється в шафі приводу самого вимикача. Він здатний призвести до

пошкодження механізму приводу вимикача та вторинних ланцюгів керування та сигналізації. Через це необхідно забезпечити наявність нагрівальних резисторів, які завжди включені.

Операції включення та вимикання необхідно проводити тільки за умови, що система має необхідний тиск елегазу, у разі виникнення пошкодження вимикача. Для ліквідації таких випадків передбачена система, що сигналізує про знижений тиск, а також блокування ланцюгів управління вимикачем при зниженні тиску елегазу до критичного значення, при якому не здійснюється ізоляція та гасіння дуги при комутації струмів [11].

Якщо тиск у комутаційному апараті падає, необхідно відключити його і направити на ремонт, визначити причину зниження тиску, при виявленні причини – ліквідувати її та відшкодувати різницю газу. Для добавки газу існує спеціальне приєднання, яке знаходиться всередині шафи приводу. Для спостереження за тиском – встановлено манометр.

Оперативний персонал зобов'язаний здійснювати огляд елегазового вимикача щодня та додатково один раз на два тижні у темний час доби, переважно у сиру погоду на предмет коронування.

За несприятливих погодних умов, сильного забруднення, а також у разі аварійної ситуації, тобто після автоматичного відключення комутаційного апарату необхідно робити додаткові огляди.

Технічне обслуговування елегазового вимикача.

Деталі вимикача зазнають зношування, що при негативному сценарії може призвести до появи аварій. Для неможливості появи аварійної ситуації з цієї причини рекомендується проводити своєчасне технічне обслуговування. Графіки поточного та капітального ремонту рекомендується складати в залежності від кількості здійснених комутаційних операцій. Також визначено терміни, для досягнення яких необхідний ремонт, незалежно від комутаційних операцій. Відповідно до вимог заводу-виробника цей термін становить 25 років. Крім цього,

здійснюється огляд вимикача через дванадцять років після введення його в експлуатацію або у разі виробництва 50% кількості допустимих операцій увімкнення/відключення. Технічне обслуговування передбачає ревізію деталей вимикача, при необхідності їх заміну, а також вжиття заходів щодо попередження подальшого окислення та пошкодження деталей.

1.3. Переваги експлуатації комплектних РП з елегазовими вимикачами

Нині в індустріально-промислових розвинених країнах застосування КРУЕ інтенсивно поширене. Популярність вони здобули завдяки своїй компактності. Цікаво те, що ця компактність ніяк не позначилася на інших технічних характеристиках. Це головним чином дозволяє вирішувати проблему з дефіцитом земельних ділянок, який відіграє важливу роль при виборі електричних установок. Площа, яка потрібна для підстанції КРУЕ, складає приблизно від 10-20 відсотків від площі для ВРП, якщо враховувати комутаційну апаратуру. Ще більша економія досягається за допомогою кабельних з'єднань і коротких кабельних каналів КРУЕ. У більшій половині випадків компактність та зменшена площа здійснює оптимальний вибір нових підстанцій. А щодо ГЕС, то КРУЕ може бути змонтовано поряд з турбінами та генераторами, що цілком дозволяє забезпечувати значну економію кабельної мережі та шинопроводів. Якщо монтаж підстанції максимально наближено до підвищуючих трансформаторів, то зростає надійність усієї електричної станції.

Поява КРУЕ відіграло значну роль в оптимізації планування підстанцій, в проектуванні, технічного обслуговування, а також здійснило можливість збільшити надійність підстанції зі сторони їхньої стійкості до кліматичних факторів та до сейсмічного впливу [7,8,9].

КРУЕ може встановлюватися на різні напруги навіть на 800 кВ. Можуть споруджуватися на підстанції практично всіх можливих видів конструкцій. Як з технічних, так і з екологічних характеристик відповідають вимогам до апаратури, що пред'являються. Інформація, що отримана від фірми "Сіменс", яка є німецькою транснаціональним концерном, що спеціалізується в області електротехніки, електроніки, енергетичного обладнання: для одного відкритого розподільчого пристрою (ВРП) напругою 500 кВ знадобилося 30 000 квадратних метрів. Якщо ж використати КРУЕ, то вдасться зменшити необхідну площу до 920 квадратних метрів, тобто, як ми бачимо здійснюється значне скорочення площі приблизно в 30 разів [15,16]. На рис.1.3 приведені зрівняння територій, що займає КРПЕ та ВРП.

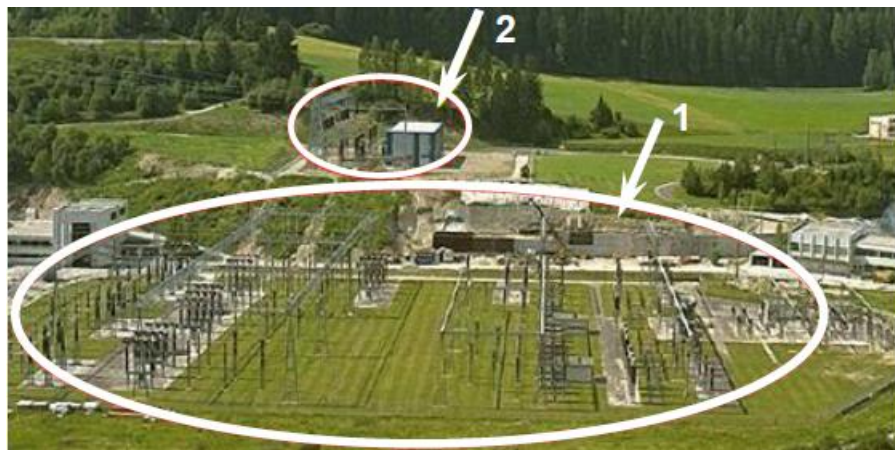


Рисунок 1.3 – Порівняння ВРП 220 кВ з повітряною (1) та елегазовою (2) ізоляцією

Негативності кліматичних умов, такі як: нижчі температури, сольові відкладення поблизу моря, промислові випари та опади, піщані бурі виключають свій вплив на конструкцію КРУЕ. Потрібно віддати належне металевій оболонці КРУЕ, адже вона робить РП не чутливим до впливу довкілля. Мала площа суттєво зменшує вартість будівельних робіт, навіть в умовах скельного ґрунту та вічної мерзлоти.

Слід звернути увагу на технічні показники КРУЕ. Основними елементами КРУЕ є: вимикачі, роз'єднувачі, заземлювачі, збірні шини, трансформатори струму та напруги. Вони розташовані в алюмінієвих захисних блоках, (іноді вони мають назву кожухи), тим самим здійснюючи модульний принцип побудови. Кожухи заповнені елегазом. Більшість виробників віддають перевагу тиску на рівні 0,6-0,7 МПа. Чому ж дорівнює значення температури переходу елегаза в рідкий стан? Це приблизно при 30 градусах нижче за нуль.

Окремі блоки КРУЕ з'єднують газощільними фланцями, а електричні з'єднання - втичними контактами.

Номінальними параметрами КРУЕ є:

- номінальна напруга та число фаз;
- номінальний рівень ізоляції;
- номінальна частота;
- номінальні робочі струми;
- ступінь захисту допоміжних та контурних ланцюгів.

У нашій країні КРУЕ виробляються на напругу 110 кВ. Температура всередині будівлі, де знаходяться КРУЕ, повинна становити мінімум 5 градусів вище за нуль.

