

Вінницький національний технічний університет

Факультет електроенергетики та електромеханіки

Кафедра електричних станцій і систем

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

**ЗАСТОСУВАННЯ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ У МЕРЕЖАХ СЕРЕДНЬОЇ
НАПРУГИ: АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ**

Виконала: студентка 4 курсу, групи ЕСМ-216
спеціальності 141 – «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
за ОП «Електричні системи та мережі»,
Гнатюк Р.О.

Керівник: к.т.н., доц., доцентка каф. ЕСС
Собчук.Н.В.

« 04 » 06 2025 р.

Рецензент: доц. каф. ЕССЕМ, к.т.н.
(наук.ступінь, вч.звання, назва кафедри)

О.М. Кравченко
« 09 » 06 2025 р.

Допущено до захисту
завідувач кафедри ЕСС
д.т.н., професор Комар В.О.

« 06 » 06 2025 р.

Вінниця ВНТУ 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій та систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань – 14 «Електрична інженерія»
Спеціальність – 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітньо-професійна програма – Електричні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСС

д.т.н., професор Комар В. О.

«20» березня 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Гнатюк Руслана Олександрівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Застосування вакуумних вимикачів у мережах середньої напруги: аналіз ефективності та перспективи розвитку».

Керівник роботи к.т.н., доц., доцента каф. ЕСС Собчук Н.В

затверджена наказом вищого навчального закладу від 20 березня 2025, #80

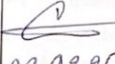
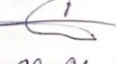
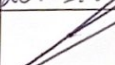
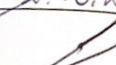
2. Термін подання студентом роботи 03 червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: 1. ДСТУ EN 62271-100:2017. Вимикачі змінного струму високої напруги – Технічні вимоги та випробування. 2. Андрющенко В.Л., Петренко А.В. Електричні апарати: навчальний посібник. – Київ: КНУБА, 2020. – 192 с.

4. Зміст текстової частини: ВСТУП. 1.Принцип роботи вакуумних вимикачів. 2.Аналіз ефективності застосування у мережах середньої напруги. 3.Перспективи розвитку вакуумної комутаційної техніки. 4.Практична частина. 5.Охорона праці. ВИСНОВКИ. Список використаних джерел.

5. Перелік ілюстративного матеріалу(з точним зазначенням обов'язкових креслень)1.Актуальність роботи; Мета; Основні задачі дослідження. 2. Конструкція вакуумного вимикача. 3. Порівняння типів вимикачів середньої напруги. 4. Перспективи розвитку вакуумної комутаційної техніки. 5. Вибір вакуумного вимикача ABB VD4 для мережі КЛ 10-кВ. 6. Розрахунок вибору вакуумного вимикача. 7. Переваги вибору вакуумного вимикача.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Спеціальна частина	Керівник роботи Собчук Н.В. к.т.н., доц., доцент кафедри ЕСС	 20.03.25	 02.06.25
Охорона праці	Кобилянський О.В. Завідувач кафедри, д. пед. н., професор		

7. Дата видачі завдання 20 березня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапів	Термін виконання етапів роботи		Приймає
		початок	кінець	
1	Формування та затвердження теми БКР	20.03.2025	21.03.2025	
2	Вступ. Огляд літературних джерел	22.03.2025	26.03.2025	
3	Виконання розділу 1 Принцип роботи вакуумних вимикачів	01.04.2025	06.04.2025	
4	Виконання розділу 2 Аналіз ефективності застосування у мережах середньої напруги	12.04.2025	18.04.2025	
5	Виконання розділу 3 Перспективи розвитку вакуумної комутаційної техніки	19.04.2025	25.04.2025	
6	Виконання розділу 4 Практична частина	26.04.2025	30.04.2025	
7	Виконання розділу 5 Охорона праці	01.05.2025	09.05.2025	
8	Формування висновків по роботі	15.05.2025	20.05.2025	
9	Оформлення пояснювальної записки	21.05.2025	25.05.2025	
10	Виконання графічної частини та оформлення презентації	26.05.2025	30.05.2025	
11	Перевірка БКР на плагіат. Попередній захист БКР	02.06.2025	04.06.2025	
12	Рецензування БКР	05.06.2025	09.06.2025	
13	Захист БКР	10.06.2025	12.06.2025	

Студент

(підпис)

Гнатюк Р.О.

Керівник роботи

(підпис)

Собчук Н.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.311

Гнатюк Руслана Олександрівна «Застосування вакуумних вимикачів у мережах середньої напруги: аналіз ефективності та перспективи розвитку». Бакалаврська кваліфіційна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2025. – 83с., 10 рис., 14 табл., 16 джерел.

Бакалаврська робота містить аналіз конструктивних особливостей і принципів роботи вакуумних вимикачів, дослідження ефективності їх застосування в електричних мережах середньої напруги та перспективи розвитку цієї технології.

У першому розділі детально описано конструкцію, принцип дії вакуумних вимикачів та фізичні процеси гасіння дуги у вакуумному середовищі, наведено їх переваги й недоліки порівняно з іншими типами вимикачів.

Другий розділ присвячений порівнянню технічних характеристик вакуумних, елегазових та повітряних вимикачів, їх економічній ефективності та огляду практичного впровадження в сучасних енергетичних компаніях.

У третьому розділі розглянуто перспективи розвитку вакуумної комутаційної техніки, новітні розробки, тенденції автоматизації та інтеграції з технологіями Smart Grid, а також проаналізовано екологічні переваги застосування вакуумних вимикачів, зокрема можливість заміни обладнання з елегазом (SF₆).

У четвертому розділі здійснено моделювання та розрахунок вибору вакуумного вимикача для конкретної мережі КЛ-10 кВ, порівняно альтернативні варіанти (елегазовий та вакуумний вимикачі) та проведено оцінку їх надійності, коефіцієнту готовності й особливостей технічного обслуговування.

Ключові слова: вакуумний вимикач, середня напруга, комутаційна техніка, елегазовий вимикач, Smart Grid, гасіння дуги, екологічна безпека.

ANNOTATION

Hnatiuk Ruslana Oleksandrivna "Application of Vacuum Circuit Breakers in Medium Voltage Networks: Efficiency Analysis and Development Prospects." Bachelor's diploma thesis. – Vinnytsia: VNTU, 2025. – 83 p., 10 figures, 14 tables, 16 references.

The bachelor's thesis includes an analysis of the structural features and operating principles of vacuum circuit breakers, the study of their efficiency in medium voltage electrical networks, and prospects for the development of this technology.

The first chapter thoroughly describes the structure, operating principle of vacuum circuit breakers, and the physical processes of arc extinguishing in a vacuum environment, highlighting their advantages and disadvantages compared to other types of breakers.

The second chapter is devoted to comparing the technical characteristics of vacuum, SF₆, and air circuit breakers, their economic efficiency, and a review of practical implementations in modern energy companies.

The third chapter discusses the development prospects of vacuum switching technology, recent innovations, trends in automation and integration with Smart Grid technologies, and analyzes the environmental benefits of using vacuum circuit breakers, including the replacement of SF₆ equipment.

The fourth chapter presents modeling and calculations for selecting a vacuum circuit breaker for a specific 10 kV cable line network, compares alternative options (SF₆ and vacuum breakers), and evaluates their reliability, availability factor, and maintenance specifics.

Keywords: vacuum circuit breaker, medium voltage, switching equipment, SF₆ circuit breaker, Smart Grid, arc extinguishing, environmental safety.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1.Принцип роботи вакуумних вимикачів.....	12
1.1 Конструктивні особливості.....	12
1.2 Робочі процеси: гасіння дуги у вакуумі.....	16
1.3 Переваги та недоліки.....	18
2.Аналіз ефективності застосування у мережах середньої напруги.....	20
2.1 Порівняння технічних характеристик вакуумних, элегазових та повітряних вимикачів.....	20
2.2 Економічна ефективність застосування кожного типу вимикачів (аналіз ТСО).....	25
2.3 Приклади впровадження у практиці енергетичних компаній (Україна та Європа).....	30
3.Перспективи розвитку вакуумної комутаційної техніки.....	37
3.1 Новітні розробки.....	37
3.2 Тенденції автоматизації та Smart Grid.....	39
3.3 Екологічні аспекти.....	41
4.Практична частина.....	44
4.1 Розрахунок вибору вакуумного вимикача для мережі КЛ-10 кВ.....	44
4.2 Порівняння альтернативних варіантів вимикачів.....	60
4.3 Оцінка надійності, коефіцієнт готовності, технічне обслуговування.....	62
5.Охрона праці.....	64
5.1 Технічні рішення з безпечної організації будівельно-монтажних робіт на об'єкті.....	64
5.2 Технічні рішення з безпечної організації будівельно-монтажних робіт на об'єкті.....	71
5.3 Пожежна безпека.....	75
ВИСНОВКИ.....	78

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	82
ДОДАТКИ.....	84
ДОДАТОК А Протокол перевірки навчальної роботи.....	85
ДОДАТОК Б. Ілюстративна частина.....	86

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ABB – швейцарсько-шведська компанія-виробник електротехнічного обладнання

VD4 – тип вакуумного вимикача середньої напруги виробництва ABB

GWP – потенціал глобального потепління (Global Warming Potential)

IEC – Міжнародна електротехнічна комісія (International Electrotechnical Commission)

I_n – номінальний струм

$I_{відкл}$ – струм вимкнення

КЗ – коротке замикання

КЛ – кабельна лінія

ЛЕП – лінія електропередачі

РП – розподільчий пункт

SF₆ – гексафторид сірки

Smart Grid – інтелектуальна енергетична система

ТН – трансформатор напруги

ТТ – трансформатор струму

U_n – номінальна напруга

Вступ

Актуальність теми. Електроенергетична система є однією з найбільш критичних інфраструктурних складових будь-якої держави, оскільки її безперервне функціонування забезпечує життєдіяльність соціально-економічних, промислових та комунальних секторів. В умовах децентралізації генерації, зростання обсягів відновлюваних джерел енергії та переходу до інтелектуальних мереж (Smart Grid) особливої важливості набуває модернізація елементів розподільчої інфраструктури. Одним із ключових компонентів цієї інфраструктури є комутаційні апарати середньої напруги, зокрема автоматичні вимикачі, що забезпечують оперативне та захисне керування мережами.

Серед сучасних типів вимикачів особливої уваги заслуговують вакуумні вимикачі (ВВ), які за останні десятиліття суттєво потіснили елегазові й повітряні аналоги завдяки високій комутаційній здатності, довговічності, зниженим вимогам до обслуговування та екологічній безпеці. На відміну від елегазових вимикачів, вакуумні апарати не містять шкідливих парникових газів, що робить їх впровадження доцільним як з технічної, так і з нормативно-екологічної точки зору.

Окрім цього, вакуумні вимикачі забезпечують високу частоту комутацій без значного зношення контактної системи, що критично важливо для умов частих операцій в автоматизованих системах керування. Простіша конструкція, порівняно з елегазовими апаратами, дозволяє реалізувати техніко-економічно обґрунтовані рішення для модернізації існуючих електричних підстанцій, що особливо актуально для України в умовах обмеженого інвестиційного ресурсу.

З огляду на ці фактори, дослідження вакуумних вимикачів як перспективної складової комутаційної техніки в мережах середньої напруги має як практичну, так і наукову значущість. Аналіз їх переваг, особливостей експлуатації, ефективності порівняно з іншими типами вимикачів, а також

вивчення перспектив подальшого розвитку технології є важливою задачею для фахівців галузі електротехніки.

Мета дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є всебічний аналіз ефективності застосування вакуумних вимикачів у розподільчих електричних мережах середньої напруги, визначення їх переваг у порівнянні з іншими типами комутаційної апаратури та формулювання техніко-економічно обґрунтованих рекомендацій щодо впровадження цієї технології в практику енергетичних підприємств.

Завдання дослідження:

1. Провести огляд існуючих типів вимикачів, що застосовуються в мережах середньої напруги.
2. Розглянути фізичні принципи гасіння електричної дуги у вакуумному середовищі.
3. Проаналізувати технічні характеристики вакуумних вимикачів порівняно з іншими типами.
4. Оцінити економічну ефективність застосування ВВ у реальних умовах експлуатації.
5. Дослідити перспективи розвитку вакуумної комутаційної техніки.
6. Сформувати практичні рекомендації щодо впровадження вакуумних вимикачів.

Об'єкт і предмет дослідження. Об'єкт дослідження — процеси комутації в електричних мережах середньої напруги. Предмет дослідження — конструкція, принцип дії, технічні характеристики, експлуатаційні особливості та економічна доцільність використання вакуумних вимикачів у сучасних електроенергетичних системах.

Методи дослідження. У процесі дослідження застосовувались такі методи:

- аналітичний — для вивчення літературних джерел, нормативної документації;

- порівняльний — для зіставлення вакуумних, елегазових і повітряних вимикачів;
- економічного аналізу — для оцінки вартості впровадження та експлуатації;
- метод моделювання — для вибору оптимального типу вимикача в умовах об'єкта.

Структура роботи. Дипломна робота складається зі вступу, чотирьох основних розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. У першому розділі подано загальну характеристику комутаційних апаратів. Другий розділ присвячено порівняльному аналізу вимикачів. У третьому — досліджено приклади впровадження вакуумної техніки в Україні та світі. Четвертий розділ містить практичну частину з моделюванням вибору ВВ для ділянки мережі 10 кВ.

1 ПРИНЦИП РОБОТИ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ

Вакуумні вимикачі (ВВ) функціонують на основі використання вакууму як дугогасильного середовища, що забезпечує ефективне та швидке гасіння електричної дуги при розмиканні контактів. Це дозволяє забезпечити високу надійність та безпеку експлуатації в електричних мережах середньої напруги.

Основним елементом ВВ є вакуумна дугогасильна камера, в якій розміщені рухомий та нерухомий контакти. При нормальній роботі контакти замкнуті, і електричний струм протікає через них безперешкодно. У разі виникнення аварійної ситуації або необхідності відключення лінії, приводний механізм розмикає контакти, створюючи між ними вакуумний проміжок.

Під час розмикання контактів у вакуумі виникає електрична дуга, яка підтримується за рахунок іонізації металевих парів, що випаровуються з поверхонь контактів. Однак, завдяки високій діелектричній міцності вакууму та швидкому відновленню ізоляційних властивостей після проходження струму через нуль, дуга гасне практично миттєво. Цей процес забезпечує ефективне переривання струму та запобігає повторному виникненню дуги. Важливою особливістю ВВ є відсутність потреби в додаткових дугогасильних середовищах, таких як масло або гази, що значно спрощує конструкцію та обслуговування пристрою. Крім того, вакуумна камера є герметичною та не потребує періодичного обслуговування протягом усього терміну експлуатації.

Завдяки своїм конструктивним особливостям та принципу роботи, вакуумні вимикачі забезпечують високу надійність, довговічність та безпеку в електричних мережах, що робить їх незамінними елементами сучасних енергетичних систем.

1.1 Конструктивні особливості

Вакуумний вимикач – це трифазний комутаційний апарат середньої напруги, у якому розмикання контактів відбувається в герметичній вакуумній

камері. Кожний полюс містить дугогасильну камеру (вакуумний інтерруптор) із нерухомим і рухомим контактом. Вакуумна камера виготовлена з металу методом зварювання і герметизована “на все життя”. [1]

Ця камера забезпечує високу електричну стійкість при напрузі, що прикладається, і миттєво відновлює ізоляцію після гасіння дуги. У корпус вакуумної камери часто вбудовують порожнистий силовий полюс (як у АВВ VD4): технологія лиття дозволяє одержати єдину конструкцію «полюс + камера». Альтернативно полюс може бути збірним, особливо для апаратів на великі короткочасні струми. Контактна система вакуумного вимикача складається з плоских (дискових) «наскладених» контактів (butt-contacts) із високостійкого сплаву. Такі контакти краще витримують дугогасіння у вакуумі.

Матеріали контактів зазвичай мідно-хромові (сплав CuCr) чи сплави срібло-вольфрам (AgW)– вони забезпечують необхідну стійкість до дугової ерозії й високі електропровідність, одночасно утворюючи пароплазму при розмиканні. Мідно-хромовий контакт – ключовий компонент вакуумного прерывателя, виготовлений з CuCr-сплаву з високою твердістю та опором зношенню.

Срібно-вольфрамові контакти (AgW) широко застосовуються для контакторів високовольтних апаратів завдяки їхній стійкості до нагрівання та дугової ерозії.

Ізоляція полюса виконується вакуумно-повітряною ізоляторною – найчастіше з епоксидних чи порцелянових стійок. Вакуумні камери встановлюються на ізолювальних опорах, що дозволяє ізолювати кожну фазу одна від одної та від корпусу привода. Наприклад, у вимикачах Siemens 3АН кожен полюс кріпиться до базового блоку приводу через опорні ізолятори, що забезпечують простір для розбігання контактів.

Привід вимикача – накопичуючого типу (пружинно-електричний механізм). Зазвичай встановлюють пружинні накопичувачі, які заряджаються

електродвигуном або вручну, а потім миттєво розряджають на розрив контактів. Така схема забезпечує короткий час відгуку та необхідну енергію для розриву дуги. Вбудовані електричні чи механічні блокування (антипампінг) запобігають несвоєчасним спрацюванням. [1]

Деякі конструкції можуть мати електромагнітний привід (насосний), але він рідше застосовується. Матеріали та технології герметизації. Герметизація вакуумної камери досягається вакуумним зварюванням металевих деталей з високою вакуумостійкістю. Відомі технології застосовують металокерамічні переходи («стеклотрубно» ізолятори) та дугове спікання металевих пакувальних кільцевих ущільнювачів. Завдяки цьому забезпечується вакуум і довготривала герметичність. Всі внутрішні елементи полюса (контакти, дугогасильна камера) взаємозалежні, але за необхідності вакуумна дугогасильна камера є окремим замінним блоком. Приклади конструкцій. Наприклад, ABB VD4 (6–40,5 кВ) використовує литий силовий полюс з інтегрованою вакуумною дугогасильною камерою.