По суті, з усіма своїми позитивними та негативними сторонами ця установка стала в ряд з провідними енергетичними установками на світовому ринку, що додало не тільки вибір до їхнього користування, але й зробило величезний крок у майбутнє енергетики.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1:

У даному розділі розкрито поняття елегазу, систематизовані його переваги та недоліки.

1. Можна сказати, що елегаз, як дугогасне середовище знайшло широке застосування в різних електротехнічних пристроях, в силу ряду своїх переваг перед вже існуючими діелектричними середовищами, які використовуються в електротехнічному устаткуванні. Завдяки його властивостям, у обладнання, що використовує елегаз, суттєво зменшуються маса та габарити, а також знижуються витрати на обслуговування.

2. В даний час елегазові вимикачі найбільш популярні на напругу 110 ... 1150 кВ. Ведуться численні дослідження з розробки малогабаритних електричних вимикачів на напругу 10...35 кВ, які складають конкуренцію вакуумним вимикачам

3. Розглянуті особливості технічної експлуатації комплектних розподільчих пристроїв з елегазовою ізоляцією та зроблені відповідні рекомендації.

4. Негативності кліматичних умов, такі як: нижчі температури, сольові відкладення поблизу моря, промислові випари та опади, піщані бурі виключають свій вплив на конструкцію КРУЕ. Потрібно віддати належне металевій оболонці КРУЕ, адже вона робить РП не чутливим до впливу довкілля. Мала площа суттєво зменшує вартість будівельних робіт, навіть в умовах скельного ґрунту та вічної мерзлоти.

РОЗДІЛ 3. РОЗПОДІЛЬНІ ПРИСТРОЇ З ЕЛЕГАЗОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ РОЗВИТКУ

3.1. Особливості діагностування високовольного обладнання з елегазовою ізоляцією

У 2010 році концерн "Високовольтний союз" [7] вперше на території СНД презентував комплектний розподільчий пристрій (КРП) із застосуванням елегазової ізоляції серії КУ35С, розрахований на номінальну напругу 35 кВ (рис. 3.1). Особливістю цього КРП є використання вакуумного вимикача ВРС-35 як основного комутаційного апарата. Три полюси вимикача, разом із системою збірних шин, інтегровані в повністю герметичний бак, заповнений елегазом. Така конструкція забезпечує підвищену надійність роботи обладнання, знижує ризик впливу зовнішніх факторів та сприяє мінімізації витрат на технічне обслуговування.

Інноваційне рішення концерну дозволило створити пристрій, який відповідає сучасним вимогам до експлуатації в електричних мережах, зокрема, завдяки високим експлуатаційним характеристикам і підвищеній безпеці. Використання елегазу як ізоляційного середовища забезпечує компактність конструкції, зменшує обсяги втрат електроенергії та підвищує стійкість до зовнішніх впливів, таких як кліматичні умови або механічні навантаження.

Застосування елегазової ізоляції дозволило значно зменшити відстань між полюсами вакуумного вимикача, а також оптимізувати розташування збірних шин, скоротивши їхню взаємну відстань. Це сприяло зменшенню габаритів обладнання, підвищенню компактності конструкції та ефективному використанню простору.

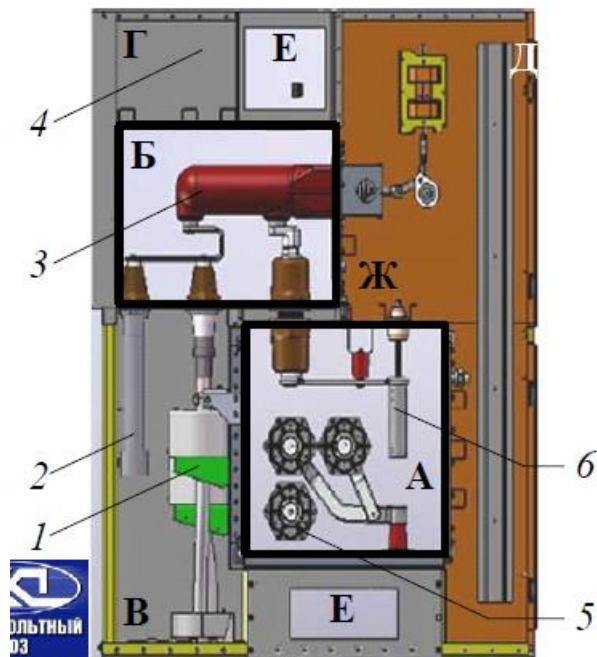


Рисунок 3.1 – Конструкція КРПЕ серії КУ35С

На рисунку показані: А – відсік збірних шин 5; Б – відсік вакуумного вимикача 3; В – відсік кабельних приєднань, трансформаторів струму 1 та обмежувачів перенапруги 2; Г – відсік трансформаторів напруги 4; Д – відсік низьковольтної апаратури; Ж – відсік приводів вакуумного вимикача та трьох позиційного заземлюючого роз'єднувача 6; Е – канали скиду газів при аварійному тиску в середині газонаповнених корпусів.

Так, ширина нового КРПЕ по фасаду складає 600 мм для номінальних струмів до 1600 А і 800 мм – для струмів понад 1600 А. Для порівняння КРП цього ж виробника на номінальну напругу 35 кВ, але вже із застосуванням повітряної ізоляції (серія КУ35 [7]), має ширину фасаду в 1,8-2,5 рази більшу (1500 мм) для всього діапазону значень номінального струму. Основні технічні характеристики КРПЕ КУ3 С наведені у табл.3.1.

Таблиця 3.1 - Основні технічні характеристики КРПЕ

Параметр	Величина
Номінальна напруга, кВ	35
Номінальний струм збірних шин, А	1250-2500
Номінальний струм відключення силового вакуумного вимикача, кА	31,5

Номинальний струм термічної стійкості за 3 с	31,5
Номинальний струм електродинамічної стійкості, кА	81
Габаритні розміри: -ширина, мм -глибина, мм -висота, мм	600(800) 1650 1965
Маса, кг	650 - 730

Комплектний розподільчий пристрій серії КУ35С має низку ключових переваг, які роблять його ефективним рішенням для сучасних електричних мереж. Серед головних переваг варто виділити високий рівень надійності, який забезпечує стабільну роботу обладнання протягом тривалого часу, а також простоту в обслуговуванні, що знижує експлуатаційні витрати та забезпечує зручність для персоналу.

КРПЕ КУ35С пропонує широкий вибір типових виконань, що дозволяє адаптувати його до різних умов експлуатації та вимог об'єкта. Системи релейного захисту та автоматики, побудовані на основі мікропроцесорних пристроїв, підтримують реалізацію різноманітних схем управління і захисту, забезпечуючи високу функціональність та інтеграцію з сучасними системами моніторингу та управління.

Додатковою перевагою є застосування елегазової ізоляції, розташованої в повністю герметичному об'ємі. Це технічне рішення не тільки підвищує електричну ізоляцію та безпеку пристрою, але й дозволяє ефективно використовувати його в складних кліматичних умовах. КРПЕ може успішно експлуатуватися на об'єктах, де спостерігаються підвищені рівні запиленості, забруднень, чи навіть у зонах з соляним туманом. Це робить його ідеальним вибором для регіонів із суворими екологічними умовами, наприклад, у промислових районах або прибережних зонах.

Поєднання універсальності, надійності та адаптивності до різноманітних умов дозволяє КРПЕ КУ35С відповідати найсуворішим вимогам сучасної енергетики.