У VD4 передбачені як ручний, так і моторний пружинний привід, забезпечено можливість автоматичного повторного включення.

Siemens 3AH (7,2–40,5 кВ) складається з повітряно-ізольованих збірних полюсних блоків з вакуумними інтерруторами, розташованими в опорних напрямних, та окремого корпусу привода з накопичувальною пружиною.

Schneider Electric Evolis – компактна серія модульних вакуумних ВВ на 12–24 кВ з металевим каркасом і знімними полюсами; у них також використовується герметичний вакуумний апертуратор (без обслуговування) і стандартні механізми зберігання енергії.

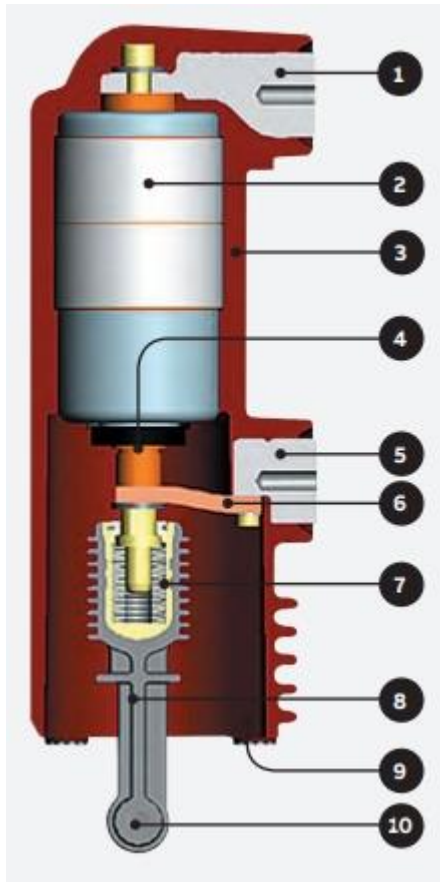


Рисунок 1.1 – Вакуумний вимикач, вбудований у полюс.

- 1) Верхній термінал
- 2) Вакуумний вимикач
- 3) Оболонка / полюс
- 4) Ступиця рухомого контакту
- 5) Нижній термінал
- 6) Гнучке підключення
- 7) Пружинна вилка шатуна
- 8) Шатун
- 9) Кріплення полюса
- 10) Підключення до приводу

1.2 Робочі процеси: гасіння дуги у вакуумі

Гасіння електричної дуги у вакуумних вимикачах (ВВ) є ключовим процесом, що забезпечує ефективне та безпечне розмикання електричних кіл в мережах середньої напруги. Цей процес базується на фізичних властивостях вакууму, який слугує як дугогасильне середовище, забезпечуючи швидке відновлення діелектричної міцності після розмикання контактів.

Під час нормальної роботи ВВ, контакти знаходяться в замкнутому стані, і електричний струм протікає через них безперешкодно. У разі виникнення аварійної ситуації або необхідності відключення лінії, приводний механізм розмикає контакти, створюючи між ними вакуумний проміжок. При розмиканні контактів виникає електрична дуга, яка підтримується за рахунок іонізації металевих парів, що випаровуються з поверхонь контактів. Однак, завдяки високій діелектричній міцності вакууму та швидкому відновленню ізоляційних властивостей після проходження струму через нуль, дуга гасне практично миттєво. [2]

Однією з важливих особливостей вакуумного гасіння дуги є наявність катодних плям — мікроскопічних зон на поверхні катода, де відбувається інтенсивне випаровування металу та емісія електронів. Ці плями є джерелами іонізації, що підтримують дугу. Однак, у вакуумі, при зменшенні струму до нуля, енергії, що виділяється в катодних плямах, стає недостатньо для підтримання іонізації, що призводить до швидкого згасання дуги.

Для покращення процесу гасіння дуги у вакуумних вимикачах застосовуються спеціальні конструкції контактів, які створюють магнітне поле під час протікання струму. Це поле сприяє рівномірному розподілу дуги по поверхні контактів, зменшуючи локальне нагрівання та ерозію. Існують два основні типи магнітних полів, що використовуються в конструкції контактів: тангенціальне та осьове. Тангенціальне магнітне поле сприяє обертанню дуги по

колу, тоді як осьове забезпечує рівномірний розподіл дуги по всій поверхні контактів, що зменшує ерозію та підвищує довговічність вимикача.

Після згасання дуги, металеві пари, що утворилися під час дугового розряду, осідають на внутрішніх екранах вакуумної камери, запобігаючи їх конденсації на ізоляційних поверхнях. Це забезпечує швидке відновлення діелектричної міцності між контактами та запобігає повторному виникненню дуги. [2]

Таким чином, процес гасіння дуги у вакуумних вимикачах є складним фізичним явищем, що включає іонізацію металевих парів, утворення та згасання катодних плям, вплив магнітного поля на дугу та швидке відновлення діелектричної міцності вакуумного проміжку. Завдяки цим процесам, вакуумні вимикачі забезпечують ефективне та надійне розмикання електричних кіл в мережах середньої напруги.

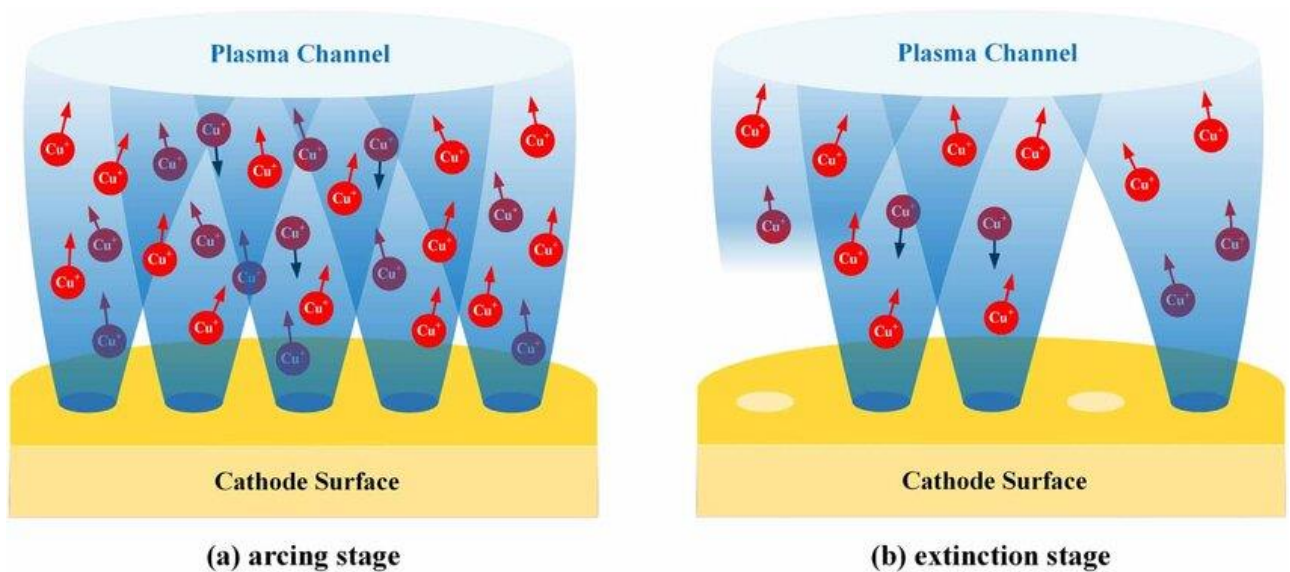


Рисунок 1.2 – Схематичне зображення процесу гасіння дуги

1.3 Переваги та недоліки

Вакуумні вимикачі (ВВ) стали невід'ємною частиною сучасних електричних мереж середньої напруги, завдяки своїм технічним характеристикам та експлуатаційним перевагам. Проте, як і будь-яке технічне рішення, вони мають свої обмеження та недоліки.

Переваги вакуумних вимикачів:

1) Однією з ключових переваг ВВ є висока діелектрична міцність вакууму, що дозволяє ефективно гасити електричну дугу при розмиканні контактів. Це забезпечує компактність конструкції та зменшення розмірів дугогасильних камер.

2) ВВ характеризуються тривалим терміном служби та високою надійністю, оскільки відсутні гази або рідини, які можуть деградувати з часом. Це дозволяє зменшити потребу в регулярному обслуговуванні та знизити експлуатаційні витрати.

3) Швидке відновлення діелектричних властивостей вакууму після гасіння дуги забезпечує готовність вимикача до наступної операції в короткий термін. Це особливо важливо в умовах частих комутацій.

4) ВВ є екологічно безпечними, оскільки не містять шкідливих для навколишнього середовища речовин, таких як SF_6 або масло. Це робить їх привабливими для використання в екологічно чутливих зонах.

5) Компактність і легкість конструкції ВВ дозволяє зменшити витрати на транспортування та встановлення, а також спрощує інтеграцію в існуючі системи.

6) Відсутність горючих матеріалів у конструкції ВВ знижує ризик виникнення пожежі або вибуху, що підвищує загальну безпеку експлуатації. [3]

Недоліки вакуумних вимикачів:

1) ВВ зазвичай використовуються в системах середньої напруги (до 38 кВ). Для високовольтних систем вони менш ефективні через технологічні обмеження, що обмежує їх застосування в певних умовах.

2) Вартість ВВ може бути вищою порівняно з іншими типами вимикачів, що може впливати на рішення при виборі обладнання, особливо в умовах обмеженого бюджету.

3) У разі виходу з ладу вакуумної камери її неможливо відремонтувати на місці; необхідна повна заміна, що може призвести до додаткових витрат і часу простою системи.

4) Хоча вакуумна камера герметична, інші компоненти вимикача можуть бути чутливими до вологи та пилу, що вимагає додаткового захисту при встановленні в несприятливих умовах.

5) При розмиканні індуктивних або ємнісних навантажень можуть виникати перенапруги, що потребує додаткових заходів захисту, таких як встановлення обмежувачів перенапруг.

6) Контроль за станом вакууму в камері може бути складним, оскільки неможливо безпосередньо виміряти тиск без порушення герметичності.



Рисунок 1.3 – Життєвий цикл вакуумного вимикача

2 АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ У МЕРЕЖАХ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ

2.1 Порівняння технічних характеристик вакуумних, елегазових та повітряних вимикачів

2.1.1 Струм вимкнення

В сучасних розподільчих мережах середньої напруги (10–35 кВ) як вакуумні, так і елегазові SF₆ вимикачі забезпечують високі значення струму вимкнення (короткого замикання) – типово до 20–40 кА і вище, залежно від конструкції та класу напруги. Наприклад, вакуумні вимикачі успішно застосовуються навіть на рівнях 72–145 кВ з відключенням струмів короткого замикання 31,5–40 кА, що свідчить про їх високий потенціал і для середньої напруги. Елегазові вимикачі традиційно також забезпечують надійне гасіння дуги при великих струмах; розвиток техніки дозволив довести граничні струми вимкнення елегазових вимикачів до 50–63 кА у високовольтних застосуваннях. Повітряні вимикачі (із гасінням дуги у повітрі) значно поступаються: для досягнення аналогічних струмів потрібні були громіздкі конструкції та потужні дугогасні пристрої. Через це повітряні вимикачі визнані найменш ефективними і нині майже не використовуються в енергосистемі. Усі старі повітряні апарати поступово замінені на більш ефективні вакуумні чи елегазові. [4]

2.1.2 Механічний і електричний ресурс

Вакуумні вимикачі характеризуються дуже тривалим ресурсом роботи. Як правило, сучасні вакуумні апарати належать до класу M2 за ІЕС 62271-100 (механічна витривалість не менше 10 000 циклів без ремонту). Електрична зносостійкість контактів також висока – вакуумні дугогасильні камери витримують велику кількість комутацій навіть на значних струмах, оскільки знос від дуги мінімальний (метал випаровується і конденсується на контактних поверхнях). Після вичерпання комутаційного ресурсу (наприклад, певної

кількості відключень номінальних або аварійних струмів) вакуумну камеру зазвичай замінюють на нову. Елегазові вимикачі також випускаються з високим ресурсом: механічна витривалість сучасних моделей досягає 10 000 циклів (М2) подібно до вакуумних, а електричний ресурс відповідає класу Е2 (повний цикл відключень струмів К3). Водночас контакти та сопла елегазових вимикачів зазнають певного зносу від дуги, тому після визначеної кількості операцій потрібен капітальний ремонт – оцінка стану і заміна зношених деталей. Згідно з вимогами стандартів (ІЕС/ДСТУ EN 62271-100), після вичерпання ресурсу елегазового вимикача проводять ревізію вузлів і можуть продовжити його експлуатацію за умови справності. Повітряні вимикачі мають найменший ресурс: їх контакти швидко вигорають від дуги в атмосферному повітрі, тому вже після кількох відключень великого струму потрібне технічне обслуговування або навіть капітальний ремонт. Історично відомо, що після 5–7 відключень короткого замикання повітряний (або масляний) вимикач вимагав повної ревізії і заміни дугогасильних елементів. Таким чином, за показником довговічності вакуумні й елегазові апарати суттєво випереджають застарілі типи.

2.1.3 Вимоги до обслуговування

Однією з переваг вакуумної технології є мінімальна потреба в технічному обслуговуванні. Вакуумні вимикачі не містять оливи чи газу, їхні дугогасні камери герметично запаяні на весь термін служби, тому не потребують регулярного втручання. Як зазначають виробники, вакуумні апарати середньої напруги не вимагають обслуговування дугогасної системи до кінця ресурсу 10 000 комутацій, що приблизно відповідає понад 20 рокам експлуатації. Фактично протягом усього життєвого циклу вакуумного вимикача достатньо лише періодично оглядати та перевіряти механізм приводу. Елегазові вимикачі вважаються майже безобслуговуваними в короткостроковій перспективі, проте вимагають контролю за тиском газу та герметичністю протягом всього строку

служби. Регламентне обслуговування для елегазового вимикача, зазвичай, включає: щорічні або періодичні огляди ущільнень і манометрів, дрібний ремонт кожні 5 років та повний капітальний ремонт камери кожні 10 років експлуатації. Навіть якщо вимикач мало використовувався, через 10–12 років рекомендується провести ревізію дугогасильного вузла (заміна ущільнень, очищення контактів тощо). Таким чином, за вимогами до обслуговування вакуумні вимикачі мають перевагу – практично не потребують планових робіт протягом десятиліть, тоді як елегазове обладнання потребує періодичного нагляду. Повітряні вимикачі є найвибагливішими до догляду: для них характерна часта заміна або очищення контактів, перевірка та регулювання дугогасильних рогів, профілактика приводу після кожного відключення великого струму. У минулому це обумовлювало значні експлуатаційні витрати на підтримання працездатності повітряних апаратів, що стало однією з причин їхнього повного витіснення сучаснішими аналогами. [4]

2.1.4 Надійність і безпека

Практична експлуатація показала, що вакуумні та елегазові вимикачі забезпечують високу надійність роботи в мережах середньої напруги. Обидві технології розроблені з урахуванням багаторічного ресурсу безвідмовної роботи і численних аварійних відключень. Досвід експлуатації свідчить про приблизно однаково низькі показники відмов для якісних вакуумних та елегазових вимикачів, за умови дотримання регламенту. Вакуумні вимикачі дещо виграють за рахунок простішої конструкції: відсутність складних ущільнень і рухомих ущільнюючих поверхонь зменшує імовірність відмови через витік середовища або старіння компонентів. Герметизація вакуумної дугогасної камери здійснюється зварюванням металокерамічних деталей, які не старіють і зберігають вакуум протягом десятків років. Натомість в елегазових вимикачах герметичність залежить від полімерних прокладок і ущільнень, які з часом

можуть деградувати, що підвищує ризик витоку газу та зниження ізоляційних властивостей.

З точки зору електробезпеки, вакуумні вимикачі вважаються дуже безпечними в експлуатації. В них відсутні вибухонебезпечні гази чи горючі матеріали; у разі внутрішнього пошкодження максимальне, що може статися – втрата вакууму і поява дуги, яка гасне в межах камер без поширення назовні. Немає ризику пожежі або вибуху, оскільки ні дугогасне середовище, ні контакти не підтримують горіння. Елегазові вимикачі за нормальних умов також достатньо безпечні (газ негорючий, апарати обладнані штатними клапанами скиду тиску). Втім, при аварійному зниженні тиску елегазу або несправності дугогасної системи можливе виникнення внутрішньої дуги, яка здатна спричинити займання пластикових деталей і вибух корпусу. Тому до елегазових вимикачів висуваються підвищені вимоги щодо контролю герметичності та справності манометрів – ці заходи безпеки регламентовані відповідними правилами (ПУЕ, НПАОП 40.1-1.32-01 тощо). Повітряні вимикачі з точки зору пожежо- та вибухобезпеки перевершували масляні (адже повітря не є горючим і не створює тиску), тому колись їх вважали відносно безпечними. Але відкриті дуги у повітрі небезпечні для обслуговуючого персоналу – вони випромінюють ультрафіолетове світло, утворюють озон та гарячі гази. Старі повітряні вимикачі на відкритому повітрі (повітряно-дугові або повітряно-струменеві) мали значний рівень шуму при відключенні та вимагали спеціальних заходів захисту персоналу від акустичного удару. З огляду на це сучасні вакуумні й елегазові аналоги забезпечують вищий рівень охорони праці і пожежної безпеки.

2.1.5 Екологічність

В контексті впливу на довкілля різниця між технологіями істотна. Вакуумні вимикачі вважаються екологічно чистими, оскільки не містять жодних газів або рідин, що можуть забруднювати атмосферу чи ґрунт. Матеріали

вакуумних камер (метал, кераміка) підлягають звичайній переробці після закінчення строку служби, небезпечних відходів не утворюється. Елегазові вимикачі, навпаки, використовують газ SF_6 який є сильним парниковим газом (потенціал глобального потепління 23 500 разів вищий за CO_2). В нормальних умовах SF_6 інертний і не шкодить озоновому шару, але витік навіть малої кількості цього газу негативно впливає на клімат. Крім того, при електричній дузі молекули SF_6 розкладаються з утворенням токсичних фторидів сірки і фтороводню. Ці продукти осідають всередині вимикача і частково виходять при випуску газу, тому обслуговування елегазових апаратів потребує засобів хімзахисту, а відпрацьований газ підлягає спеціальній утилізації. З погляду екології, SF_6 вимикачі не є нешкідливими: їх застосування виправдане лише за умови герметичності і правильної переробки газу після закінчення строку служби. Саме через екологічні проблеми сьогодні у світі шукають заміну елегазу. Повітряні вимикачі не містять парникових газів, але вони були неекологічними в іншому аспекті: дуга на повітрі створює оксиди азоту, озон та інші токсичні продукти, хоч і в малих кількостях. Також старі конструкції потребували багато металу і простору, що робило їх менш привабливими з точки зору ефективності ресурсів. Отже, вакуумні вимикачі мають найменший екологічний слід, тоді як елегазові потребують компенсаторних заходів (контроль витоків, утилізація газу), аби мінімізувати вплив на довкілля.

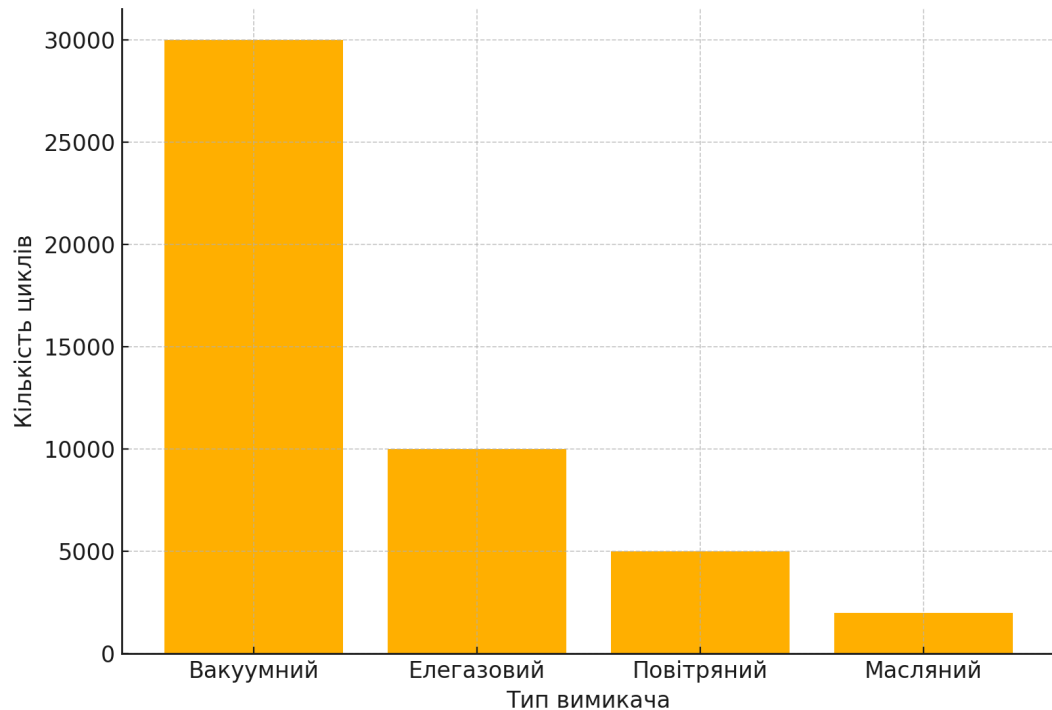


Рисунок 2.1 – Графік кількості циклів без обслуговування для різних типів вимикачів

2.2 Економічна ефективність застосування кожного типу вимикачів (аналіз TCO)

При виборі комутаційного апарата для мереж середньої напруги важливо врахувати повну вартість володіння (Total Cost of Ownership, TCO) – сумарні витрати протягом життєвого циклу обладнання. До TCO входять початкова вартість закупівлі й монтажу, витрати на експлуатацію і технічне обслуговування, а також витрати на виведення з експлуатації або заміну по завершенні ресурсу. Аналіз TCO дозволяє оцінити економічну доцільність застосування вакуумних, елегазових чи інших вимикачів на перспективу 20–30 років експлуатації. [5]

Вартість придбання та монтажу. Сучасні вакуумні і елегазові вимикачі для середньої напруги пропонуються провідними виробниками (ABB, Siemens,

Schneider, Eaton тощо) у широкому діапазоні цін – залежно від струму, напруги та конструкції. Наприклад, середні ціни на вакуумні вимикачі 6–35 кВ становлять близько \$8–25 тис. за одиницю (у доларах США, еквівалентно 300–800 тис. грн), залежно від моделі і виробника. Елегазові вимикачі аналогічного класу, як правило, мають подібний порядок цін, особливо якщо мова про модульні блоки для комплектних розподільчих пристроїв. Істотна різниця в початковій вартості може виникати на рівні компоновки підстанції: элегазове обладнання часто реалізується у вигляді компактних герметичних блоків (GIS, модулі з элегазовою ізоляцією), які займають менше місця, але є технологічно складнішими і дорожчими в одиничному вимірі. Вакуумні вимикачі здебільшого встановлюються в традиційних повітряних або твердодіелектричних комірках (AIS або сучасні SIS – Shielded Insulation Systems), що може вимагати трохи більшого простору, зате такі системи часто дешевші при масштабному розгортанні. Таким чином, початкові інвестиції в вакуумний чи элегазовий вимикач залежать від конфігурації мережі: в умовах дефіциту площі (міські підстанції) компактні элегазові модулі виправдовують себе, а в інших випадках широко застосовуються вакуумні вимикачі в повітряній ізоляції. Вартість монтажу для обох типів подібна, хоча элегазові установки потребують додаткових процедур – заповнення і перевірки газу, спеціальної апаратури для заправки, навчання персоналу роботи з SF₆. Це дещо підвищує початкові витрати на введення элегазового вимикача в експлуатацію порівняно з вакуумним (останній достатньо встановити та підключити без додаткових операцій). [5]

Витрати на експлуатацію та технічне обслуговування. У довгостроковому періоді головну роль в економічній ефективності відіграють саме експлуатаційні витрати. Вакуумні вимикачі мають суттєву перевагу завдяки мінімальним вимогам до обслуговування: протягом десятиліть вони практично не потребують заміни компонентів чи трудомістких регламентних робіт. Це означає економію

коштів на ремонтах і простоях обладнання. Елегазові вимикачі, хоча й потребують певного технічного догляду (перевірка герметичності, підкачка газу при необхідності, періодичні ремонти через 10–15 років), все ж належать до безконтактних комутаційних апаратів з порівняно низькими витратами на обслуговування. Виробники підкреслюють, що якісні елегазові та вакуумні вимикачі є практично maintenance-free (не потребують частого техобслуговування). Наприклад, компанія Siemens для своїх сучасних вимикачів зазначає інтервал міжревізійного огляду 12 років та відсутність капітального ремонту до 25 років експлуатації, що мінімізує ТСО користувача. Схожих показників дотримуються й інші виробники: міжремонтний період 10–20 років став стандартом для вакуумної та елегазової техніки середньої напруги. З точки зору витрат на персонал і матеріали це величезний прогрес порівняно зі старими повітряними або масляними вимикачами, де профілактика була потрібна ледь не щороку. Крім того, відсутність витратних матеріалів (немає оливи для заміни, фільтрів чи газосумішей) у вакуумних вимикачах теж знижує експлуатаційні витрати. Елегазові апарати вимагають контролю SF₆: у разі витоку потрібне дозаправлення дорогим газом, а кожні 5–10 років – аналіз стану газового середовища і заміна ущільнювачів. Такі роботи вимагають спеціалізованого обладнання та можуть виконуватися лише навченим персоналом, що додає витрат і простоїв. Вакуумні ж вимикачі не мають подібних процедур, а контроль їх стану може здійснюватися штатною діагностичною апаратурою (сенсори тиску або інтегрований монітор ресурсного відключення). За даними досліджень, обслуговування вакуумних вимикачів потребує значно менше трудових і матеріальних ресурсів, ніж елегазових: наприклад, в енергокомпанії PG&E (США) відзначили, що витрати на експлуатацію вакуумних вимикачів нижчі, оскільки відсутні витрати на поводження з газом і засоби захисту для персоналу. В цілому, у фазі експлуатації вакуумна технологія дозволяє енергокомпанії

заощадити значні кошти за рахунок меншої кількості планових інспекцій та збільшеного ресурсу апаратів.

Ресурс та заміна обладнання. Повна вартість володіння включає також витрати на заміну або продовження ресурсу вимикача. Тут слід врахувати, що строк служби вакуумних і елегазових вимикачів зазвичай становить 25–30 років (саме на такий період розраховані сучасні моделі). Однак реальна довговічність може різнитися. Вакуумні дугогасильні камери, як зазначалося, зберігають герметичність і працездатність понад 20 років, а деякі виробники (Siemens) оцінюють потенційний строк служби нових вакуумних вимикачів у п'ять разів більшим за ресурс елегазових аналогів. Це пояснюється відсутністю деградації вакууму з часом, тоді як у елегазових апаратів поступово старіють прокладки і накопичуються продукти розкладання, що може обмежувати строк їх надійної служби. Таким чином, вакуумний вимикач, імовірно, відпрацює повний розрахунковий термін без втрати характеристик, тоді як елегазовий може вимагати середнього ремонту або навіть заміни дещо раніше. З точки зору ТСО це означає, що за 30-річний горизонт планування може знадобитися придбати й встановити меншу кількість вакуумних апаратів, ніж елегазових, для забезпечення безперервної роботи мережі. Окрім того, процедура виведення з експлуатації елегазового вимикача пов'язана з додатковими витратами: необхідно безпечно відкачати і утилізувати SF₆, що потребує спеціальних послуг. Натомість вакуумний апарат наприкінці служби просто відключають, демонтують і відправляють на переробку без будь-яких небезпечних відходів. Це також зменшує сумарні витрати на етапі зняття з експлуатації.

Загальний порівняльний економічний аналіз. У результаті врахування всіх складових ТСО можна зазначити, що застосування вакуумних вимикачів є в багатьох випадках найбільш економічно вигідним. Хоча їхня закупівельна ціна може бути співставною або трохи вищою за елегазові аналоги, проте протягом

життєвого циклу вакуумні апарати вимагають менше витрат на обслуговування і мають довший ресурс. Як наслідок, загальна вартість володіння для вакуумних технологій нижча. Елегазові вимикачі виправдані в тих ситуаціях, де потрібна особлива компактність чи специфічні характеристики (наприклад, в складі модулів GIS), але при цьому слід зважати на майбутні витрати, пов'язані з SF₆. Провідні виробники комутаційного обладнання відзначають, що користувачам варто враховувати не лише початкову ціну апарата, але й витрати на весь життєвий цикл. Загальна тенденція на ринку – перехід до вакуумних вимикачів як базового компонента розподільчих пристроїв середньої напруги, оскільки вони забезпечують найкращий баланс надійності та економічності. Компанії ABB та Schneider Electric, наприклад, у своїх каталогах акцентують на довговічності й мінімальному обслуговуванні вакуумних вимикачів (ABB VD4, Schneider Evolis тощо), що знижує TCO для клієнта. Siemens також переводить лінійку середньовольтних вимикачів на вакуумну технологію (серія 3AH4 та ін.), заявляючи про “zero maintenance” впродовж усього строку служби і великі інтервали огляду, що економить кошти користувачів. Eaton пропонує вакуумні вимикачі VCP-W з ресурсом 30 000 операцій і подовженими міжремонтними інтервалами, які, за інформацією компанії, “суттєво скорочують експлуатаційні витрати порівняно зі старими рішеннями”. Отже, усі провідні виробники сходяться на думці, що вакуумна комутаційна техніка забезпечує найнижчу сумарну вартість володіння для мереж середньої напруги.

Для повноти слід згадати економічний аспект повітряних вимикачів: наразі їх майже не використовують, тож пряме порівняння ТСО з сучасними типами є теоретичним. Ясно, що повітряні (а також масляні) вимикачі вимагали надзвичайно високих витрат на підтримання працездатності (часті ремонти, відключення для ревізій, запасні частини). Тому енергокомпанії масово відмовилися від них, незважаючи на нижчу ціну закупівлі в минулому – адже сукупні експлуатаційні витрати і ризики аварій повністю нівелювали початкову вигоду. Саме перехід на вакуумні та елегазові апарати в другій половині ХХ ст. дозволив суттєво знизити витрати на експлуатацію електромереж та підвищити надійність електропостачання.

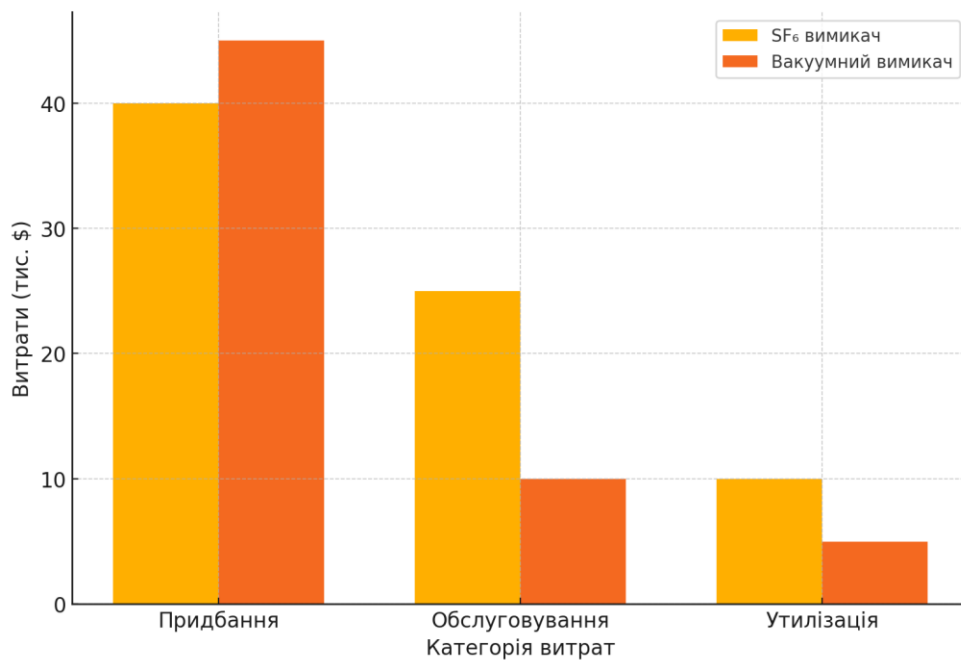


Рисунок 2.2 – Діаграма: зведені витрати по життєвому циклу: SF₆- та вакуумного вимикача

2.3 Приклади впровадження у практиці енергетичних компаній (Україна та Європа)

Модернізація розподільчих мереж середньої напруги активно проводиться як в Україні, так і в країнах Європи. Заміна застарілих комутаційних апаратів

(масляних, повітряних) на сучасні вакуумні або елегазові вимикачі стала важливою частиною програм підвищення надійності та впровадження технологій Smart Grid. Розглянемо кілька показових прикладів з практики енергокомпаній, звертаючи увагу на обрані типи вимикачів, результати модернізації та обґрунтування технічних рішень.

2.3.1 Розподільчі мережі Полтаваобленерго (Україна)

У 2019–2020 рр. АТ «Полтаваобленерго» здійснило масштабну заміну вимикачів 6–35 кВ на підстанціях області. Зокрема, пріоритетом було повне виведення з експлуатації старих масляних вимикачів і встановлення натомість сучасних вакуумних апаратів з оновленими комплектами релейного захисту. За повідомленням компанії, це дозволило підвищити надійність електропостачання споживачів Полтавщини та зменшити витрати на ремонти. Вакуумні вимикачі було обрано через їхній високий ресурс і пожежобезпечність – на відміну від масляних, вони не містять горючих матеріалів, що особливо актуально для підстанцій, розташованих поблизу житлових районів. Окрім того, нові вакуумні комірочки оснащено мікропроцесорними блоками захисту і телемеханіки, що забезпечує дистанційний моніторинг і керування (ключовий крок до Smart Grid). Таким чином, вибір вакуумних вимикачів був обґрунтований як техніко-економічними факторами (менше обслуговування, більше ресурс), так і вимогами безпеки й автоматизації. [5]

2.3.2 Програма Укренерго з заміни високовольтних вимикачів

Державна компанія НЕК «Укренерго», що експлуатує магістральні мережі, також поступово переходить на нові комутаційні технології. На підстанціях 110–330 кВ Укренерго протягом останніх десятиліть застарілі повітряні та масляні вимикачі замінюються елегазовими, які забезпечують кращу надійність при менших витратах на експлуатацію. Як приклад, у 2018 році на ПС 330 кВ «Трихати» (Миколаївська обл.) було виконано заміну чотирьох повітряних

вимикачів 330 кВ на сучасні елегазові апарати Siemens із елегазовою ізоляцією. Обґрунтуванням цього рішення було підвищення надійності транзитної лінії 330 кВ та зменшення ризику відмов: старі повітряні вимикачі мали великий час відключення і потребували частих ремонтів, тоді як нові елегазові забезпечують швидке гасіння дуги і мінімум технічного догляду. Крім того, елегазові вимикачі компактніші; це дозволило поліпшити компоновку відкритого розподільчого пристрою 330 кВ – зменшено габарити ошиновки, спрощено обслуговування, підвищено безпеку обслуговуючого персоналу. Важливо відзначити, що вибір на користь елегазової технології на високій напрузі зумовлений також вимогами стандартів (ДСТУ EN 62271-100:2017) та Правил улаштування електроустановок щодо рівня ізоляції і швидкодії комутацій. Елегазові вимикачі повністю відповідають цим нормам і забезпечують селективну роботу захистів на магістральних лініях. У підсумку, модернізація підстанції «Трихати» принесла істотне зниження аварійності та покращила стабільність роботи мережі Південного регіону.