Комплектні розподільчі пристрої серії 8DH10, вироблені компанією Siemens, розроблені для ефективного використання в розподільчих підстанціях середньої потужності з рівнем напруги 10–20 кВ і максимальною потужністю до 15 МВт. Ці пристрої відповідають сучасним вимогам енергетики завдяки своїй надійності, безпеці та зручності в експлуатації.

Корпус КРПЕ серії 8DH10 (рис.3.2) виготовлений із високоякісної сталі з гальванічним покриттям, що забезпечує тривалий термін служби та стійкість до корозії. Елементи, що знаходяться під високою напругою, мають ступінь захисту IP65, який забезпечує повну герметичність і захист від впливу пилу та вологи. Відсіки збірних шин і кабельного приєднання захищені на рівні IP20, що дозволяє забезпечити безпечну експлуатацію обладнання та мінімізувати ризик випадкового контакту з струмоведучими частинами.

Ключовою технічною особливістю є використання цільнозварного резервуара з нержавіючої сталі, у якому розміщені всі основні елементи, включаючи вакуумний вимикач, трипозиційний перемикач і систему збірних шин. Цей резервуар заповнений елегазом (SF_6), що забезпечує надійну ізоляцію, високий рівень безпеки та відсутність необхідності технічного обслуговування протягом усього терміну експлуатації.

Завдяки використанню елегазової ізоляції та герметичної конструкції, КРПЕ серії 8DH10 демонструють високу стійкість до впливу навколишнього середовища, зокрема в умовах підвищеної вологості, запиленості або агресивного промислового середовища. Ці пристрої ідеально підходять для використання на об'єктах із високими вимогами до надійності та безперебійності електропостачання, таких як промислові підприємства, житлові райони або об'єкти критичної інфраструктури.

Поєднання передових технічних рішень, довговічності конструкції та мінімальних експлуатаційних витрат робить КРПЕ 8DH10 оптимальним вибором для модернізації та побудови сучасних енергетичних мереж.

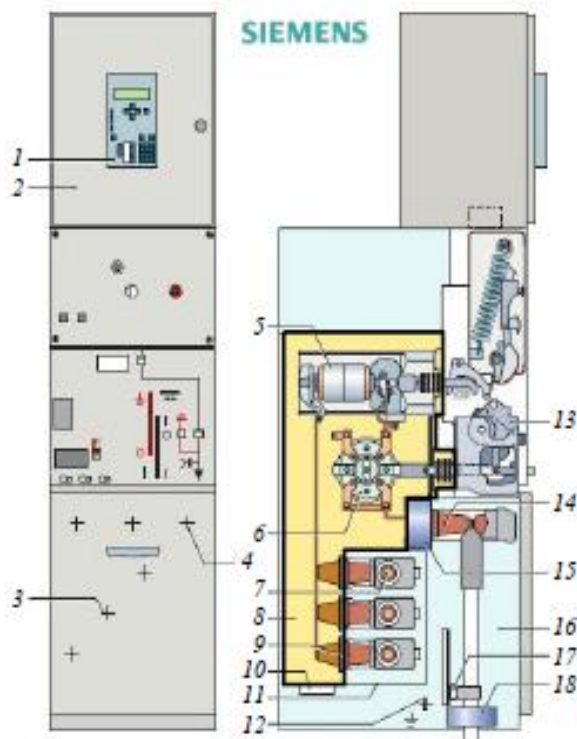


Рисунок 3.2 - Конструкція КРПЕ серії 8DH10, тип LS1
(з силовим трансформатором напруги)

На рис.3.2 позначено: 1 – панель системи управління; 2 – низьковольтний відсік; 3 – розташування збірних шин; 4 - розташування кабельних приєднань; 5 – вакуумний вимикач; 6 – трипозиційний вимикач навантаження з функцією заземлюючого роз'єднувача; 7 – система збірних шин; 8 – резервуар, заповнений елегазом; 9 – підключення для збірних шин; 10 - пристрій скидання тиску; 11 – перегородка для збірних шин; 12 – шина заземлення; 13 – пружинний привід вакуумного вимикача; 14 – прохідний ізолятор; 15 – трифазний трансформатор струму; 16 – кабельний відсік; 17 - кабельна несуча ширина; 18 - кабельний знімний трансформатор струму.

Приводні механізми силового вимикача та трипозиційного перемикача розташовані зовні резервуара з елегазом, що забезпечує їх зручну доступність для огляду та обслуговування без порушення герметичності конструкції. Такий дизайн спрощує технічний контроль та підвищує безпеку експлуатації.

Доступ до кабельного відсіку організований з передньої частини пристрою. Для додаткової безпеки передбачено, що зняти кришку кабельного відсіку можна лише за умови попереднього заземлення кабельного приєднання. Це виключає ризик роботи під напругою та сприяє дотриманню норм безпеки під час проведення технічних робіт.

Комплектні розподільчі пристрої серії 8DH10 побудовані за модульним принципом, що дозволяє легко адаптувати їх до різних завдань і потреб електричних мереж. В залежності від функціонального призначення, КРПЕ цієї серії поділяються на п'ять основних типів осередків:

1.Осередок відхідної лінії – використовується для підключення ліній електропередачі та забезпечення розподілу електроенергії до споживачів.

2.Трансформаторний осередок – призначений для підключення силових трансформаторів, які забезпечують зниження або підвищення напруги відповідно до потреб мережі.

3.Вступний осередок – забезпечує введення електроенергії в підстанцію, служить основним елементом для з'єднання з джерелом електроживлення.

4.Осередок секційного вимикача – використовується для розділення секцій шин, що дозволяє організовувати гнучке управління навантаженнями та забезпечувати безперервність електропостачання під час аварійних чи планових робіт.

5.Осередок секційного роз'єднувача без силового вимикача – застосовується для забезпечення роз'єднання секцій без використання

силового комутаційного обладнання, що робить його економічно ефективним для певних завдань.

Така структурна гнучкість дозволяє оптимізувати роботу електричних мереж і підвищує універсальність пристроїв серії 8DH10.

Окрім базових типів осередків, для серії КРПЕ 8DH10 доступні додаткові модулі, які значно розширюють сферу їхнього застосування. До таких належать:

- Кабельні комірки, призначені для підключення додаткових кабелів у мережу.

- Комірки заземлювача збірних шин, які забезпечують можливість заземлення для безпечного виконання ремонтних чи обслуговувальних робіт.

- Комірки для з'єднання в кільцеву схему, що дозволяють організувати гнучке управління енергопостачанням, підвищуючи надійність мережі.

- Комірки секціонування збірних шин, що використовуються для поділу секцій шин і управління навантаженням у мережі.

- Вимірювальні осередки, які мають різні варіанти комплектації та схеми підключення вимірювальних трансформаторів, забезпечуючи точний моніторинг параметрів електричної мережі.

З'єднання сусідніх осередків виконується через спеціальні затискні вкладиші, що з'єднують збірні шини. Такий підхід дозволяє досягти швидкого монтажу та забезпечує надійність електричного контакту.

Розширення чи заміна осередків здійснюється безпосередньо на місці, у приміщенні підстанції, без необхідності демонтажу всієї установки. Це значно полегшує модернізацію обладнання та адаптацію до нових потреб мережі[16,17].

Основні технічні характеристики КРПЕ цієї серії приведені у табл.3.2.