2.3.3 Масштабна заміна вимикачів у розподільчих мережах України

В цілому по Україні у 2010-х роках реалізовано державні програми підвищення надійності електромереж, які включали масову заміну комутаційних апаратів. Лише протягом 2013 року в енергокомпаніях було замінено понад 1400 масляних вимикачів на вакуумні та елегазові, а роком раніше – близько 1450 таких вимикачів. Ці цифри наведені в офіційних звітах Мінпаливенерго і свідчать про колосальний обсяг модернізації. Основний акцент зроблено на рівні 6–35 кВ, де найбільше експлуатувалося застарілих масляних апаратів. Їх повна заміна дала змогу різко знизити кількість пошкоджень обладнання та випадків виходу з ладу вимикачів при коротких замиканнях. У результаті модернізації зріс середній час напрацювання на відмову комутаційних засобів, зменшилась тривалість відключень споживачів. Економічний ефект також відчутний: завдяки

вакуумним вимикачам підприємства зекономили значні кошти на ремонтах і технічному обслуговуванні (як згадувалося, вакуумні апарати майже не потребують планових ремонтів протягом десятиліть). Така масштабна заміна стала можливою також через зростання вітчизняного виробництва сучасних вимикачів та підтримку з боку регулятора (НКРЕ), який включав інвестиційні складові в тарифи для оновлення мереж. [5]

2.3.4 Впровадження Smart Grid у країнах Європи

Європейські енергокомпанії також активно оновлюють комутаційне обладнання, інтегруючи його в концепцію «розумних мереж». Одним з напрямів є перехід на екологічно чисті технології – вакуумні вимикачі та нові ізоляційні гази замість SF₆. Приміром, в Німеччині та Великій Британії успішно реалізовано пілотні проекти із впровадження високовольтних вакуумних вимикачів: у 2018–2019 рр. компанія Siemens встановила вакуумні вимикачі 123–145 кВ (Live Tank) на підстанціях в Німеччині, Польщі, Швеції, Великій Британії тощо. Це перші у світі комерційні застосування вакуумної комутації на такому рівні напруги, і вони довели її надійність. Основним обґрунтуванням було саме екологічне – прагнення виключити використання SF₆ на високих класах напруги, досягнувши нульових викидів парникових газів від електрообладнання. Одночасно в Європі впроваджуються альтернативні чисті гази для вимикачів (наприклад, суміш g³ від GE, AirPlus від ABB). У 2015 р. у Швейцарії встановлено перший комерційний вимикач з газом AirPlus на 170 кВ, а в 2017–2019 рр. у Франції, Німеччині, Данії та інших країнах з'явилися вимикачі з газом g³ на 72–145 кВ. Ці проекти демонструють готовність енергетиків ЄС інвестувати в нові технології, щоб підвищити екологічність та відповідність вимогам сталого розвитку.

З точки зору Smart Grid, нові вакуумні та елегазові вимикачі оснащуються сучасними електромагнітними або магніто-резистивними приводами, що легко інтегруються в системи автоматизації. Наприклад, застосування приводів з

постійними магнітами (magnetic actuator) дало змогу здійснювати високоточне керування процесом комутації – так зване *синхронне* або *контрольоване* перемикання. Це особливо важливо для smart grid, оскільки дозволяє мінімізувати перенапруги при комутації ємнісних чи індуктивних навантажень і підвищити якість електроенергії. В дослідженнях (Smeets et al., 2015) відзначено, що вакуумні вимикачі завдяки швидкому відновленню діелектричної міцності придатні для технологій контрольованого вимкнення – можна відключати їх точно в моменти проходження струму через нуль, запобігаючи стрибкам напруги. Такі можливості були реалізовані, зокрема, в нових вакуумних вимикачах з електронним керуванням, які інтегруються з системами моніторингу мережі. У країнах ЄС (Німеччина, Данія та ін.) уже впроваджені проекти «цифрових підстанцій», де вакуумні вимикачі сполучені зі Smart Grid-контролерами і датчиками стану – це дозволяє автоматично прогнозувати ресурс апаратів, дистанційно керувати перемиканнями для балансування навантаження та швидше ізолювати ушкоджені ділянки мережі.

2.3.5 Обґрунтування вибору обладнання

З наведених прикладів можна узагальнити типові мотиви, які висуваються енергетичними компаніями при виборі того чи іншого типу вимикача. По-перше, це надійність і ресурс: нові вакуумні та елегазові апарати здатні працювати безвідмовно значно довше, ніж старі, тому їх впровадження знижує аварійність і витрати на ремонт. По-друге, безпека і відповідність стандартам: модернізація часто обумовлена вимогами ПУЕ та інших нормативів – старі масляні або повітряні вимикачі не відповідають сучасним нормам пожежо- та вибухобезпеки, тоді як вакуумні/елегазові повністю їм відповідають. По-третє, економічні чинники: аналіз ТСО показує вигідність нових технологій – менше експлуатаційних витрат, менше простоїв, можливість продовжити період між капітальними ремонтами. По-четверте, інтеграція в Smart Grid: вибір на користь

вакуумних вимикачів часто робиться з прицілом на майбутнє – такі апарати легше оснастити інтелектуальними модулями, датчиками, системами дистанційного керування, що є необхідним елементом «розумних» мереж (на відміну від морально застарілих масляних, для яких подібна модернізація неможлива або економічно недоцільна). Нарешті, екологічна політика стає дедалі вагомішою: у Європі компанії віддають перевагу рішенням, які зменшують викиди парникових газів. Це стимулює перехід на вакуумні вимикачі навіть там, де раніше домінували елегазові (наприклад, на напругах 110 кВ і вище), або використання нових екологічних газів замість SF₆. Таким чином, впровадження вакуумних та елегазових вимикачів у практиці енергокомпаній приносить мультиплікативний ефект: підвищення надійності та безпеки мереж, скорочення витрат, а також технологічну готовність до майбутніх викликів (розвиток Smart Grid, децентралізація генерації, жорсткіші екологічні нормативи тощо). Це підтверджує доцільність обраних технічних рішень і пояснює, чому саме елегазові та вакуумні вимикачі сьогодні є стандартом у мережах середньої напруги. [6]

Таблиця 2.1 – Порівняльна таблиця вимикачів

№	Параметр	Вакуумний вимикач	Елегазовий вимикач	Повітряний вимикач
1	Тип комутаційного середовища	Вакуум (пароплазма контактів)	Газ SF ₆ (висока діелектрика)	Стиснене повітря
2	Номінальна напруга, кВ	До 72,5 (до 145 з обмеженням)	До 800	До 245
3	Номінальний струм, А	До 4000	До 6300	До 4000
4	Струм вимикання КЗ, кА	До 63	До 80	До 63
5	Ресурс (мех. циклів)	10 000-30 000	5000-10 000	1000-5000

6	Обслуговування	Мінімальне	Періодична перевірка газу	Високе (часте тех. Обслуговування)
7	Екологічність	Дуже висока (немає газів)	Низька ($\text{SF}_6 = \text{GWP} > 20\,000$)	Середня (повітря – безпечне)
8	Габарити	Компактні	Середні	Великі
9	Ціна (орієнтовно)	Середня	Висока	Низька
10	Час вимкнення, мс	30-60	40-60	60-100
11	Пожежо- /вибухобезпека	Висока	Висока, якщо герметичний	Середня

3 ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВАКУУМНОЇ КОМУТАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

3.1. Новітні розробки

В останні роки технологію вакуумного вимикача почали застосовувати не лише у звичних мережах з номінальною напругою до 52 кВ, але й у підстанціях більш високої напруги. Так, перші прототипи вакуумних роз'єднувачів для 72,5 кВ уже проведено типові випробування – наприклад, створено прототип зовнішнього повітряного вимикача на 72,5 кВ із вакуумними камерними дугогасними вимикачами та діелектриком на основі азоту. Зокрема, експериментальні рішення демонструють, що такий вакуумний апарат має коротші тривалості горіння дуги та кращі показники відновлення ізоляції порівняно з традиційними середовищами.

Компанія Siemens Energy представила лінійку «Blue» SF₆-вільної високовольної апаратури: зокрема, розроблено газоповітряний вакуумний вимикач 3AV1 Blue для 72,5 кВ і два 3AV1 Blue для 145 кВ (з вакуумними дугогасними камерами та ізоляцією «чистим повітрям»). На реальних об'єктах вже введено до експлуатації повітряно-ізолювані GIS-рішення – зокрема, 102 відсіки 8VM1 Blue GIS (72,5 кВ/714 МВ·А) на офшорній підстанції та перший у світі портовий пункт зі SF₆-вільним GIS 145 кВ (використано низькоенергетичні вакуумні трансформатори струму та напруги, фрагмент «чистого повітря» і датчики Sensgear). Усі ці продукти характеризуються нульовим вмістом SF₆, використанням вакуумних контактів і повітряної ізоляції, а також інтегрованими засобами моніторингу стану. [7]

Компанія ABB розвиває концепцію цифрових вакуумних вимикачів на середню напругу, наприклад серію VD4 evo для до 17.5 кВ з інтегрованими датчиками струму, напруги та механічних параметрів. Важливо, що ABB також працює над застосуванням вакууму у вищих класах напруги і анонсувала гібридні

проекти з вакуумними елементами (VD4-Arc тощо). Серія вакуумних вимикачів SecoVac VB2+ компанії GE (тепер ABB) призначена для металевих шафових КРУ при напругах 5–15 кВ, що ілюструє міцні позиції цієї технології навіть у середньому класі. Компанія Schneider Electric пропонує моделі EvoPacT і EvoPacT HVX (для до 38 кВ) – вони мають компактний модульний механізм з зубчатим приводом, високою кількістю циклів розмикання (до десятків тисяч) та розширені діагностичні можливості. Зокрема, ABB Advac – типовий приклад модульної конструкції: повністю зблокований механізм, легкодоступні привідні та електроелектронні блоки дозволяють швидко проводити обслуговування.

Інноваційним є використання електромагнітних приводів на постійних магнітах. Так, ABB розробила вакуумні вимикачі з електронним управлінням і вбудованими постійними магнітами (VM1): у цій схемі постійні магніти фіксують кінцеві положення вимикача (розімкнутий/замкнутий) без споживання струму, а електромагніти забезпечують рухові команди. Завдяки цьому суттєво зменшено складність механізму, підвищено надійність та ресурс вимикача (практика показує можливість 100000 операцій без обслуговування). Аналогічні рішення з власними електронними пристроями самодіагностики анонсують й інші виробники. Комбінуючи вакуумні дугогасні камери з такими сучасними приводами, найближче покоління обладнання обіцяє спростити конструкцію, зменшити габарити та підвищити довговічність вакуумної апаратури.



Рисунок 3.1 – GIS-підстанція 145 кВ з g³-технологією (АХРО, Швейцарія, 2017)

3.2. Тенденції автоматизації та Smart Grid

Зростання вимог цифрових підстанцій диктує інтеграцію вакуумних вимикачів у мережі Smart Grid. Зокрема, широко використовується стандарт зв'язку IEC 61850, який у поєднанні з процес-шинною архітектурою дозволяє передавати дані з сенсорів прямо на рівень АСУ ТП без додаткових перетворювачів. Так, ABB пропонує рішення VD4 Digitup, яке доповнює існуючі шафи останніми вакуумними вимикачами VD4 із вбудованими датчиками та релейними захистами Relion під IEC61850, реалізуючи просунуте цифрове підключення «станція-процес». Це забезпечує постійну фіксацію показників (струм, напруга, механіка) у режимі реального часу та інтеграцію з DMS/SCADA-системами, що оптимізує обслуговування й підвищує швидкість реагування на аварії.

Вбудовані сенсори та система моніторингу стають «за замовчуванням» для сучасних вакуумних вимикачів. Наприклад, ABB VD4 evo містить датчики

температури обмоток, контролю стану контактів та інших параметрів, що дозволяє в режимі онлайн відслідковувати стан апарату та планувати техобслуговування. Компанія Schneider Electric у серії EvoPacT робить акцент на «спеціальній» НМІ для дистанційного керування, масштабованому з'єднанні та IoT-платформі для 24/7-діагностики відхилень у роботі. У свою чергу Siemens застосовує хмарну систему Sensgear: в модифікаціях 3AV1 Blue датчики подають дані до хмарних аналітичних сервісів, які аналізують тенденції та прогнозують обслуговування. [7]

Важливою функціональною тенденцією є кероване вимкнення (Controlled Switching). Завдяки дуже малому розкидом часу спрацювання вакуумних вимикачів та їх стабільній роботі, можливо вибирати оптимальний момент для розмикання кола відносно синусоїди струму. Це дозволяє мінімізувати перенапруження при вимкненні й зробити перехідні процеси «гладкішими». Як підкреслюють дослідники, вакуумні вимикачі з електромагнітним приводом легко реалізують алгоритми контролю моменту спрацювання, що в перспективі трансформує динаміку мереж та підвищує їх стійкість. [8]

Отже, сучасний вакуумний вимикач – це вже не просто герметичний ізолюючий апарат, а високотехнологічний пристрій з вбудованими датчиками, цифровим інтерфейсом і промисловими протоколами зв'язку. Завдяки підтримці стандарту IEC 61850 та глибокій інтеграції у SCADA/DMS, такі вимикачі стають елементами «розумної» електромережі, що забезпечує оперативний збір діагностичної інформації й автоматизацію керування.

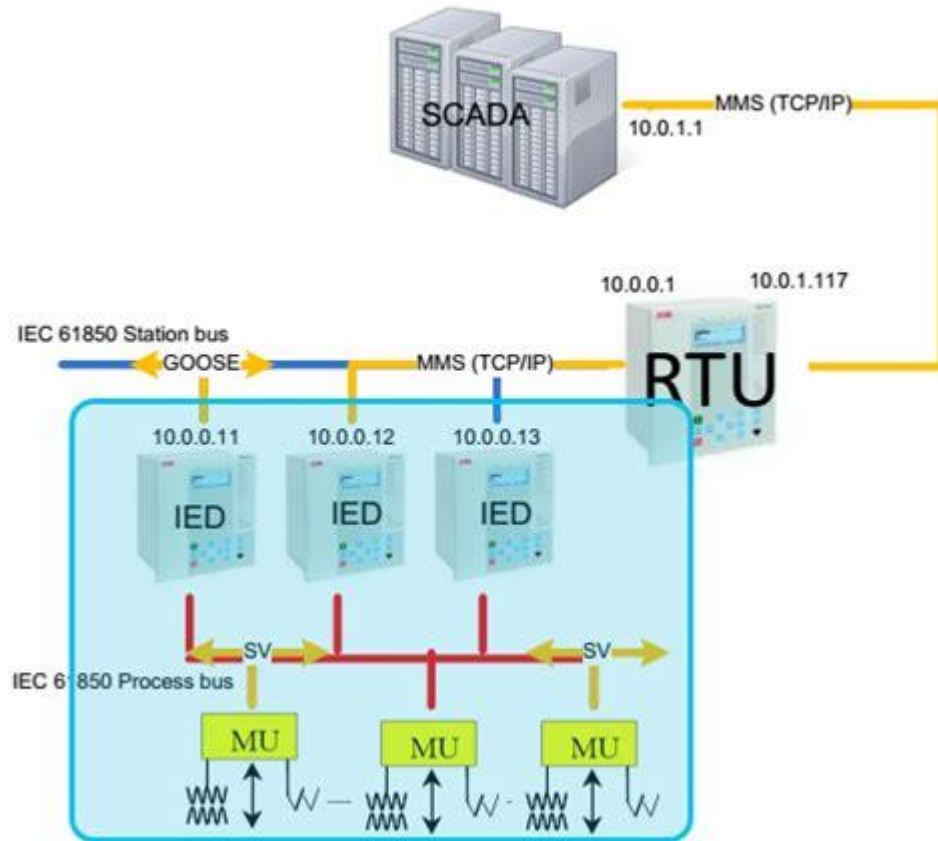


Рисунок 3.2 — Інтеграція вакуумного вимикача в цифрову підстанцію (IEC 61850).

3.3. Екологічні аспекти

Головним екологічним мотивом у розвитку вакуумної комутаційної техніки є поступова відмова від газу SF_6 . SF_6 – це парниковий газ із дуже високим потенціалом глобального потепління ($\text{GWP} \approx 25200$, тобто у 25200 разів потужніший за CO_2). З огляду на це Європейський Союз ввів жорсткі обмеження: нові вироби, що містять F-гази (зокрема SF_6), мають поступово виводитися з ринку там, де існують економічно й технічно придатні альтернативи (законодавство F-Gases Reg. ЄС). Так, відповідно до останніх поправок, заборонено вводити в обіг устаткування з SF_6 у секторах (зокрема – у електроенергетиці), де можна перейти на більш «кліматично дружні» рішення.

Наразі альтернативами SF₆ у комутаційній техніці вважаються нові газові суміші та вакуумні апарати. Приклади таких сумішей – g³ (Green Gas for Grid, Novac 4710 + CO₂, розроблене 3M і GE) та AirPlus (3M/ABB) – вони мають суттєво нижчий GWP (зазвичай у сотні разів менший за SF₆) і вже проходять випробування за стандартами IEC. Наприклад, узгоджено, що головними кандидатами на заміну SF₆ є суміші g³ та вакуумне дугогашіння. У середньому класі (≤38 кВ) також починають застосовувати безгазові рішення: наприклад, відома розробка Nuventura використовує технології із суцільною діелектричною ізоляцією без SF₆. [9]

Порівняння екологічного сліду різних технологій свідчить на користь вакуумних вимикачів. Оскільки вони не містять ізолюючих газів, їхній GWP фактично дорівнює нулю і відсутні витрати парникових газів у процесі експлуатації. Вакуумні апарати не потребують дорогого HAZMAT-обладнання для утилізації газу після виходу з ладу; за розрахунками виробників, усе обладнання для роботи з SF₆ (вантажно-розвантажувальні пристрої, контейнери тощо) можна виключити, що суттєво скорочує екологічний ризик і вартість обслуговування. Крім того, очікувана ресурсомісткість вакуумних вимикачів часто перевищує ресурсних показників SF₆-пристроїв у кілька разів. Наприклад, компанія Siemens оцінює, що вакуумний вимикач відпрацює у 5 разів більше циклів без техобслуговування, ніж еквівалентний SF₆-вимикач. У сукупності це означає меншу кількість виробів за весь життєвий цикл і, відповідно, менший викид парникових газів на одиницю переданої потужності.

Таким чином, тенденція до повного переходу на SF₆-free технології стає вимогою часу: вона підтримується суворою нормативною базою ЕС та ринковими ініціативами. Вакуумні комутаційні апарати, не маючи прямого еквіваленту парникових викидів під час роботи, а також значно спрощуючи

процес обслуговування, є екологічно доцільною альтернативою і вже демонструють конкурентоспроможні техніко-економічні характеристики.

4 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

4.1 Розрахунок вибору вакуумного вимикача для мережі КЛ-10 кВ

4.1.1 Розрахунок струмів короткого замикання

Складаємо заступну схему електроустановки та визначаємо параметри її елементів :

$S_6=1000$ МВт, $U_6= U_{сер.ном.}$

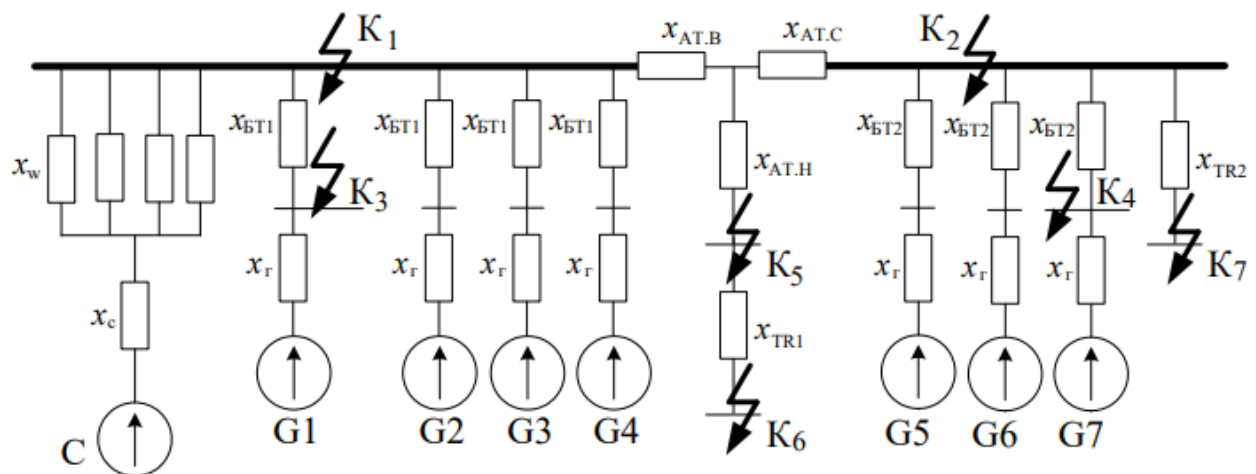


Рисунок 4.1 – Заступна схема електроустановки

Визначимо параметри елементів заступної схеми:

– генератор:

(4.1)

$$x_{Г} = x_d // \cdot \frac{S_6}{S_{ном}}$$

$$x_{Г1} = 0,243 \cdot \frac{1000}{588} = 0,413;$$

$$x_{Г2} = 0,19 \cdot \frac{1000}{235,3} = 0,81;$$

– ЛЕП-500 кВ:

$$x_w = x_{\text{пит}} \cdot 1 \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{ср}}^2};$$

$$x_w = 0,3 \cdot 980 \cdot \frac{1000}{515^2} = 1,1;$$

– система:

$$x_c = x_{*c.\text{НОМ}} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{*\text{НОМ}}};$$

$$x_c = 0,21 \cdot \frac{1000}{26100} = 0,008;$$

– блочный трансформатор:

$$x_{\text{бт}} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{т.НОМ}}};$$

$$x_{\text{бт1}} = \frac{14}{100} \cdot \frac{1000}{630} = 0,22;$$

$$x_{\text{бт2}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{1000}{250} = 0,44;$$

– АТЗ:

$$\left. \begin{aligned} x_{AT.B} &= \frac{u_{KB\%}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{T.HOM}}; \\ x_{AT.C} &= \frac{u_{KC\%}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{T.HOM}}; \\ x_{AT.H} &= \frac{u_{KH\%}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{T.HOM}}; \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} u_{KB\%} &= 0,5 \cdot (u_{KB-H\%} + u_{KB-C\%} - u_{KC-H\%}); \\ u_{KC\%} &= 0,5 \cdot (u_{KB-C\%} + u_{KC-H\%} - u_{KB-H\%}); \\ u_{KH\%} &= 0,5 \cdot (u_{KB-H\%} + u_{KC-H\%} - u_{KB-C\%}). \end{aligned} \right\}$$

$$u_{KB\%} = 0,5 \cdot (35 + 11 - 21,5) = 12,25 \%;$$

$$u_{KC\%} = 0,5 \cdot (11 + 21,5 - 35) = -1,25 = 0\%;$$

$$u_{KH\%} = 0,5 \cdot (35 + 21,5 - 11) = 22,75 \%.$$

$$x_{AT.B} = \frac{12,25}{100} \cdot \frac{1000}{3 \cdot 167} = 0,24;$$

$$x_{AT.C} = 0;$$

$$x_{AT.H} = \frac{22,75}{100} \cdot \frac{1000}{3 \cdot 167} = 0,45.$$

– Пускорезервный трансформатор з розщепленою обмоткою:

$$x_{TR} = \frac{1,875 u_K}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{HOM.T}},$$

$$x_{TR1} = \frac{1,875 \cdot 12,7}{100} \cdot \frac{1000}{40} = 5,95;$$

$$x_{TR2} = \frac{1,875 \cdot 11,5}{100} \cdot \frac{1000}{40} = 5,39;$$

Спростимо заступну схему (рисунок 4.2)

$$x_1 = x_w / 4 + x_C;$$

$$x_1 = 1,1/4 + 0,008 = 0,283;$$

$$x_2 = x_{r1} + x_{6r1};$$

$$x_2 = 0,413 + 0,22 = 0,633;$$

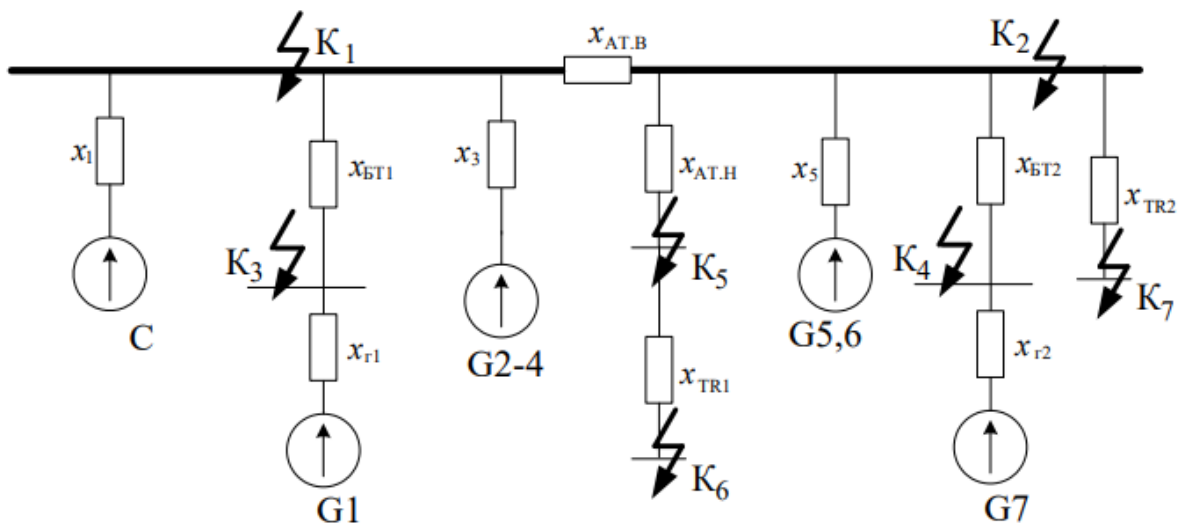


Рисунок 4.2 – Спрощена заступна схема електроустановки

$$x_3 = x_2 / 3;$$

$$x_3 = 0,6333 / 3 = 0,211;$$

$$x_4 = x_{r2} + x_{6r2};$$

$$x_4 = 0,81 + 0,44 = 1,25;$$

$$x_5 = x_4 / 2;$$

$$x_5 = 1,25 / 2 = 0,625;$$

Базовий струм [2, 5]:

$$I_{6i} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot S_{\text{сер.ном}}};$$

$$I_{61} = 1000/(\sqrt{3} \cdot 515) = 1,12 \text{ кА};$$

$$I_{62} = 1000/(\sqrt{3} \cdot 230) = 2,51 \text{ кА};$$

$$I_{63} = 1000/(\sqrt{3} \cdot 20) = 28,87 \text{ кА};$$

$$I_{64} = 1000/(\sqrt{3} \cdot 15,75) = 36,7 \text{ кА};$$

$$I_{65} = 1000/(\sqrt{3} \cdot 37) = 15,6 \text{ кА};$$

$$I_{66} = I_{67} = 1000/(\sqrt{3} \cdot 6,3) = 91,64 \text{ кА}.$$

Початкове значення періодичної складової струму КЗ:

$$I_{\text{по}} = \frac{E^*_{//}}{x^*_{\text{рез}}} \cdot I_{6i};$$

де // E^* – для генераторів: 1,13;

// E^* – для енергосистеми та власних потреб: 1;

$x^*_{\text{рез}}$ – результуючий опір кола КЗ, в.о.

Визначимо складові струмів КЗ [2]:

– періодичну

$$I_{\text{пт}} = \gamma_{\text{пт}} \cdot I_{\text{по}};$$

– аперіодичну:

$$i_{\text{ат}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{по}} \cdot e^{-\tau/T_a};$$

– ударний струм:

$$i_y = \sqrt{2} \cdot I_{\text{по}} \cdot K_y,$$

де $\tau = t_{\text{ВВ}} + 0,01$;

$t_{\text{ВВ}}$ – власний час вимикання вимикача;

$\tau_{\text{уп}}$ – коефіцієнт;

T_a – постійна часу кола КЗ, с;

K_y – ударний коефіцієнт.

Спростимо заступну схему електроустановки для кожної точки КЗ.

К-1 :

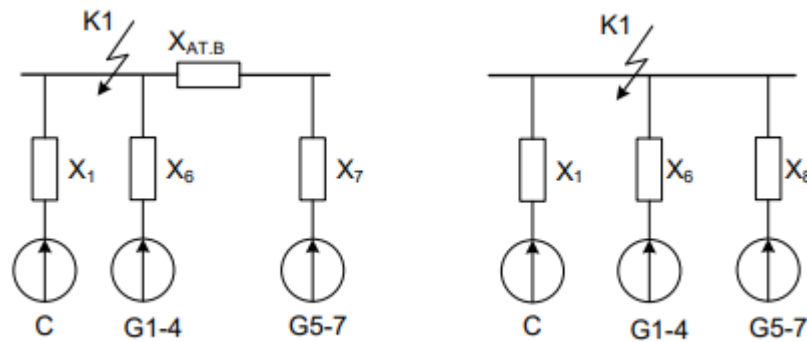


Рисунок 4.3– Спрощення заступної схеми для точки К-1

$$x_6 = x_2 / 4;$$

$$x_6 = 0,633/4 = 0,16;$$

$$x_7 = x_4 / 3;$$

$$x_7 = 1,25/3 = 0,42;$$

$$x_8 = x_7 + x_{\text{AT.B}};$$

$$x_8 = 0,42 + 0,24 = 0,66;$$

$$I_{\text{поС}} = \frac{1}{0,283} \cdot 1,12 = 3,958 \text{ (кА)};$$

$$I_{\text{поG1-4}} = \frac{1,13}{0,16} \cdot 1,12 = 7,91 \text{ (кА)};$$

$$I_{\text{поG5-7}} = \frac{1,13}{0,66} \cdot 1,12 = 1,918 \text{ (кА)}.$$

Аналогічно проведемо розрахунок струмів по I для інших точок КЗ.

Для РУВП-6 кВ за розрахункову приймаємо точку К-7.

Розрахуємо струми КЗ в точці КЗ використовуючи програмний комплекс «Дакар». Для цього розраховуємо усталений режим для структурної схеми станції. Намічаємо точки КЗ і виконуємо розрахунок трифазного короткого замикання. Усі результати розрахунків зведено в таблиці 4.1

Попередньо встановлюємо вимикачі

а) ВРУ-500 кВ	LTV 550E2	$t_{\text{BB}}=0,02 \text{ с.};$
б) ВРУ-220 кВ	LTV 245E1	$t_{\text{BB}}=0,035 \text{ с.};$
в) Сторона 35 кВ АТЗ	ВБНК-35	$t_{\text{BB}}=0,05 \text{ с.};$
г) РУ ВП-6 кВ	ВР2-10	$t_{\text{BB}}=0,04 \text{ с}$

Визначаємо коефіцієнти $\gamma_{\text{нт}}$ для генераторних віток.

К₁: а) G_{1-Х4}:

$$I'_{\text{НОМ}} = \frac{4 \cdot 588}{\sqrt{3} \cdot 515} = 4,56 \text{ (кА)};$$

$$\frac{I_{\text{по}}}{I'_{\text{НОМ}}} = \frac{7,91}{4,56} = 1,73; \text{ з [2, рис. 4.2]: } \gamma_{\text{н,т}} = 0,98.$$

б) G₅₋₇:

$$I'_{\text{НОМ}} = \frac{3 \cdot 235,3}{\sqrt{3} \cdot 515} = 0,791(\text{кА});$$

$$\frac{I_{\text{ПО}}}{I'_{\text{НОМ}}} = \frac{1,918}{0,791} = 2,42; \text{ з [2, рис. 4.2]: } \gamma_{\text{н},\tau} = 0,96.$$

K₂: а) G₁₋₄:

$$I'_{\text{НОМ}} = \frac{4 \cdot 588}{\sqrt{3} \cdot 230} = 5,9(\text{кА});$$

$$\frac{I_{\text{ПО}}}{I'_{\text{НОМ}}} = \frac{5,252}{5,9} = 0,9 < 1; \quad \gamma_{\text{н},\tau} = 1.$$

б) G₅₋₇:

$$I'_{\text{НОМ}} = \frac{3 \cdot 235,3}{\sqrt{3} \cdot 230} = 1,77(\text{кА});$$

$$\frac{I_{\text{ПО}}}{I'_{\text{НОМ}}} = \frac{5,753}{1,77} = 3,82; \quad \gamma_{\text{н},\tau} = 0,95.$$

K₃: а) G₁:

$$I'_{\text{НОМ}} = \frac{588}{\sqrt{3} \cdot 20} = 29,4(\text{кА});$$

$$\frac{I_{\text{ПО}}}{I'_{\text{НОМ}}} = \frac{78,991}{29,4} = 2,7; \quad \gamma_{\text{н},\tau} = 0,96.$$

б) G₂₋₄:

$$I'_{\text{НОМ}} = \frac{3 \cdot 588}{\sqrt{3} \cdot 20} = 50,92(\text{кА});$$

$$\frac{I_{\text{ПО}}}{I'_{\text{НОМ}}} = \frac{48,691}{50,92} = 0,96; \quad \gamma_{\text{н},\tau} = 1.$$

в) G₅₋₇:

$$I'_{\text{НОМ}} = \frac{3 \cdot 235,3}{\sqrt{3} \cdot 20} = 20,38 (\text{кА});$$

$$\frac{I_{\text{ПО}}}{I'_{\text{НОМ}}} = \frac{15,684}{20,38} = 0,77; \quad \gamma_{\text{n},\tau} = 1.$$

K₄: а) G₇:

$$I'_{\text{НОМ}G7} = \frac{235,3}{\sqrt{3} \cdot 15,75} = 8,625 (\text{кА});$$

$$\frac{I_{\text{ПО}}}{I'_{\text{НОМ}}} = \frac{51,143}{8,625} = 5,9; \quad \gamma_{\text{n},\tau} = 0,85.$$

б) G₁₋₄:

в) G_{5,6}:

$$I'_{\text{НОМ}} = \frac{2 \cdot 235,3}{\sqrt{3} \cdot 15,75} = 17,25 (\text{кА});$$

$$\frac{I_{\text{ПО}}}{I'_{\text{НОМ}}} = \frac{22,272}{17,25} = 1,3; \quad \gamma_{\text{n},\tau} = 0,98.$$

K₅: а) G₁₋₄:

$$I'_{\text{НОМ}} = \frac{4 \cdot 588}{\sqrt{3} \cdot 37} = 36,7 (\text{кА});$$

$$\frac{I_{\text{ПО}}}{I'_{\text{НОМ}}} = \frac{9,686}{36,7} = 0,26 < 1; \quad \gamma_{\text{n},\tau} = 1.$$