Таблиця 3.2 - Основні технічні характеристики КРПЕ серії 8DH10

Параметр	Величина
Номинальна напруга, кВ	7,2 - 24
Номинальний струм збірних шин, А	400 - 630
Номинальний струм відключення силового вакуумного вимикача, кА	20 - 25
Номинальний струм термічної стійкості за 3 с, кА	20
Номинальний струм електродинамічної стійкості, кА	50 - 63
Габаритні розміри: -ширина, мм -глибина, мм -висота, мм	500 1100 1600
Маса, кг	320 - 380

Комплектний розподільчий пристрій серії RM6, вироблений компанією Schneider Electric [9], розроблений для використання в розподільних мережах напругою 6–20 кВ, зокрема в радіальних, магістральних і петлевих схемах електропостачання (рис.3.3). Цей пристрій забезпечує високу надійність і гнучкість у роботі, що робить його ефективним рішенням для сучасних енергетичних систем.

Основне призначення RM6 – виконання функцій підключення, живлення і захисту розподільчих трансформаторів потужністю до 3000 кВА. Пристрій дозволяє працювати з одним або двома трансформаторами завдяки гнучкому вибору комутаційного обладнання. Для цього використовуються:

- Комбінація вимикача навантаження з плавкими запобіжниками, яка забезпечує простоту конструкції, зменшення витрат і високу ефективність при роботі з типовими навантаженнями.

- Силовий вимикач, що дозволяє захистити трансформатори та мережу від коротких замикань і перевантажень, забезпечуючи більш широкий спектр функцій захисту.

Особливістю конструкції RM6 є її компактність і можливість використання елегазової ізоляції, що забезпечує високу електричну міцність, надійність і тривалий термін експлуатації без необхідності частого обслуговування. Герметичний корпус пристрою ефективно захищає внутрішні елементи від зовнішніх впливів, таких як пил, волога чи агресивні середовища, що робить RM6 придатним для використання в складних умовах експлуатації, включаючи промислові об'єкти та зони з важким кліматом.

RM6 також має модульну конструкцію, яка дозволяє гнучко адаптувати пристрій до різних потреб мережі. Це забезпечується можливістю додавання чи заміни функціональних блоків, що дозволяє легко змінювати конфігурацію КРПЕ відповідно до вимог проекту.

Пристрій широко використовується в муніципальних і промислових електричних мережах, забезпечуючи не лише стабільне електропостачання, але й захист обладнання від можливих пошкоджень, спричинених аварійними режимами. Завдяки своїй надійності, довговічності та зручності у використанні, RM6 є одним із найпопулярніших рішень у своєму класі.



Рисунок 3.3 – КРПЕ серії RM6

Усі комутаційні апарати, збірні шини та струмоведучі частини КРПЕ серії RM6 розташовані в герметичному корпусі з нержавіючої сталі, який забезпечує високий ступінь захисту IP67. Така конструкція гарантує повну ізоляцію обладнання від зовнішніх впливів, включаючи пил, вологу та агресивні середовища, що робить пристрій надзвичайно надійним навіть у складних умовах експлуатації.

Особливо примітно, що КРПЕ RM6 успішно пройшло випробування відповідно до міжнародних стандартів IEC 60529 [10] та ДОСТ 14254 [11], які визначають вимоги до ступеня захисту IP67. В ході тестування пристрій витримав занурення у воду на глибину, яка повністю покриває його корпус, протягом 30 хвилин при подачі номінальної напруги 20 кВ. При цьому працездатність обладнання залишилася на належному рівні, що підтверджує його високу надійність і безпеку.

Така герметичність не тільки забезпечує захист внутрішніх елементів, але й сприяє тривалому терміну служби пристрою без необхідності частого обслуговування. Завдяки цьому RM6 стає ідеальним вибором для встановлення в місцях із підвищеною вологістю, запиленістю чи в агресивному кліматі, таких як промислові об'єкти, прибережні зони або регіони з частими опадами.

Конструкція КРПЕ серії RM6 базується на модульному принципі, що забезпечує гнучкість у конфігурації пристрою. Залежно від потреб мережі, можливе встановлення осередків із 1, 2, 3 або 4 кабельними приєднаннями. При цьому конструкція не передбачає подальшого розширення вже змонтованого обладнання, що слід враховувати під час проектування системи.

Для захисту різних типів обладнання КРПЕ RM6 пропонується у п'яти функціональних виконаннях та трьох модифікаціях корпусів. Захист від надструмів забезпечується завдяки двом основним комутаційним рішенням:

- Вимикач навантаження в комбінації з плавкими запобіжниками, який є економічним і надійним вибором для стандартних умов експлуатації.

- Силовий вимикач, здатний працювати з номінальними струмами 200 А або, за потреби, 630 А, що робить його придатним для мереж із високими навантаженнями.

Особливістю пристрою є можливість модульного нарощування у Г- або Т-подібній конфігурації. Це дозволяє ефективно модернізувати існуючу підстанцію без суттєвих змін у її загальній архітектурі, забезпечуючи підвищення пропускної здатності та адаптацію до нових умов роботи.

КРПЕ RM6 ідеально підходить для реалізації сучасних схем електропостачання завдяки своїй універсальності, надійності та можливостям гнучкого налаштування під конкретні вимоги мережі.

Отже, в даному розділі здійснено детальний аналітичний огляд конструкцій сучасних розподільчих пристроїв середньої напруги 6-35 кВ з елегазовою ізоляцією, що виробляються провідними світовими компаніями. Порівняно з традиційними для України розподільними пристроями, які використовують повітряну ізоляцію, було проаналізовано ряд ключових переваг застосування елегазових технологій.

Елегазова ізоляція значно підвищує ефективність роботи пристроїв завдяки її високій електричній міцності та можливості компактного розміщення силових елементів у герметичних корпусах. Це забезпечує зменшення розмірів обладнання, що є важливим фактором для модернізації існуючих підстанцій та зменшення витрат на їх обслуговування. Додатково, елегазова ізоляція дозволяє знизити ризик від атмосферних впливів, таких як пил, волога або агресивні середовища, що робить ці пристрої придатними для використання в складних експлуатаційних умовах.

Порівняно з повітряною ізоляцією, де необхідно дотримуватись значних відстаней між елементами, щоб уникнути коротких замикань, елегазова технологія дозволяє значно зменшити ці відстані, що сприяє більш компактній і ефективній конструкції. Це також дає змогу зменшити витрати на транспортування та монтаж обладнання, а також підвищити його надійність і безпеку.

Отже, аналіз конструкцій КРПЕ з елегазовою ізоляцією показав їх значні переваги в плані надійності, економічності та здатності працювати в складних кліматичних умовах, що робить їх актуальними для застосування в Україні, де сучасні вимоги до енергетичних мереж вимагають підвищення рівня автоматизації та безперервності електропостачання.

3.2. Результати ресурсних випробувань вакуумних дугогасних камер полюса високовольтного вимикача

У зв'язку з тим, що КРПЕ містить у своєму складі вакуумні вимикачі, треба оцінити їх комутаційний ресурс також.

У вакуумних дугогасних камерах (ВДК) за рахунок механічного замикання та розмикання контактів у вакуумному середовищі здійснюється комутація електричних кіл. Ресурс ВДК обмежується втратою її здатності, що відключає, при якій виключається повторний пробій вакуумного проміжку між контактами, що розходяться при переході струму через нуль. На ефективність відключення впливають процеси у вакуумній дузі, фізичний стан матеріалу контактів в процесі відключення та величина напруги ланцюга.