б) G₅₋₇:

$$I'_{\text{ном}} = \frac{3 \cdot 235,3}{\sqrt{3} \cdot 37} = 11 (\text{кА});$$

$$\frac{I_{\text{по}}}{I'_{\text{ном}}} = \frac{12,414}{11} = 1,13; \quad \gamma_{\text{н},\tau} = 0,99.$$

Результати розрахунку струмів КЗ зводимо в таблиці 4.1 і 4.2. Визначимо складові струму КЗ від двигунів ВП

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{пт.Дв}} &= I_{\text{но.Дв}} \cdot e^{-\tau/0,07}; \\ i_{\text{ат.Дв}} &= \sqrt{2} \cdot I_{\text{но.Дв}} \cdot e^{-\tau/0,04}; \\ i_{\text{у.Дв}} &= \sqrt{2} \cdot I_{\text{но.Дв}} \cdot K_{\text{у.Дв}}. \end{aligned} \right\}$$

$$I_{\text{пт.Дв}} = 13,833 \cdot e^{-0,05/0,07} = 6,772 (\text{кА});$$

$$i_{\text{ат.Дв}} = \sqrt{2} \cdot 13,833 \cdot e^{-0,05/0,04} = 5,604 (\text{кА});$$

$$i_{\text{у.Дв}} = \sqrt{2} \cdot 13,833 \cdot 1,65 = 32,275 (\text{кА}).$$

Таблиця 4.1 – Дані для визначення складових струмів КЗ

Точка КЗ	Вітка живлення	Ку	Та, с	тс, с	$e^{(-\tau/Ta)}$	$\gamma_{\text{н},\tau}$
К-1 ВРУ-500кВ	Система	Січ.85	0.06	0.03	0.607	1.0
	Г 1-4	1.983	0.35	0.03	0.918	0.98
	Г 5-7	1.955	0.26	0.03	0.891	0.96
К-2 ВРУ-220кВ	Система	1.717	0.03	0.045	0.223	1.0
	Г 1-4	1.983	0.35	0.045	0.879	1.0
	Г 5-7	1.955	0.26	0.045	0.841	0.95
К-3 Г1 500МВТ	Система	Січ.85	0.06	0.03	0.607	1.0
	Г 2-4	1.983	0.35	0.03	0.918	1.0

	Г 5-7	1.955	0.26	0.03	0.891	1.0
	Г1	Січ.98	0.478	0.03	0.939	0.96
К-4 Г7 200МВт	Система	Січ.85	0.06	0.045	0.472	1.0
	Г 1-4	1.983	0.35	0.045	0.879	1.0
	Г 5,6	1.955	0.26	0.045	0.841	0.98
	Г 7	1.982	0.545	0.045	0.921	0.85
К-5 НН АТЗ 35кВ	Система	Січ.85	0.06	0.06	0.368	1.0
	Г 1-4	1.983	0.35	0.06	0.842	1.0
	Г 5-7	1.955	0.26	0.06	0.794	0.99
К-6, К-7 РУ ВП-6кВ	С + Г 1-7	Січ.83	0.054	0.05	0.396	1.0
	Двигуни	Січ.65	0.04	0.05	0.287	1.0

Таблиця 4.2 – Таблиця результатів розрахунку струмів КЗ

Точка КЗ	Вітка живлення	$I_{\text{до}}$, кА	$i_{\text{у}}$, кА	$i_{\text{ат}}$, кА	$I_{\text{пт}}$, кА	Примітка
К-1 ВРУ- 500	Система	3,958	10,353	3,394	3,958	-
	Г 1-4	7,91	22,179	10,266	7,752	-
	Г 5-7	1,918	3,301	2,416	1,841	Комут. апарат і шини
	Сума	13,785	37,833	16,076	13,55	-
К-2 ВРУ- 220	Система	2,642	6,415	0,834	2,642	-
	Г 1-4	5,252	14,728	6,531	5,252	-
	Г 5-7	6,753	18,668	8,031	6,415	Комут. апарат і шини
	Сума	14,648	39,81	15,396	14,31	-
К-3	Система	32,078	83,912	27,511	32,078	-

Г1 500МВт	Г 2-4	48,691	136,528	63,194	48,691	-
	Г 5-7	15,684	43,357	19,761	15,684	ШИНИ В ОСН. КОЛІ
	Сума без Г1	96,453	263,797	110,465	96,453	-
	Г1	78,991	221,151	104,898	75,831	-
	Сума	175,444	484,949	215,364	172,284	ШИНИ ДО ВП
К-4 Г7 200МВт	Система	12,954	33,887	8,652	12,954	-
	Г 1-4	25,73	72,147	31,993	25,73	-
	Г 5,6	22,272	61,568	26,488	21,826	ШИНИ В ОСН. КОЛІ
	Сума без Г7	60,956	167,601	67,133	60,511	-
	Г 7	51,143	143,331	66,585	43,472	-
	Сума	112,099	310,932	133,718	103,982	ШИНИ ДО ВП

К-5 НН АТЗ 35кВт	Система	4,86	12,713	2,528	4,86	Комут. апарат
	Г 1-4	9,686	27,158	11,538	9,686	-
	Г 5-7	12,414	34,317	13,936	12,29	шини
	Сума	26,96	74,188	28,002	26,835	-
К-6 РУ ВП-6 кВ	С + Г 1-7	13,885	35,929	7,778	13,885	-
	Двигуни	13,833	32,275	5,604	6,772	Комут. апарат
	Сума	27,718	68,203	13,382	20,657	шини
К-7 РУ ВП-6 кВ	С + Г 1-7	16,423	42,496	9,2	16,423	-
	Двигуни	13,833	32,275	5,604	6,772	Комут. апарат
	Сума	30,256	74,771	14,804	23,195	шини

4.1.2 Визначення максимальних струмів приєднань та імпульсів квадратичного струму

ВРУ-500 кВ:

Максимальні струми:

$$I_{\max.W} = \frac{P_{\text{гр}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi};$$

$$I_{\max.БТ} = \frac{S_{\Gamma.\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot 0,95};$$

$$I_{\max.АТЗ} = \frac{1,5 \cdot S_{\text{АТ.ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}.$$

$$I_{\max.W} = \frac{900 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 500 \cdot 0,85} = 1224 \text{ (A)};$$

$$I_{\max.БТ1} = \frac{588 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 500 \cdot 0,95} = 715,8 \text{ (A)};$$

$$I_{\max.АТЗ} = \frac{1,5 \cdot 3 \cdot 167 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 500} = 579,2 \text{ (A)}.$$

Імпульс квадратичного струму:

$$B_k = I_{\text{по}}^2 (t_{\text{вим}} + T_a);$$

$$B_k = 13,785^2 (0,2 + 0,35) = 104,5 \text{ (кА}^2 \cdot \text{с)},$$

де $t_{\text{вим}}$ — час вимикання КЗ, с.

ВРУ-220 кВ:

$$I_{\max.W} = \frac{200 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,85} = 618,2 \text{ (A)};$$

$$I_{\max. \text{BT2}} = \frac{588 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,95} = 1626,8 \text{ (A)};$$

$$I_{\max. \text{AT3}} = \frac{1,5 \cdot 3 \cdot 167 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220} = 1974,5 \text{ (A)};$$

$$I_{\max. \text{TR}} = \frac{40 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220} = 105,1 \text{ (A)}.$$

$$B_{\kappa} = 14,648^2 (0,2 + 0,35) = 118 \text{ (кА}^2 \cdot \text{с)}.$$

Коло генератора G1 (500 МВт):

$$I_{\max. G} = \frac{I_{G. \text{ном}}}{0,95}.$$

$$I_{\max. G} = \frac{17 \cdot 10^3}{0,95} = 17895 \text{ (A)};$$

$$I_{\max. \text{ТВП}} = \frac{25500}{\sqrt{3} \cdot 20} = 736 \text{ (A)}.$$

Імпульс квадратичного струму [3]:

$$B_{\kappa} = B_{\text{Кп}} + B_{\text{Ка}} = (B_{\text{пс}} + B_{\text{пг}} + B_{\text{пгс}}) + B_{\text{Ка}} = (I_{\text{с}}^2 + B_{\text{пг}} \cdot I_{\text{п,о,г}}^2 + 2 \cdot I_{\text{с}} \cdot T_{\text{с}} \cdot I_{\text{п,о,г}}) \cdot t_{\text{вим}} \\ + (I_{\text{с}}^2 \cdot T_{\text{а,с}} + I_{\text{п,о,г}}^2 \cdot T_{\text{а,г}} + 4 \cdot I_{\text{с}} \cdot I_{\text{п,о,г}} / (1/T_{\text{а,с}} + 1/T_{\text{а,г}})),$$

$$\text{де } t_{\text{вим}} = 4 \text{ с}; B_{\text{пг}} = 0,3; T_{\text{с}} = 0,52; T_{\text{а,г}} = 0,478 \text{ с}; I_{\text{п,о,г}} = 78,991 \text{ кА};$$

$$I_{\text{с}} = 96,453 \text{ кА}; T_{\text{а,с}} = 0,35 \text{ с}.$$

$$B_{\kappa} = (96,453^2 + 0,3 \cdot 78,991^2 + 2 \cdot 96,453 \cdot 78,991 \cdot 0,52) \cdot 4 + (96,453^2 \cdot 0,35 + 78,991^2 \cdot 0,478 + \\ + (4 \cdot 96,453 \cdot 78,991) / (1/0,35 + 1/0,478)) = 88791,1 \text{ (кА}^2 \cdot \text{с)}.$$

Коло генератора G7 (200 МВт):

$$I_{\max. G} = \frac{8,625 \cdot 10^3}{0,95} = 9079 \text{ (A)};$$

$$I_{\max. \text{ТВП}} = \frac{10200}{\sqrt{3} \cdot 15,75} = 374 \text{ (A)}.$$

Імпульс квадратичного струму [3]:

$$B_K = (60,956^2 + 0,3 \cdot 51,143^2 + 2 \cdot 60,956 \cdot 51,143 \cdot 0,52) \cdot 4 + (60,956^2 \cdot 0,35 + 51,143^2 \cdot 0,545 + (4 \cdot 60,956 \cdot 51,143) / (1/0,35 + 1/0,545)) = 36353,8 \text{ (кА}^2 \cdot \text{с)}.$$

де $t_{\text{вим}} = 4 \text{ с}$; $B_{* \text{ПГ}} = 0,3$; $T_* = 0,52$; $T_{a, \Gamma} = 0,545 \text{ с}$; $I_{\text{П,о,Г}} = 51,143 \text{ кА}$; $I_c = 60,956 \text{ кА}$;

$$T_{a, c} = 0,35 \text{ с}$$

РУ ВП-6 кВ:

$$I_{\max \text{ ТВП}} = \frac{32000}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 2} = 1541,4 \text{ (A)};$$

$$I_{\max \text{ TR}} = \frac{40000}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 2} = 1926,8 \text{ (A)}.$$

$$B_K = I_{\text{пос}}^2 (t_{\text{вим}} + T_{\text{асх}}) + I_{\text{ноД}}^2 (0,5 T_{\text{Д}}' + T_{\text{асх}}) + 2 I_{\text{пос}} \cdot I_{\text{ноД}} (T_{\text{Д}}' + T_{\text{асх}}),$$

$$T_{a \text{ сх}} = \frac{T_{ac} I_{\text{пос}} + T_{aД} I_{\text{ноД}}}{I_{\text{пос}} + I_{\text{ноД}}};$$

$$T_{\text{асх}} = \frac{0,054 \cdot 16,423 + 0,04 \cdot 13,833}{16,423 + 13,833} = 0,048 \text{ (с)}.$$

$$B_K = 16,423^2 (0,3 + 0,048) + 13,833^2 (0,5 \cdot 0,07 + 0,048) + 2 \cdot 16,423 \cdot 13,833 (0,07 + 0,048) = 163 \text{ (кА}^2 \cdot \text{с)}.$$

Сторона НН АТЗ 35 кВ:

$$I_{\max. \text{TR}} = \frac{40 \cdot 10^7}{\sqrt{3} \cdot 35} = 660,6 \text{ (A)}.$$

$$B_K = 26,96^2 (0,2 + 0,35) = 399,8 \text{ (кА}^2 \cdot \text{с)}.$$

4.1.3 Вибір комутаційної апаратури

Таблиця 4.3 – Вибір вимикачів та роз'єднувачів

ВРУ-500 кВ Розрахункові дані	Каталожні дані	
	LTV 550E2	РПД-500- 1/3200У1
$U_{уст} = 500 \text{ кВ}$ $I_{max} = 1224 \text{ А}$ $I_{п,τ} = 13,55 \text{ кА}$ $i_{а,τ} = 16,076 \text{ кА}$ $i_y = 37,833 \text{ кА}$ $B_k = 104,5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$U_{ном} = 500 \text{ кВ}$ $I_{ном} = 3150 \text{ А}$ $I_{вим.ном} = 50 \text{ кА}$ $i_{а,ном} = \sqrt{2} \cdot B_{ном} \cdot I_{вим.ном} =$ $\sqrt{2} \cdot 0,5 \cdot 50 = 35,25 \text{ кА}$ $i_{дин} = 128 \text{ кА}$ $I_T^2 \cdot t_T = 50^2 \cdot 3 = 7500 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$U_{ном} = 750 \text{ кВ}$ $I_{ном} = 3200 \text{ А}$ $i_{дин} = 162 \text{ кА}$ $I_T^2 \cdot t_T = 63^2 \cdot 2 = 7938 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$
ВРУ-220 кВ	LTV 245E1	РПД3.1- 220/2000У1
$U_{уст} = 220 \text{ кВ}$ $I_{max} = 1974,5 \text{ А}$ $I_{п,τ} = 14,31 \text{ кА}$ $i_{а,τ} = 15,396 \text{ кА}$ $I_{п,о} = 14,648 \text{ кА}$ $i_y = 39,81 \text{ кА}$ $B_k = 118 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$U_{ном} = 220 \text{ кВ}$ $I_{ном} = 2000 \text{ А}$ $I_{вим.ном} = 40 \text{ кА}$ $i_{а,ном} = \sqrt{2} \cdot 0,35 \cdot 40 = 19,74 \text{ кА}$ $I_{дин} = 40 \text{ кА}$ $i_{дин} = 102 \text{ кА}$ $I_T^2 \cdot t_T = 40^2 \cdot 3 = 4800 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$U_{ном} = 220 \text{ кВ}$ $I_{ном} = 2000 \text{ А}$ $i_{дин} = 100 \text{ кА}$ $I_T^2 \cdot t_T = 4800 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$
Сторона 35 кВ АТЗ:	ВБНК-35 (С-35-2000-50БУ1)	РПД3.1-35/2000У1

$U_{уст} = 35 \text{ кВ}$ $I_{max} = 660,6 \text{ А}$ $I_{пт} = 26,835 \text{ кА}$ $i_{a\tau} = 28,002 \text{ кА}$ $2 I_{пт} + i_{a\tau} = 65,9 \text{ кА}$ $I_{п\sqrt{}} = 26,96 \text{ кА}$ $i_y = 74,188 \text{ кА}$ $B_k = 399,8 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$U_{ном} = 35 \text{ кВ (35 кВ)}$ $I_{ном} = 1600 \text{ кА (2000 А)}$ $I_{вим.ном} = 25 \text{ кА (50 кА)}$ $i_{a,ном} = \sqrt{2 \cdot 0,23 \cdot 25} = 8,84 \text{ кА (11,28 кА)}$ $2\sqrt{I_{вим.ном} (1 + B_{ном})} = 44,2 \text{ кА (67,68 кА)}$ $I_{дин} = 25 \text{ кА (40 кА)}$ $i_{дин} = 64 \text{ кА (127 кА)}$ $I_T^2 \cdot t_T = 1875 \text{ кА}^2 \cdot \text{с (10000)}$	$U_{ном} = 35 \text{ кВ}$ $I_{ном} = 2000 \text{ А}$ $i_{дин} = 80 \text{ кА}$ $I_T^2 \cdot t_T = 31,5^2 \cdot 4 = 3969 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$
РУ ВП 6 кВ:	ВР3-10	Комірка КРУ типу КУ10
$U_{уст} = 6 \text{ кВ}$ $I_{max} = 1926,8 \text{ А}$ $I_{п,\tau} = 16,423 \text{ кА}$ $i_{a,\tau} = 9,2 \text{ кА}$ $I_{п,о} = 16,423 \text{ кА}$ $i_y = 42,496 \text{ кА}$ $B_k = 163 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$ $I_{ном} = 2000 \text{ А}$ $I_{вим.ном} = 40 \text{ кА}$ $i_{a,ном} = \sqrt{2 \cdot 0,23 \cdot 40} = 12,97 \text{ кА}$ $I_{дин} = 40 \text{ кА}$ $i_{дин} = 102 \text{ кА}$ $I_T^2 \cdot t_T = 31,5^2 \cdot 4 = 3969 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$ $I_{ном} = 3150 \text{ А}$

4.2 Порівняння альтернативних варіантів вимикачів

У рамках аналізу ефективності вибору комутаційної апаратури для електричної мережі напругою 10 кВ розглянуто два основні типи вимикачів: вакуумні та елегазові. Обидва варіанти відповідають технічним вимогам щодо номінальної напруги, номінального струму, струму короткого замикання та механічного ресурсу. Водночас між ними існують суттєві конструктивні, експлуатаційні та екологічні відмінності, що визначають доцільність застосування в конкретних умовах.

4.2.1 Технічна характеристика

Обидва типи вимикачів здатні комутувати номінальні струми до 1250 А при напрузі 10–12 кВ та гасити струми короткого замикання до 25 кА. При цьому вакуумні вимикачі (наприклад, ABB VD4) мають вищий механічний ресурс (до 30 000 циклів), тоді як типові елегазові аналоги (наприклад, Siemens 8DA) забезпечують до 10 000 циклів. Вакуумні апарати не потребують додаткових систем ущільнення або контролю газового середовища, що позитивно впливає на їхню стабільність у тривалій експлуатації. [10]

4.2.2 Експлуатаційні аспекти

Однією з ключових переваг вакуумних вимикачів є мінімальні вимоги до технічного обслуговування. Вони не потребують дозавправлення робочого середовища, не мають витрат на контроль тиску газу і не вимагають спеціалізованого обладнання для діагностики. Натомість елегазові вимикачі вимагають регулярного контролю параметрів SF₆, зокрема тиску, щільності та вологості. У випадку витoku газу або деградації ізоляційних властивостей апарата виникає потреба у складному ремонті або його повній заміні.

4.2.3 Екологічні чинники

Елегаз (SF₆), що використовується в елегазових вимикачах, має глобальний потенціал потепління (GWP) понад 23 000, що є критичним з екологічної точки зору. Вакуумні вимикачі є повністю екологічно безпечними, оскільки не містять шкідливих речовин. У контексті європейського екологічного законодавства, зокрема Регламенту ЄС №517/2014, що передбачає поетапне скорочення використання SF₆, вакуумна технологія розглядається як базовий стандарт для нових інсталяцій. [10]

4.2.4 Техніко-економічне порівняння

У таблиці 4.4 наведено узагальнене порівняння основних характеристик для обох типів вимикачів:

Таблиця 4.4 – Порівняльна характеристика вакуумного та елегазового вимикачів

Параметр	Вакуумний вимикач (ABB VD4)	Елегазовий вимикач (Siemens 8DA)
Номінальна напруга, кВ	12	12
Номінальний струм, А	1250	1250
Струм вимкнення КЗ, кА	25	25
Механічний ресурс, циклів	до 30 000	до 10 000
Технічне обслуговування	1 раз на 5 років	щорічне
Наявність SF ₆	відсутній	присутній
Екологічна безпечність	висока	низька (GWP > 23 000)
Орієнтовна вартість, у.о.	1.0	1.3

4.3 Оцінка надійності, коефіцієнт готовності, технічне обслуговування

У цьому підпункті здійснюється порівняльна оцінка надійності експлуатації двох типів вимикачів, розглянутих раніше — вакуумного (на прикладі ABB VD4) та елегазового (на прикладі Siemens 8DA). Ключовими критеріями виступають: коефіцієнт готовності, напрацювання на відмову, середній час відновлення, а також вимоги до технічного обслуговування.

Коефіцієнт готовності К_г визначається співвідношенням часу безвідмовної роботи до загального часу, що включає і період відновлення, за формулою:

$$K_g = T_p / (T_p + T_v),$$

де Т_п – середній час напрацювання на відмову.

Т_в – середній час відновлення після відмови.

Згідно з технічними характеристиками, вакуумний вимикач ABB VD4 має ресурс до 30 000 механічних циклів, що дозволяє експлуатувати його понад 20

років без суттєвих втручань у роботу. Середній час відновлення становить до 4 годин, що зумовлює коефіцієнт готовності понад 0.995. Елегазовий вимикач Siemens 8DA має ресурс до 10 000 циклів, а середній час відновлення після відмови становить 12–24 години, що суттєво знижує його коефіцієнт готовності до 0.98. У таблиці 5.3 наведено узагальнену оцінку експлуатаційної надійності та обслуговування для обох типів обладнання. [11]

Таблиця 4.5 – Порівняння показників надійності та обслуговування вакуумного та элегазового вимикачів

Параметр	ABB VD4 (вакуумний)	Siemens 8DA (елегазовий)
Напрацювання на відмову, циклів	до 30 000	до 10 000
Середній час відновлення, год	до 4	12–24
Коефіцієнт готовності Кг	> 0.995	~0.98
Періодичність ТО	1 раз на 5 років	щорічне
Тип обслуговування	переважно візуальний контроль	контроль параметрів SF ₆ , тиск, волога
Необхідність спеціального обладнання	відсутня	наявна

Узагальнюючи результати аналізу, можна констатувати, що вакуумні вимикачі демонструють вищі показники експлуатаційної надійності за умов знижених витрат на технічне обслуговування. Їхній тривалий ресурс безвідмовної роботи, спрощена процедура регламентного контролю, а також відсутність екологічно небезпечних складових зумовлюють доцільність застосування таких апаратів у розподільчих мережах середньої напруги. З урахуванням техніко-економічних та екологічних критеріїв, використання вакуумної комутаційної техніки є обґрунтованим вибором відповідно до сучасних вимог енергетичної галузі.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ПОЖЕЖНА БЕЗПЕКА

Бакалаврська робота має за мету дослідження особливостей застосування вакуумних вимикачів. Відтак, під час монтажу та подальшої експлуатації КРУ потрібно передбачати заходи із запобігання негативному впливу на працівників таких небезпечних і шкідливих виробничих факторів [12, 13].

Фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо).

Хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (пил).

Фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: сенсорні та емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

5.1 Технічні рішення з безпечної організації будівельно-монтажних робіт на об'єкті

5.1.1 Технічні рішення щодо безпечної організації робочих місць під час робіт на комутаційних апаратах і комплектному розподільчому устаткуванні

Перед допуском до роботи на комутаційних апаратах з дистанційним керуванням слід виконати такі технічні заходи:

- вимкнути допоміжні кола (керування, сигналізації, підігрівання та ін.) і

силові кола приводу;

- зачинити засувки на трубопроводі подавання повітря в баки вимикачів або на пневматичні приводи та випустити в атмосферу повітря, яке в них містилось; у цьому разі спускні пробки (клапани) залишаються у відкритому положенні;

- привести в неробоче положення вмикальний вантаж або вмикальні пружини;

- вивісити плакати "Не вмикати! Працюють люди" - на ключах дистанційного керування і "Не відкривати! Працюють люди" - на закритих засувках.

Для проведення тестових операцій із вмикання та вимикання комутаційних апаратів без подачі робочої напруги, що здійснюються під час налаштувальних та регулювальних робіт, дозволяється короткочасне підключення допоміжних та силових кіл приводу, а також забезпечення подачі стисненого повітря в приводний механізм та до самого вимикача. Перед цим необхідно тимчасово зняти попереджувальні плакати, які сигналізують про виконання робіт персоналом, зокрема "Не вмикати! Працюють люди" та "Не відкривати! Працюють люди".

Дистанційне керування комутаційним обладнанням (його увімкнення та вимкнення) під час випробувань дозволяється тільки оперативному та оперативно-виробничому персоналу, якщо такі дії прямо вказані у спеціальному розділі наряду ("Окремі вказівки"). Після завершення випробувань, якщо необхідно продовжити роботи на комутаційному апараті, відповідальний черговий або, з його дозволу, керівник робіт повинен забезпечити повторне виконання всіх встановлених правил безпеки.

Підніматись на повітряний вимикач, що перебуває під робочим тиском, дозволяється тільки під час випробування та виконання налагоджувальних робіт

(регулювання демпферів, знімання віброграм, під'єднання провідників до вимірювальних приладів або їх від'єднання, визначення місць витікання повітря тощо). Забороняється підніматись на вимкнений повітряний вимикач з повітронаповненим віддільником, якщо віддільник перебуває під робочим тиском.

Перед підніманням на повітряний вимикач для проведення випробувань та налагодження необхідно:

- вимкнути кола керування;
- заблокувати кнопку місцевого керування та пускові клапани (наприклад, від'єднати повітровідні трубки, замкнути шафи тощо) або поставити біля вимикача проінструктованого члена бригади, який допускав би до оперування вимикачем (після вмикання кіл керування) за вказівкою керівника робіт тільки одного працівника. У разі перебування працівників на повітряному вимикачі, що знаходиться під тиском, слід припинити усі роботи в шафах керування і розподільчих.

Забороняється перебування працівників біля повітряних вимикачів під час їх вмикання і вимикання, налагодження та випробування. Команду на виконання операцій повітряним вимикачем у разі проведення випробних і налагоджувальних робіт керівник робіт (або уповноважений ним член бригади) повинен подавати тільки після того, як всі члени бригади будуть відведені від вимикача на безпечну відстань або в укриття.

У разі допуску до роботи, пов'язаної з перебуванням працівників всередині повітрозбірників, необхідно:

- закрити засувки повітропроводів, по яких може бути подано повітря, зачинити їх на замок, вивісити на засувках плакати "Не відкривати! Працюють люди";
- випустити в атмосферу повітря, що перебуває під тиском в

повітрозбірнику, залишивши відкритим спускний клапан;

- від'єднати від повітрозбірника повітропровід подавання повітря і встановити на ньому заглушки.

Нульовий показ манометрів на баках вимикачів та повітрозбірниках не може бути вірогідною ознакою відсутності в них стисненого повітря. Для того, щоб зняти кришки лазів, безпосередньо перед відгвинчуванням болтів та гайок необхідно відкрити спускні клапани або засувки і переконатись у відсутності стисненого повітря. Спускні клапани або засувки дозволяється закривати тільки після загвинчування всіх болтів та гайок, що кріплять кришку лазу.

У разі виконання роботи у відсіку комірки КРУ необхідно:

- викотити візок з обладнанням;
- зачинити на замок шторку відсіку, в якому струмовідні частини залишились під напругою та вивісити плакат "Стій! Напруга";
- вивісити плакат "Працювати тут" у відсіку, де треба буде працювати.

У разі виконання роботи поза КРУ на підімкненому до нього обладнанні або на ПЛ і КЛ, що відходять, візок з вимикачем необхідно викотити з комірки; шторку або дверці зачинити на замок та вивісити на них плакат "Не вмикати! Працюють люди" або "Не вмикати! Робота на лінії". У цьому разі допускається:

- за наявності блокіровки (блоківки) між заземлювальними ножами та візком з вимикачем - встановлювати візок в контрольне положення після вмикання цих ножів;

- за відсутності такої блокіровки або заземлювальних ножів в комірках КРУ - встановлювати візок в проміжне положення між контрольним та викоченим за умови зачинення комірки КРУ на замок. Візок може встановлюватись у проміжне положення незалежно від наявності заземлення на приєднанні. Встановлювати заземлення в комірці КРУ у разі виконання роботи на ПЛ, що відходять, необхідно з урахуванням вимог цих Правил.

Встановлювати в контрольне положення візок з вимикачем для випробування та роботи в колах керування і захисту дозволяється в тих випадках, коли роботи поза КРУ на ПЛ і КЛ, що відходять, або на підімкненому до них обладнанні, враховуючи механізми, з'єднані з електродвигунами, не проводяться або встановлено заземлення в комірці КРУ.

Приміщення РУ з елегазовим обладнанням слід обладнати примусовою вентиляцією. Забороняється виконувати будь-яку роботу доти, доки не буде забезпечено п'ятикратний обмін повітря в цьому приміщенні протягом однієї години. Наявність елегазу можна перевірити за допомогою викритого вогню (сірник, свічка тощо) на рівні підлоги.

Розкривання полюсів елегазового вимикача необхідно проводити на відкритому повітрі. Якщо розкривання полюсів виконується в приміщенні, слід застосовувати спеціальну установку з вакуумним пристроєм, що забезпечує відсмоктування елегазу з робочого місця.

Якщо в процесі розкривання полюсів елегазового вимикача будуть виявлені продукти розпаду елегазу (білий порошок), їх необхідно зібрати пилососом, застосовуючи змінні фільтри.

5.1.2 Електробезпека

Основні технічні рішення щодо запобігання електротравмам:

- 1) виконання технічних заходів під час підготовки робочого місця,
- 2) застосування під час обслуговування електроустановок електрозахисних засобів.

1) Під час підготовки робочого місця для роботи, яка вимагає знімання напруги, слід виконати у зазначеній послідовності такі технічні заходи:

- провести необхідні вимкнення і вжити заходів щодо запобігання помилковому або самочинному вмиканню комутаційної апаратури;

- вивісити заборонні плакати на приводах ручного і на ключах дистанційного керування комутаційної апаратури. За необхідності струмопровідні частини слід огороджувати;

- приєднати до "землі" переносні заземлення;

- перевірити відсутність напруги на струмопровідних частинах, на які слід встановити заземлення. Якщо переносні заземлення планується ставити поблизу струмопровідних частин, що не входять в зону робочого місця, то їх огороження слід встановити до перевірки відсутності напруги та заземлення;

- встановити заземлення (увімкнути заземлювальні ножі, приєднати до вимкнених струмопровідних частин переносні заземлення) безпосередньо після перевірки відсутності напруги та вивісити плакати "Заземлено" на приводах вимикальних комутаційних апаратів;

- огородити, у разі необхідності, робочі місця або струмопровідні частини, що залишились під напругою, і вивісити на огороженнях плакати безпеки. Залежно від місцевих умов струмопровідні частини огорожують до або після їх заземлення.

2) Під час обслуговування електроустановок повинні застосовуватись засоби захисту від ураження електричним струмом, від впливу електричного поля, а також засоби індивідуального та колективного захисту. Ізолювальні електрозахисні засоби поділяються на основні і додаткові. До основних ізолювальних електрозахисних засобів, які повинні застосовуватись в електроустановках напругою понад 1000 В, відносяться: ізолювальні штанги всіх видів, ізолювальні кліщі, електровимірювальні кліщі, показчики напруги, пристрої для створення безпечних умов праці під час проведення випробувань і вимірювань в електроустановках (показчики напруги для фазування, показчики пошкодження кабелів та ін.); до додаткових – діелектричні рукавички, діелектричне взуття, діелектричні килими, ізолювальні підставки, ізолювальні

накладки, ізолювальні ковпаки, штанги для перенесення та вирівнювання потенціалу, сигналізатори напруги, захисні огороження (щити, ширми), переносні заземлення, плакати та знаки безпеки та інші засоби захисту.

Крім наведених вище засобів захисту в електроустановках повинні застосовуватись такі ЗІЗ: захисні каски – для захисту голови; захисні окуляри і щитки – для захисту очей і обличчя; протигази і респіратори – для захисту органів дихання; рукавиці – для захисту рук; запобіжні пояси та страхувальні канати.

Вибір необхідних електрозахисних засобів, засобів захисту від дії ЕП, а також ЗІЗ регламентується [14], а також іншими відповідними нормативними документами (НД) з урахуванням місцевих умов. У разі застосування основних ізолювальних електрозахисних засобів достатньо використовувати один додатковий засіб, крім випадків, що обумовлені в цих Правилах. У разі необхідності захисту працівника від напруги кроку дозволяється використовувати діелектричне взуття без застосування основних засобів захисту.

За безпечність конструкції, правильність вибору матеріалів, якість виготовлення, а також за відповідність засобів захисту чинним в Україні нормативним документам повинні нести відповідальність керівники підприємств, установ, організацій (незалежно від форми власності), що виготовляють ці засоби захисту, орган, який видав сертифікат на виробництво та на реалізацію захисних засобів, в тому числі і засобів захисту зарубіжного виробництва.

Керівники підприємств, установ, організацій та інші посадові особи несуть персональну відповідальність за виконання вимог цих Правил у межах покладених на них завдань та функціональних обов'язків згідно з чинним законодавством. Працівників, які обслуговують електроустановки, необхідно забезпечити усіма необхідними засобами захисту, навчити правилам

користування цими засобами і зобов'язати застосовувати їх для створення безпечних умов праці.

5.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

5.2.1 Мікроклімат

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату проектом передбачено:

1. Температура внутрішніх поверхонь будівельних конструкцій робочої зони та зовнішніх поверхонь обладнання при забезпеченні параметрів мікроклімату не повинні бути більше ніж на 2°C за діапазон норм.

2. Якщо температура поверхонь вище або нижче оптимальної температури повітря, то робочі місця повинні бути віддалені від них на відстань не менше 1м.

3. Для забезпечення нормованих значень руху повітря проектом передбачається витяжна та припливна вентиляційні системи.

Таблиця 5.1 – Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні з категорією робіт .

Період року	Категорія робіт	Допустимі		
		t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	Середньої важкості Па	18-27	65 при 26°C	0,2-0,4
Холодний		17-23	до 75%	не більше 0,3

5.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується концентраціями (ГДК) в мг/м. В умовах роботи на граничнодопустимих концентраціях можливими забруднювачами повітря робочої зони можуть бути пил при свердлінні отворів і різанні металевих виробів їх ГДК наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони в кабіні проектувальника установки

Назва речовини	ГДК, мг/м ³	Клас
----------------	------------------------	------

Пил нетоксичний	Максимально разова	Середньо добова	4
	0,5	0,15	

Для забезпечення параметрів мікроклімату та складу повітря робочої зони відповідно до проекту передбачено-періодичне провітрювання приміщень та використання засобів індивідуального захисту.

5.2.3 Виробниче освітлення

Для забезпечення найбільш сприятливих умов зорової праці нормуємо освітлення у виробничих приміщеннях. Характеристика зорових робіт – середньої точності.

Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 розряд зорової роботи IV, підрозряд «б».

Нормовані значення освітленості наведені в таблиці 5. 3.

Таблиця 5.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Характеристика зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характеристика фону	Штучне природне комбінованого освітлення		Природне освітлення	Сумісне освітлення
						всього	у т. ч. від загального		
Середньої точності	Від 0,5 до 1,0 включно	IV	б	середній малий	темний середній	500	200	1,5	0,9

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують

загальне штучне освітленням, що створюється за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 SG. Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 4,5 метра. При експлуатації здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні.