При збільшенні напруги комутованого ланцюга потрібно збільшення зазору між контактами. Однак зі збільшенням зазору виникають труднощі зі збереженням параметрів дуги та стану контактів, що виключає повторний пробій вакуумного проміжку. Тому при напругах понад 100 кВ замість однієї ВДК із габаритами та зазором між контактами,

розрахованими на повну напругу, у вимикачі застосовуються конструкції полюса зі з'єднаними послідовно декількома ВДК з габаритами та міжконтактними проміжками, розрахованими на меншу напругу.

У такому полюсі ВДК сполучаються шиною. Через утворення ємності «шина-земля» ці ВДК будуть працювати в різних режимах, а отже, їх контакти будуть знаходитися в різних умовах. Очевидно, що чим більша величина ємності «шина-земля», тим ця відмінність буде більшою. Існує два варіанти побудови полюса вимикача: з вертикальним та горизонтальним розташуванням ВДК. Відомо [17], що при вертикальному розташуванні ВДК величина ємності «шина-земля» більша, ніж при горизонтальному розташуванні. Однак при вертикальному розташуванні ВДК спрощується конструкція полюса.

Нижче представлені результати аналізу стану контактів ВДК типу КДВА-60-31,5/2000 у складі полюса вимикача на 110 кВ після ресурсних випробувань при струмі короткого замикання, що дорівнює 31,5 кА. У полюсі дві камери включені послідовно та розташовані вертикально. Також проведено порівняння стану контактів цих ВДК зі станом контактів ВДК типу КДВА5-10-20/1600 після ресурсних випробувань при струмі короткого замикання, що дорівнює 20 кА. Конструктивні дані цих ВДК наведено у табл.3.3. Як видно, у ВДК КДВА5-10-20/1600 питоме струмове навантаження контактів менше. У ВДК КДВА-60-31,5/2000 контакти плоскі, у ВДК КДВА5-10-20/1600 один контакт має опуклу поверхню, а інший – увігнуту. В обох камерах контакти виконані з матеріалу ХД-70, а у міжконтактному проміжку при проходженні струму створюється аксіальне магнітне поле.

Таблиця 1.3 - 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 поверхні контактів обох ВДК після комутаційних випробувань, а також структури їх поверхневого шару не виявив суттєвих відмінностей. На рис.3.4 наведена фотографія поверхні одного з контактів. Як видно, робоча поверхня контакту оплавлена, а на бічній поверхні є наплавлення його матеріалу. Останнє пояснюється видавлюванням матеріалу контактів, що розплавляється під дією дуги, яка спалахує при їх замиканні. Тим більше, що замикання відбувається при додатковому підтисканні, що дорівнює 3000 Н. Видавлюванням розплавленого матеріалу можна пояснити також зношування контактів при випробуванні полюса.



Рисунок 3.4 - Фотографія робочої поверхні контакту ВДК після ресурсних випробувань

На рис.3.5 наведена фотографія шліфу поверхневого шару контакту ВДК після ресурсних випробувань. Видно, що результатом оплавлення є

утворення вторинного шару із зміненою структурою. Як показав металографічний аналіз, розподіл глибини оплавлення такі:

- у середній частині (близько половини діаметра) вона знаходиться в межах від 40-60 до 240-270 мкм;

- на решті поверхні плоскої частини контакту – в межах від 40-60 до 240-270 мкм;

- на ділянці переходу із плоскої частини поверхні контакту на бічну – до 90-180 мм.

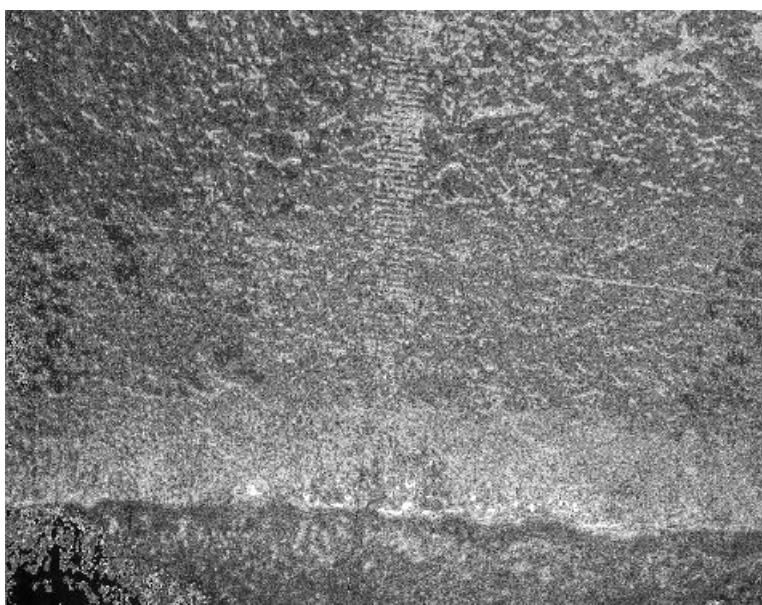


Рисунок 3.5 - Фотографія шліфу поверхневого шару контакту ВДК після ресурсних випробувань

Отримані результати аналізу показують, що зовнішній вигляд оплавлення, структура оплавленого шару і глибина оплавлення багато в чому ідентичні з даними, отриманими з ВДК КДВА5-10-20/1600, незважаючи на суттєві відмінності в геометрії, значеннях випробувальних струмів та напруги, а також кількості циклів комутацій. 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. Неоднорідність глибини оплавлення, особливо помітна у місцях переходу з плоскої

частини поверхні контакту на бічну, обумовлена порушенням співвісності та паралельності контактів. Найбільш глибока оплавлення та величини викидів оплавленого матеріалу на бічну поверхню відповідають місцям з найменшим зазором. У міру зношування контактів відбувається більш щільний їх дотик і більш рівномірний вплив дуги. На сферичних контактах КДВА5-10-20/1600 нерівномірність оплавлення визначалася ще геометрією контактів, що призводить до переважання зносу на краях контакту і виявляється у зміні кривизни сфери.

1. Порівняна величина максимальної глибини оплавлення робочих поверхонь обох камер свідчить про ідентичність структури дуги та питомих теплових навантажень цих поверхонь. Глибина оплавлення при одній і тій же густині струму визначається фізичними властивостями матеріалу контакту та структури сформованого під впливом дуги вторинного перехідного шару. У ході випробувань відбуваються одночасно процеси формування вторинного шару кордону з основним матеріалом контакту та його випаровування з поверхні контакту. У вторинному шарі у зв'язку з переважним випаровуванням міді змінюється співвідношення хром-мідь, і структура хрому стає дрібнозернистою.

2. Шарувата структура напливів на бічних поверхнях обох камер свідчить про те, що витіснення розплавленого матеріалу з робочої зони відбувається в місця з меншим тепловим впливом дуги. Великі напливи на бічній поверхні контактів зі сферичною формою обумовлені відмінністю циклів комутації та більш інтенсивним зношуванням країв контактів такої форми.

Однак порівняння стану поверхневого шару контактів ВДК, що пройшли ресурсні випробування, виявило одну істотну відмінність. Уздовж вторинного шару контактів ВДК типу КДВ5А-10-20/1600 були тріщини, пори та раковини. Таких порушень у вторинному шарі контактів ВДК типу КДВ А-60-31,5/2000 не виявлено. Очевидно, це пояснюється тим, що кількість циклів комутації при випробуванні ВДК типу КДВ А-60-

31,5/2000 було менше, ніж при випробуванні ВДК типу КДВ5А-10-20/1600.

Таким чином, аналіз стану робочих поверхонь контактів ВДК після ресурсних випробувань дозволяє укласти, що в процесі роботи ВДК у складі вимикача відбувається оплавлення цих поверхонь. Причому такий стан робочих поверхонь контактів ВДК не залежить від їх геометрії, значень комутованих струмів та кількості циклів комутації.

3.3. Комутаційні випробування експериментального вакуумного вимикача

На початковому етапі контролю параметрів вакуумного вимикача комутаційні характеристики визначаються у лабораторних умовах шляхом випробування вимикача, наприклад, на установках за схемою Вейля-Добке [18], що формус на випробовуваній вакуумній дугогасильній камері (ВДК) струм короткого замикання (КЗ) і перехідна відновлювальна напруга, що з'являється (ПВН).

Об'єктом цього дослідження стала експериментальна ВДК у складі вакуумного вимикача типу ВВТ-10–20, призначеного для комутації електричних кіл середнього класу напруги у трифазних мережах змінного струму промислової частоти з ізольованою нейтраллю. Слід зазначити, що супровідна документація на експериментальні ВДК (рис.3.6) містила лише відомості про випробування при напрузі (42кВ) та ході контактів (8+2мм).

Одна з експериментальних ВДК була відкрита. Зовнішній вигляд її вузлів та деталей свідчить про високий рівень вакуумно-технологічної обробки. У камері використовуються плоскі торцеві контакти. Контактний матеріал, ймовірно, є мідь-хромовою композицією. У контактно-екранній системі присутні підковоподібні полюси 3, характерні для створення поздовжнього магнітного поля за рахунок струму вимкнення [19–22].

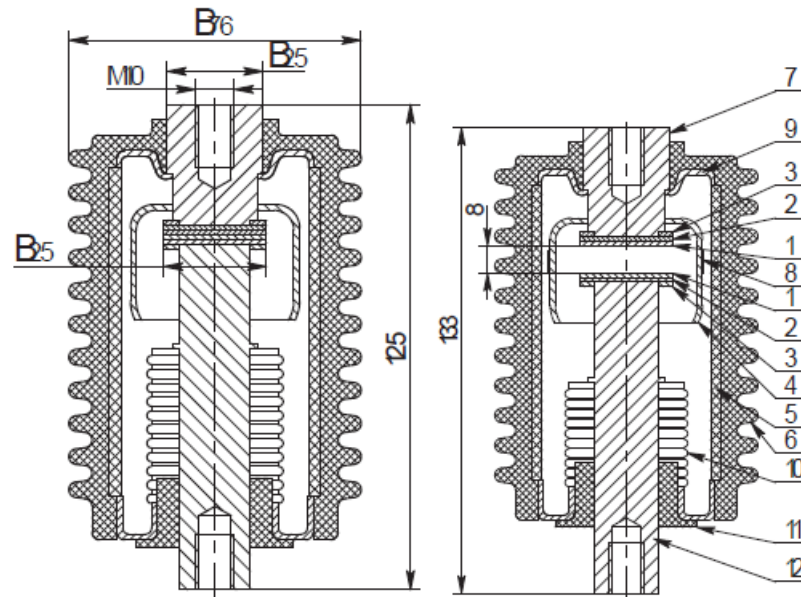


Рисунок 3.6 - Експериментальна вакуумна дугогасна камера: 1 - контактний майданчик; 2 – підкладка; 3 – полюс; 4 – феромагнітний екран; 5 – керамічний ізолятор; 6 – силіконовий ізолятор; 7 – нерухомий контакт; 8 – газопоглинач; 9 – фланець; 10 – сильфон; 11 - напрямна втулка; 12 - рухомий контакт

Зважаючи на відсутність у технічній документації на ВДК ряду ключових параметрів, рішення про режими випробування було прийнято на основі співставлення геометричних розмірів досліджуваних ВДК, таких як діаметри рухомого та нерухомого струмовиводів, габаритні розміри ВДК, з розмірами ВДК, параметри яких відомі. Діаметр контактів експериментальної ВДК – 25 мм. Торцеві контакти аналогічних розмірів без поздовжнього магнітного поля здатні відключати максимальний дифузний струм дуги 10 кА. Виходячи з цих міркувань, було прийнято такі параметри ВДК:

- 1) робоча напруга – 10 кВ;
- 2) найбільша допустима напруга – 12 кВ (діюче значення);
- 3) струм відключення - 10 кА (діюче значення);

4) номінальний струм - 630 А (діюче значення).

Особливість конструкції даної ВДК - наявність феромагнітного екрана 4, що володіє низькими теплопровідними властивостями, гальванічно пов'язаного з нерухомим контактом 7. Ці обидва фактори: низька теплопровідність та гальванічний зв'язок екрана з контактом ВДК, знижують відключаючу здатність.

Інша особливість конструкції - сумірність відстані між розведеними контактами з відстанню між боковою поверхнею контакту та екраном. Така конфігурація створює умови для виникнення дуг між екраном та контактом, причому ця відстань зменшується у міру збільшення ходу контактів ВДК, а у разі коливань рухомого контакту при відключенні може стати мінімальною.

Конструктивно вимикач складається з трьох експериментальних ВДК (по одному в кожному з полюсів вимикача), приводного механізму та пристрою управління. Усередині ВДК розташовані два контакти - рухомий 12 і нерухомий 7. У ввімкненому стані вимикача пружинний механізм забезпечує щільне підтискання контактів один до одного. При відключенні струму контакти механічно розсуваються зі швидкістю 1 м/с. При плавленні контактів в останній точці їх дотику утворюються пари металу, що сприяють виникненню електричної дуги, яка горить до тих пір, поки струм у ланцюгу не перейде через нуль [19-21].

З розплавленого металу витягується тонкий провідник, що електрично зв'язує контакти. Внаслідок локального перегріву провідника, при протіканні по ньому струму величезної щільності він вибухає, заповнюючи простір між контактами мікрокраплями металу, що створюють середовище, через яке і відбувається замикання струму, при цьому напруга між контактами становить лише кілька відсотків від номінальної величини напруги вимикача.

Після згасання дуги між контактами відновлюється висока напруга, при цьому залишковий струм у вимикачі відсутній, що дає можливість

застосовувати для випробування відключаючої здатності вимикача два джерела живлення, синхронізованих між собою: джерело великого струму малої напруги та джерело високої напруги малого струму. Ця обставина покладена в основу реалізації синтетичних випробувань.

Для проведення синтетичних випробувань створено випробувальний стенд, який реалізує схему Вейля-Добке (рис.3.7), що включає два синхронізованих електричних контурів [20]. Перший – сильноточний контур генератора імпульсних струмів (ГІС), у якому створюється струм КЗ, другий - високовольтний контур генератора імпульсної напруги (ГІН), в якому формується ПВН. Параметри контурів ГІН та ГІС.