5.2.4 Виробничий шум

Для відносної логарифмічної шкали в якості нульових рівнів обрані показники, що характеризують мінімальний поріг сприйняття звуку людським вухом на частоті 1000 Гц. Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум Загальні вимоги безпеки». Основним джерелом шуму є механічний інструмент: дріль, перфоратори, зварювальний апарат. Допустимі рівні звукового тиску в октавних смугах частот, рівні звуку і еквівалентні рівні звуку на робочих місцях в виробничих приміщеннях і на території підприємств представлені в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в								
	стандартизованих			октавних			смугах		
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Постійні робочі місця в промисло	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні, проектом передбачено засоби колективного захисту: акустичні, архітектурно-планувальні й організаційно-технічні. Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту – «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів

слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

Для зниження шуму потрібно:

- безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі.

- для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

- організувати перерви в роботі (15 хвилин), після кожної години роботи з пристроями що є джерелом шуму;

5.2.5 Виробничі вібрації

Джерелами вібрацій в умовах, що розглядаються в проекті, являються насосні агрегати, вентилятори, дрілі, болгарки, перфоратори, які відносяться до типу загальної вібрації.

Основні параметри вібрації, такі як середньоквадратичне значення віброприскорення та віброшвидкості, логарифмічні рівні приведені у таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Середньоквадратичні значення віброприскорення та віброшвидкості

Категорія вібрації по санітарним	Напрямок дії	Нормативні, корекційовані по частоті та еквівалентні корекційовані значення			
		Віброприскорення		Віброшвидкість	
		$\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$	ДБ	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$	ДБ
За	Z_0 ,	0,1	100	0,2	92

Для зменшення дії вібрацій на працюючих проектом передбачено:

- динамічне погашення вібрації - приєднання до захисного об'єкту системи, реакції якої зменшують розмах вібрації об'єкта в точках приєднання системи;
- зміна конструктивних елементів машин;
- застосування засобів індивідуального захисту, а саме рукавиці, вкладиші і прокладки, віброзахисне взуття з пружним демпферуючим низом.

5.3 Пожежна безпека

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують ССБТ «Пожежна безпека. Загальні вимоги». Типові правила пожежної безпеки для промислових підприємств і інструкції на окремих об'єктах.

Приміщення п/ст за вибухонебезпекою та пожежонебезпекою відноситься до категорії Д – речовини і матеріали, що зазначені вище для категорій приміщень В (крім горючих газів, горючих пилу і волокон), а також негорючі речовини і матеріали в холодному стані (за температури навколишнього середовища), за умов, що приміщення, в яких знаходяться (зберігаються, переробляються, транспортуються) зазначені вище речовини і матеріали, не відносяться до категорій А, Б або В, з зонами П-III (місця, де зберігаються тверді горючі речовини). Будівля, в якій розташовані ці приміщення, характеризується III ступенем вогнестійкості.

До III ступеня вогнестійкості відносяться будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону. Для перекриттів дозволяється застосовувати дерев'яні конструкції, захищені штукатуркою або негорючими листовими, плитними матеріалами, або матеріалами груп горючості Г1 (низької горючості), Г2 (помірної горючості). До елементів покриттів не висуваються вимоги щодо межі вогнестійкості, поширення вогню, при цьому елементи горищного покриття з деревини повинні мати вогнезахисну обробку. Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у

хвилинах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2016 [15] наведено в таблиці 5.6

Таблиця 5.6 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвилинах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				коло-ни	сходові площад-ки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток	пере-криття між поверхові (у т.ч. горищні та над підвалами)	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зовнішні не-несучі	внутрішні не-несучі (перегородки)				плити, настили, прогони	балки, ферми, арки, рами
III	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M1	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M1	Не нормуються	

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН В.1.1.7-2016 [15] наведено в таблиці 5.7

Таблиця 5.7 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи проти-пожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвилинах)	Тип заповнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбур-шлюзу, не нижче
Стіни	2	REI 60	2	1
Перегородки	2	EI 15	3	2

Перекриття	2	REI 60	2	1
------------	---	--------	---	---

Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських будинків і споруд слід приймати за таблицею 5.8.

Таблиця 5.8 – Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами, а також до виробничих будинків, сільськогосподарських будівель і споруд

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IV, V
III	8/9	8/12	10/15

Найбільшу відстань до евакуаційного виходу визначаємо за об'ємом приміщення та ступені вогнестійкості будівлі.

В проектуваному приміщенні, відстань при щільності людського потоку в загальному проході, чол/м² наступна: до 1 – 100 м².

На території п/ст встановлено 19 вогнегасників ВП-5 [16].

ВИСНОВКИ

У роботі проведено комплексний аналіз сучасних комутаційних пристроїв середньої напруги (10 кВ), зокрема порівняння повітряних, елегазових (SF_6) та вакуумних вимикачів. З'ясовано, що діелектрична міцність глибокого вакууму для середніх класів напруг істотно перевищує показники елегазу і повітря. Розглянуто принцип дії вакуумного дугогасного вимикача, де гасіння електричної дуги відбувається в умовах високого вакууму, що забезпечує швидке відновлення ізоляції при мінімальній ерозії контактів. На основі порівняльної характеристики встановлено, що сучасні вакуумні вимикачі мають вищу експлуатаційну надійність та менші витрати на технічне обслуговування порівняно з елегазовими аналогами. Так, зважаючи на інновації в конструкції та вибір матеріалів контактів, вакуумні дугогасні камери майже не вимагають технічного обслуговування протягом усього життєвого циклу пристрою (до 10 000 комутаційних циклів, що відповідає більше ніж 20-річному терміну експлуатації). У порівнянні, елегазові вимикачі потребують періодичних оглядів та обслуговування, оскільки продукти розпаду SF_6 при дугогасінні можуть утворювати токсичні сполуки, що забруднюють контакти і вимагають спеціальної утилізації.

Проведене моделювання комутаційних процесів у мережах 10 кВ підтвердило здатність вакуумних вимикачів безперебійно працювати в номінальних та аварійних режимах із утворенням незначних перенапруг при відключенні струму. Отримані результати показали, що вакуумні перемикачі можуть надійно вимикати навантаження і короткі замикання, характеризуючись високою дугогасильною здатністю. Оцінка надійності продемонструвала винятково високий коефіцієнт готовності вакуумного вимикача. Зокрема, доведено, що надійність вакуумного дугогасного обладнання є надзвичайно високою – середній час відмов (MTBF) таких комірок оцінюється в сотні років

експлуатації. Відповідно, за даними провідних виробників, вакуумні та елегазові вимикачі, які використовуються в мережах середньої напруги, є надійними, майже необслуговуваними та безпечними в експлуатації.

Проведені розрахунки й аналітичні висновки по всіх розділах роботи узагальнені в ключові висновки:

1. Встановлено перевагу вакуумних комутаційних пристроїв у контексті надійності і довговічності роботи в мережах 10 кВ.
2. Доведено, що відмова від SF₆ як середовища для гасіння дуги економічно та екологічно обґрунтована, оскільки SF₆ є найпотужнішим парниковим газом (GWP ≈ 24300) і його розпад під час гасіння утворює токсичні продукти.
3. Моделювання показало, що вакуумні вимикачі забезпечують стабільне гасіння дуги без великих перенапруг, що підтверджує їх доцільність у розподільчих мережах.
4. Проведено розрахунок показників надійності: коефіцієнт готовності вакуумного вимикача наближається до одиниці навіть при помірній частоті комутацій, що забезпечує високу надійність енергопостачання.
5. Виокремлено позитивні техніко-експлуатаційні особливості вакуумних апаратів: компактність, відсутність необхідності в діелектрику-гази, значно менші витрати на техобслуговування і висока електрична й механічна зносостійкість.
6. Також враховано екологічні аспекти: у нормальних умовах експлуатації вакуумні вимикачі практично не потребують обслуговування і не виділяють в атмосферу шкідливих речовин, на відміну від застарілих SF₆-пристроїв.

Підсумовуючи, науковий аналіз підтверджує, що впровадження вакуумних вимикачів у мережах середньої напруги є перспективним напрямом модернізації. Отримані теоретичні висновки та практичні результати виконаних розрахунків свідчать про технічну доцільність і економічну вигідність використання вакуумної техніки замість традиційних SF₆-апаратів у класі 10 кВ.

Найбільш пріоритетним вважається широке впровадження вакуумних вимикачів у нових та модернізованих розподільних пристроях 10 кВ. З технічної точки зору слід використовувати сучасні моделі з удосконаленими приводами та вбудованими системами самодіагностики, що дозволяють своєчасно оцінювати стан контактів і планувати технічне обслуговування. Доцільно запроваджувати вакуумні вимикачі з постійними магнітними привідними механізмами, які споживають менше енергії при спрацьовуванні, а також моделі з дистанційним керуванням та моніторингом стану (передбачаючи інтеграцію з системами SCADA). Ініціатива проєктів із заміни елегазових та масляних вимикачів на вакуумні цілком відповідає сучасним екологічним стандартам: наприклад, оператори мереж вже тестують вакуумні комутатори напругою 69–115 кВ як альтернативу SF₆-обладнанню. Зокрема, відомо, що SF₆ має парниковий ефект у 22 200 разів вищий за CO₂, тому перехід на безфтористу технологію вакуумних вимикачів сприятиме зменшенню викидів парникових газів і підвищенню екологічності енергосистеми.

Організаційні пропозиції включають розробку навчальних програм та підвищення кваліфікації обслуговуючого персоналу щодо особливостей монтажу, експлуатації та діагностики вакуумних вимикачів. Доцільно також розробити та впровадити типові методичні рекомендації й інструкції з експлуатації нового обладнання. Крім того, рекомендується реалізувати пілотні проєкти модернізації підстанцій 10 кВ (зокрема в районах з високим навантаженням або екстремальними кліматичними умовами) – це дозволить

зібрати практичний досвід, перевірити запропоновані рішення та визначити остаточні техніко-економічні показники. Загалом реалізація згаданих технічних, екологічних та організаційних заходів створить умови для надійного функціонування мереж середньої напруги з використанням передових вакуумних комутаційних пристроїв.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Галушак В.В., Оніщук М.В. *Комутаційні апарати високої та середньої напруги*. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2018. – 228 с.
2. Беспалов В.Н., Пономарев Н.М. *Вакуумные выключатели. Конструкция и эксплуатация*. – М.: Энергоатомиздат, 2020. – 296 с.
3. Smeets R., Yanabu A., Kumagai S. *Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems*. – Springer, 2015. – 430 p.
4. Андриющенко В.Л., Петренко А.В. Електричні апарати: навчальний посібник. – Київ: КНУБА, 2020. – 192 с.
5. IEEE Std C37.04–2018. IEEE Standard Rating Structure for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis.
6. ДСТУ EN 62271-100:2017. Вимикачі змінного струму високої напруги – Технічні вимоги та випробування.
7. Мозговий В.Г., Коваль В.І. Електричні станції та підстанції. – Харків: НТУ "ХП", 2019. – 264 с.
8. IEC 62271-100:2021. High-voltage switchgear and controlgear – Part 100: Alternating current circuit-breakers.
9. ПУЕ України. Правила улаштування електроустановок України, розділи 1.4 та 3.2.
10. Каталог ABB VD4 Vacuum Circuit Breaker.
11. Каталог Siemens 3AH Vacuum Circuit Breakers.
12. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.
13. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві

будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->.

14. ДНАОП 1.1.10-1.01-97 Правила безпечної експлуатації електроустановок. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=21826.

15. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf.

16. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ) РОБОТИ

Назва роботи: Застосування вакуумних вимикачів у мережах середньої напруги: аналіз ефективності та перспективи розвитку

Тип роботи: Бакалаврська кваліфікаційна робота
(кваліфікаційна робота, курсовий проект (робота), реферат, аналітичний огляд, інше (зазначити))

Підрозділ: Кафедра електричних станцій та систем
(кафедра, факультет (інститут), навчальна група)

Керівник: к.т.н., доц., доцента каф. ЕСС Собчук Н.В.
(прізвище, ініціали, посада)

Показники звіту подібності

StrikePlagiarism	
Оригінальність	90.4
Загальна схожість	9.6

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

- ☐ Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Заявляю, що ознайомлений (-на) з повним звітом подібності, який був згенерований Системою щодо роботи.

Автор Гнатюк Р.О.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Опис прийнятого рішення

Робота допущена до захисту

Особа, відповідальна за перевірку Вишневський С.Я
(підпис) (прізвище, ініціали)

Експерт _____
(за потреби) (підпис) (прізвище, ініціали, посада)

ДОДАТОК Б

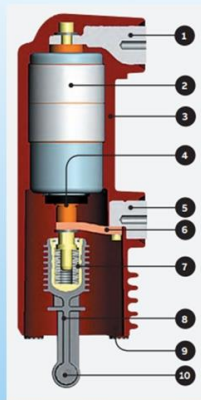
ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА ЗАСТОСУВАННЯ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ У МЕРЕЖАХ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ: АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ: Зростання навантажень на мережі середньої напруги, потреба в підвищенні надійності та екологічні вимоги зумовлюють перехід до сучасної комутаційної техніки. Вакуумні вимикачі забезпечують високу надійність, мінімальні витрати на обслуговування та не містять шкідливих газів, що робить їх перспективними для впровадження в умовах цифровізації та відмови від SF₆. Тема дослідження відповідає актуальним викликам енергетичної галузі.

МЕТА: комплексний аналіз ефективності та перспектив застосування вакуумних вимикачів у мережах середньої напруги для підвищення надійності, безпеки та екологічності комутаційних процесів.

ОСНОВНІ ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ: 1) Дослідити конструктивні особливості та принцип роботи вакуумних вимикачів; 2) Порівняти технічні, економічні та експлуатаційні характеристики вакуумних, елегазових і повітряних вимикачів; 3) Проаналізувати сучасні тенденції розвитку вакуумної комутаційної техніки; 4) Виконати практичне моделювання вибору вакуумного вимикача для мережі КЛ-10 кВ; 5) Оцінити надійність, коефіцієнт готовності та потреби в технічному обслуговуванні.

КОНСТРУКЦІЯ ВАКУУМНОГО ВИМИКАЧА



- 1) Верхній термінал
- 2) Вакуумний вимикач
- 3) Оболонка / полюс
- 4) Ступиця рухомого контакту
- 5) Нижній термінал
- 6) Гнучке підключення
- 7) Пружинна вилка шатуна
- 8) Шатун
- 9) Кріплення полюса
- 10) Підключення до приводу

ПОРІВНЯННЯ ТИПІВ ВИМИКАЧІВ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ

№	Параметр	Вакуумний вимикач	Елегазовий вимикач	Повітряний вимикач
1	Тип комутаційного середовища	Вакуум (пароплазма контактів)	Газ SF ₆ (висока діелектрика)	Стиснене повітря
2	Номінальна напруга, кВ	До 72,5 (до 145 з обмеженням)	До 800	До 245
3	Струм вимикання КЗ, кА	До 63	До 80	До 63
4	Ресурс (мех. циклів)	10 000-30 000	5000-10 000	1000-5000
5	Обслуговування	Мінімальне	Періодична перевірка газу	Високе (часте тех. Обслуговування)
6	Екологічність	Дуже висока (немає газів)	Низька (SF ₆ = GWP > 20 000)	Середня (повітря – безпечне)

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВАКУУМНОЇ КОМУТАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

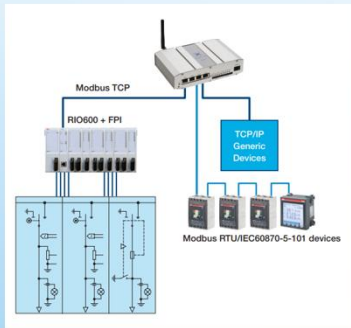


Схема інтеграції вакуумних вимикачів у систему Smart Grid (за ABB).

Сучасні тенденції енергетики орієнтовані на цифровізацію, автоматизацію та екологічну безпеку. Вакуумні вимикачі активно інтегруються у Smart Grid як основні елементи комутації завдяки високій надійності, відсутності токсичних газів та мінімальним витратам на обслуговування. На схемі зображено приклад цифрової розподільчої підстанції, де вакуумні вимикачі працюють у зв'язці з сенсорами, контролерами та комунікаційними модулями. Така архітектура дозволяє здійснювати дистанційне керування, моніторинг параметрів і виявлення аварій у режимі реального часу. Відмова від елегазових вимикачів на користь вакуумних — один із ключових векторів розвитку європейських енергосистем, що спрямований на досягнення кліматичних цілей та енергоефективності.

ВИБІР ВАКУУМНОГО ВИМИКАЧА АВВ VD4 ДЛЯ МЕРЕЖІ КЛ-10КВ



6

РОЗРАХУНОК ВИБОРУ ВАКУУМНОГО ВИМИКАЧА

- 1) Визначаються параметри мережі КЛ-10 кВ
- 2) Обчислюється необхідна вимикаюча здатність
- 3) Оцінюється механічна зносостійкість
- 4) Підбирається конкретний тип вимикача
- 5) Проводиться техніко-економічне порівняння
- 6) Оформлюється схема підключення вимикача до мережі

Параметр	Вакуумний вимикач (ABB VD4)	Елегазовий вимикач (Siemens 8DA)
Номинальна напруга, кВ	12	12
Номинальний струм, А	1250	1250
Струм вимкнення КЗ, кА	25	25
Механічний ресурс, циклів	до 30 000	до 10 000
Технічне обслуговування	1 раз на 5 років	щорічне
Наявність SF ₆	відсутній	присутній
Екологічна безпеність	висока	низька (GWP > 23 000)
Орієнтовна вартість, у.о.	1.0	1.3

Порівняльна характеристика вакуумного та елегазового вимикачів

ПЕРЕВАГИ ВИБОРУ ВАКУУМНОГО ВИМИКАЧА

- ✓ Надійність (30 000 циклів)
- ✓ Мінімум обслуговування
- ✓ Сумісність із Smart Grid
- ✓ Відсутність SF₆
- ✓ Досвід впровадження в Україні



Рисунок – Зовнішній вигляд вимикача ABB VD4