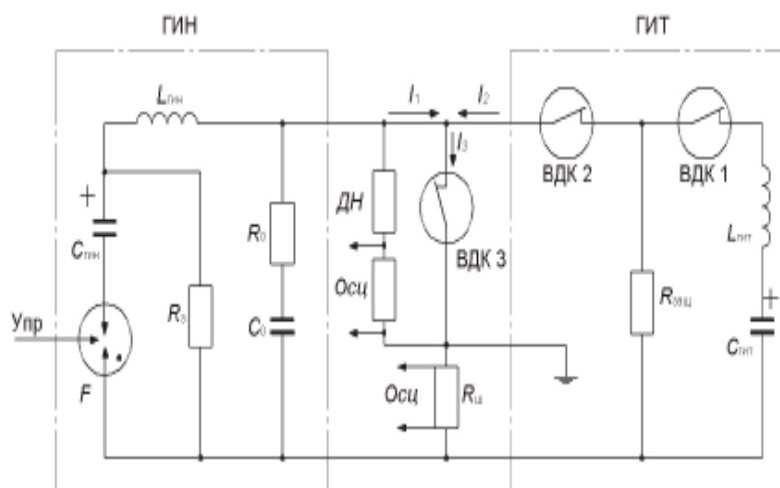


Рисунок 3.7 - Принципова схема випробувального стенду: $C_{ГІН}$ та $C_{ГІС}$ – конденсаторні батареї; $L_{ГІН}$ та $L_{ГІТ}$ – індуктивності контурів; ВДК 1 – комутаційна ВДК; ВДК 2 - захисна ВДК; ВДК 3 - випробувана ВДК; R_0 та C_0 – резистивний та ємнісний елементи схеми формування ПВН; $R_З$ - зарядний резистор; F – повітряний високовольтний керований розрядник; I_1 – струм ГІН; I_2 – струм ГІТ; I_3 – струм у випробуваній ВДК; ДН - резистивний дільник напруги; $R_{зах}$ – захисний резистор; $R_{ш}$ - опір струмового шунта

Вихідний стан схеми: конденсаторні батареї $C_{ГІС}$, $C_{ГІН}$ – заряджені; контакти ВДК 1 – розімкнуті; ВДК 2, 3 – замкнуті.

Для початку випробувань необхідно подати команду на замикання контактів комутаційної ВДК 1. Після їх замикання відбувається розряд батареї $C_{г1с}$ і через випробувану ВДК 3 починає протікати струм промислової частоти I_2 . Через 0,5 мілісекунди контакти випробуваної ВДК 3 розмикаються, ініціюючи електричний розряд у міжконтактний проміжок. Синхронно з контактами випробуваної ВДК 3 розмикаються контакти захисної ВДК 2, між якими також виникає електричний розряд.

Приблизно за пів мілісекунди до проходження струму I_2 через нульове значення системи управління випробувальним стендом подається команда на спрацювання повітряного розрядника F . При його спрацюванні відбувається розряд батареї $C_{г1н}$ на випробувану ВДК 3. При цьому струм I_1 з частотою 500 Гц підсумовується із струмом I_2 .

З цього моменту через контакти ВДК 3 протікає сумарний струм I_3 , а в електричній дузі захисної ВДК 2 протікає струм, що дорівнює різниці струмів I_2 і I_1 . При зрівнюванні цих струмів відбувається гасіння дуги та відновлення електричної міцності захисної ВДК 2, тим самим здійснюється гарантоване відключення сильно точного контуру ПІС від випробуваної ВДК 3. Оскільки відключення захисної ВДК 2 відбувається раніше переходу струму у випробуваній ВДК 3 через нуль, то, починаючи з цього моменту і до переходу струму через нуль, через випробувану ВДК 3 протікає тільки струм I_1 і всі подальші процеси в ній визначаються параметрами високовольтного контуру ГІН.

Якщо швидкість відновлення електричної міцності вище, ніж швидкість ПВН, настає наступний етап процесу комутації – на контактах ВДК 3 з'являється напруга, що повертається. Якщо після 0,3 с у ВДК 3 не відбулося повторного запалювання дуги, то можна говорити про те, що відбулося успішне відключення струму короткого замикання.

В іншому випадку відбувається повторне запалення дуги (відмова). Відмова може відбутися як на стадії ПВН, так і на стадії напруги що повертається. У цьому випадку протягом напівперіоду в ланцюзі розряду

ГІН у протилежному напрямі потече струм із частотою 500 Гц. У момент чергового переходу струму через нуль відбувається відновлення напруги на контактах ВДК 3, при цьому напруга має протилежну полярність та меншу амплітуду. Подібні процеси повторюватимуться до того моменту, доки відновиться електрична міцність ВДК 3.

Синтетичні випробування показали, що експериментальні ВДК, що досліджувались, у складі вакуумного вимикача типу ВВТ-10–20 успішно відключають струм до 18,3 кА при ПВН 0,85 кВ. Початкове припущення про те, що випробуваний ВВ, що містить по одній експериментальній ВДК у кожному зі своїх полюсів, здатний до роботи в мережах напруги класом 10 кВ, виявилося невірним. Кількість відмов у комутації для дугогасних камер всіх фаз ВВ свідчить про те, що конструкція контактно-екранної системи випробуваної ВДК не забезпечує відключення номінальних струмів 10 кА.

Показано, що послідовне включення двох ВДК у кожному з полюсів ВВ дозволяє відключати струми 10 кА при ПВН, характером для вимикачів класу напруги 10 кВ.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3:

Елегазова ізоляція значно підвищує ефективність роботи пристроїв завдяки її високій електричній міцності та можливості компактного розміщення силових елементів у герметичних корпусах. Це забезпечує зменшення розмірів обладнання, що є важливим фактором для модернізації існуючих підстанцій та зменшення витрат на їх обслуговування. Додатково, елегазова ізоляція дозволяє знизити ризик від атмосферних впливів, таких як пил, волога або агресивні середовища, що робить ці пристрої придатними для використання в складних експлуатаційних умовах.

Порівняно з повітряною ізоляцією, де необхідно дотримуватись значних відстаней між елементами, щоб уникнути коротких замикань, елегазова технологія дозволяє значно зменшити ці відстані, що сприяє більш компактній і ефективній конструкції. Це також дає змогу зменшити витрати на транспортування та монтаж обладнання, а також підвищити його надійність і безпеку.

Аналіз конструкцій КРПЕ з елегазовою ізоляцією показав їх значні переваги в плані надійності, економічності та здатності працювати в складних кліматичних умовах, що робить їх актуальними для застосування в Україні, де сучасні вимоги до енергетичних мереж вимагають підвищення рівня автоматизації та безперервності електропостачання.

Порівняно з повітряною ізоляцією, елегазова технологія дозволяє значно зменшити ці відстані, що сприяє більш компактній і ефективній конструкції. Це також дає змогу зменшити витрати на транспортування та монтаж обладнання, а також підвищити його надійність і безпеку.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Елегаз, як дугогасне середовище знайшло широке застосування в різних електротехнічних пристроях, в силу ряду своїх переваг перед вже існуючими діелектричними середовищами, які використовуються в електротехнічному устаткуванні. Завдяки його властивостям, у обладнання, що використовує елегаз, суттєво зменшуються маса та габарити, а також знижуються витрати на обслуговування.

В даний час елегазові вимикачі найбільш популярні на напругу 110 ... 1150 кВ. Ведуться численні дослідження з розробки малогабаритних електричних вимикачів на напругу 10...35 кВ, які складають конкуренцію вакуумним вимикачам

Проведений аналіз стану робочих поверхонь контактів ВДК після ресурсних випробувань дозволяє укласти, що в процесі роботи ВДК у складі вимикача відбувається оплавлення цих поверхонь. Причому такий стан робочих поверхонь контактів ВДК не залежить від їх геометрії, значень комутованих струмів та кількості циклів комутації.

Синтетичні випробування показали, що експериментальні ВДК, що досліджувались, у складі вакуумного вимикача типу ВВТ-10–20 успішно відключають струм до 18,3 кА при ПВН 0,85 кВ. Початкове припущення про те, що випробуваний ВВ, що містить по одній експериментальній ВДК у кожному зі своїх полюсів, здатний до роботи в мережах напруги класом 10 кВ, виявилось невірним. Кількість відмов у комутації для дугогасних камер всіх фаз ВВ свідчить про те, що конструкція контактно-екранної системи випробуваної ВДК не забезпечує відключення номінальних струмів 10 кА. Показано, що послідовне включення двох ВДК у кожному з полюсів ВВ дозволяє відключати струми 10 кА при ПВН, характером для вимикачів класу напруги 10 кВ.

Порівняно з повітряною ізоляцією, яка вимагає дотримання значних відстаней між елементами для запобігання КЗ, елегазова технологія дозволяє суттєво зменшити ці відстані. Це сприяє створенню більш

компактних і ефективних конструкцій. Додатково, використання елегазової ізоляції дозволяє скоротити витрати на транспортування та монтаж обладнання, а також підвищити його експлуатаційну надійність і безпеку. Завдяки зменшенню габаритів, такі рішення часто стають оптимальними для використання в умовах обмеженого простору, наприклад, у міських підстанціях або промислових об'єктах з високими вимогами до безпеки та ефективності.

Аналіз конструкцій комплектних розподільчих пристроїв з елегазовою ізоляцією (КРПЕ) демонструє їх значні переваги з точки зору надійності, економічності та здатності ефективно функціонувати в складних кліматичних умовах. Ці характеристики роблять КРПЕ особливо актуальними для застосування в Україні, де енергетична інфраструктура потребує модернізації відповідно до сучасних вимог.

Зокрема, використання елегазової ізоляції забезпечує високий рівень безпеки та довговічності обладнання, що дозволяє зменшити ризики аварійних ситуацій. Компактність таких пристроїв є важливою перевагою для їх використання у міських умовах, де обмежений простір є ключовим фактором. Економічні переваги, як-от зниження витрат на обслуговування та енергетичні втрати, сприяють зменшенню загальної вартості володіння обладнанням.

Крім того, КРПЕ відповідають вимогам підвищення рівня автоматизації та безперервності електропостачання, що є критично важливим для забезпечення стабільної роботи енергомереж. Це особливо актуально в умовах інтеграції відновлюваних джерел енергії та розвитку розподілених енергосистем, які вимагають гнучкості, точного моніторингу та швидкого реагування на зміни в навантаженнях і умовах експлуатації. Таким чином, впровадження КРПЕ може стати важливим кроком на шляху до модернізації енергетичної галузі України, забезпечуючи відповідність світовим стандартам ефективності та надійності.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Sulphur hexafluoride in modern medium-voltage switchgear: advantages, hazards, and environmental impact / A. Boskovic et al. Journal of the Serbian Chemical Society. 2024. Vol. 89, no. 5. P. 693–704. DOI: <https://doi.org/10.2298/jsc231203008b>.

2. Клименко Б. В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс (видання друге, допрацьоване та доповнене) : навчальний посібник. Харків : Видавництво «Точка», 2018. 400 с.

3. Regulation (EU) No. 517/2014 of the European Parliament and of the Council on fluorinated greenhouse gases and repealing Regulation (EC) No. 842/2006. Official Journal of the European Union. 2024. 20 May. P. 195 230. URL: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/eur133686.pdf>.

4. Yeckley R. N., Colclaser R. G. First SF6 breaker design: Westinghouse engineers tell the inside story [History]. IEEE Power and Energy Magazine. 2016. Vol. 14, no. 3. P. 80–95. DOI: <https://doi.org/10.1109/mpe.2016.2525238>.

5. Franck C. M., Chachereau A., Pachin J. SF6-free gas-insulated switchgear: current status and future trends. IEEE Electrical Insulation Magazine. 2021. Vol. 37, no. 1. P. 7–16. DOI: <https://doi.org/10.1109/mei.2021.9290463>.

6. Purnomoadi A. P., Rodrigo Mor A., Smit J. J. Spacer flashover in Gas Insulated Switchgear (GIS) with humid SF6 under different electrical stresses. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2020. Vol. 116. 105559. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105559>.

7. Правила улаштування електроустановок. Харків: Форт, 2017. 760с.

8. SIEMENS AG. Switchgear Type 8DH10 up to 24 kV, Gas-Insulated, Extendable. Medium-Voltage Switchgear. Catalog HA 41.11. 2018. 44 p. URL: <http://www.infrastructure-cities.siemens.com>.

cn/powerdistribution/downloadCenter/upload/8DH10%20Up%20to%2024kV_GIS_Catalogue_EN.pdf.

9. Schneider Electric Industries SAS, Merlin Gerin. Ring Main Unit. RM6 24Kv.Catalogue.10.2016.URL:

https://www.studiecd.dk/pdfs/Kap_13/MV_Anlaeg/RM6/amted3980_32en.pdf.

10. ABB. SafeRing/ SafePlus 36 Gas Insulated Secondary Switchgear. 2022. 94 p. URL:

[https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1VDD](https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1VDD006114%20GB&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch&DocumentRevisionId=B)

[006114%20GB&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch&DocumentRevisionId=B](https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1VDD006114%20GB&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch&DocumentRevisionId=B).

11. Green gas for grid as an eco-friendly alternative insulation gas to SF6: a review / B. Pan et al. Applied Sciences. 2020. Vol. 10, no. 7. 2526. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10072526>.

12. Recent development of two alternative gases to SF6 for high voltage electrical power applications / J. Owens et al. Energies. 2021. Vol. 14, no. 16. 5051. DO http://en.wikipedia.org/wiki/Henri_Moissan.

13. <https://doi.org/10.3390/en14165051>.

14. IEC 60529. Degrees of protection provided by enclosures (IP Code).

15. Розподільні пристрої з елегазовою ізоляцією SafeRing & SafePlus: безпечність, надійність, компактність // Електротехніка і електромеханіка. – 2019. – № 5. – С. 67-72.

16. Розподільні пристрої з елегазовою ізоляцією SafeRing & SafePlus: безпечність, надійність, компактність // Електротехніка і електромеханіка. – 2020. – № 6. – С. 74-78.

17. Seung-Bok Choi, Fauziah Shahul Hamid and Liyuan Han. Research on High Voltage Circuit Breaker Mechanical Faults Online Monitoring // Applied Mechanics and Materials. 2016. Volume 521, pp. 362-365. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.521.362>.

18. Guishu Liang, Hejin Yuan, and Baoshu Li. A Fault Diagnosis Method of High Voltage Circuit Breaker Based on Moving Contact Motion Trajectory and ELM // *Mathematical Problems in Engineering*. 2016.
19. Yang Z.-Z., Xu J.-Y., Li B., Liu Y. Design of monitoring system for mechanical status of high voltage vacuum circuit breaker // *High Voltage Apparatus*. 2015. V. 49, no. 8, pp. 26–34.
20. Chen J., Hu Z., Su X. Key technology design to on-line monitoring of mechanical characteristics for intelligent vacuum circuit breaker // *High Voltage Apparatus*. 2016. V. 50, No. 4, pp. 108–112.
21. Tahir Midhat Lazimov, Samir Ali Huseyn Akhundov. Research on Influence of High Voltage Circuit Breakers' Characteristics on Switching Overvoltages and Overcurrents. Conference: Third International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ELECO-2023At: Bursa, Turkey. DOI:10.13140/RG.2.1.4216.7205.
22. Agarwal M.S., Goswami P.K. Study of High-current Vacuum Arcs in Axial Magnetic Fields // *International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)*. – Mumbai, 2014. – P. 157–160.