

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ

(повна назва інституту/факультету)

ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Кудря С.О.  
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20 р.

**Магістерська дисертація**

зі спеціальності (спеціалізації) 141 Електроенергетика, електротехніка  
(код і назва спеціальності)

та електромеханіка

спеціалізація «Електричні станції»

на тему: Дослідження надійності високовольтних вимикачів розподільчих пристроїв електроустановок

Виконав : студент \_\_\_\_\_ 6 \_\_\_\_\_ курсу, групи ЕТ-91мп  
(шифр групи)

Корсун Олександр Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник Матеснко Ю.П., доцент, к.т.н.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант охорона праці професор, д.т.н., Третякова Л.Д.

(назва розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Консультант економіка ст. викладач Бахмачук С.В.

(назва розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ  
(повна назва)

Кафедра ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ  
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною (освітньо-науковою) програмою

Спеціальність (спеціалізація) 141 ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА,  
(код і назва)  
ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

спеціалізація «Електричні станції»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Кудря С.О.  
(підпис) (ініціали, прізвище)  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ  
на магістерську дисертацію студенту  
Корсун Олександр Сергійович**  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Дослідження надійності високовольтних вимикачів розподільчих пристроїв електроустановок

науковий керівник дисертації Матєєнко Ю.П., доцент, к.т.н.,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Строк подання студентом дисертації \_\_\_\_\_

3. Об'єкт дослідження Модель надійності високовольтних вимикачів

4. Предмет дослідження (Вихідні дані – для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою) Підвищення надійності моделі високовольтних вимикачів

## 5. Перелік завдань, які потрібно розробити

1) Проаналізувати сучасний стан проблеми; 2) Описати причини відмов високовольтних вимикачів; 3) Розглянути показники надійності роботи обладнання; 4) Розглянути та проаналізувати існуючі моделі відмов вимикачів; 5) Дослідити вплив розподільчого пристрою на надійність високовольтних вимикачів; 6) Скласти та розрахувати модель надійності високовольтного вимикача; 7) Охорона праці і безпека в надзвичайних ситуаціях від час експлуатації високовольтного вимикача 750 кВ; 8) Стартап-проект.

## 6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

1) Причини відмови високовольтних вимикачів 2) Огляд існуючих моделей відмов вимикачів 3) Аналіз існуючих моделей відмов вимикачів 4) Нормальна схема електричних з'єднань ПС 750 кВ «Київська» 5) Розрахункова частина 6) Висновки по роботі

## 7. Орієнтовний перелік публікацій

Матесенко Ю.П. Корсун О.С. Дослідження причин пошкоджуваності високовольтних вимикачів

## 8. Консультанти розділів дисертації\*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	професор, д.т.н. Третьякова Л. Д.		
Стартап-проект	ст. викладач Бахмачук С. В.		

## 9. Дата видачі завдання

### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Формування теми магістерської дисертації	01.09.2020	
2	Вивчення питання по літературних джерелах	15.09.2020	
3	Використання досліджень по темі магістерської дисертації	03.10.2020	
4	Оформлення магістерської дисертації	10.11.2020	
5	Попередній захист магістерської дисертації	17.12.2020	
6	Захист магістерської дисертації	18.12.2020	

Студент

(підпис)

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

(ініціали, прізвище)

\* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника

**ВІДГУК**  
**наукового керівника магістерської дисертації**  
**освітньо-кваліфікаційний рівень “магістр”**  
на тему: «Дослідження надійності високовольтних вимикачів  
розподільчих пристроїв електроустановок»  
студентом Корсуном Олександром Сергійовичем

У магістерській дисертації розглянуто проблему надійності високовольтного вимикача, від роботи якого залежить надійність не тільки енергооб'єктів, а й енергосистем, що є актуальною для сучасного етапу розвитку електроенергетики.

Всі розділи магістерської дисертації виконані магістрантом самостійно і включають в себе необхідні розрахунки, ілюстрації та пояснення.

У першому розділі проаналізовано причини відмов високовольтних вимикачів. Також розглянуто математичну модель високовольтних вимикачів.

У другому розділі розглянуто вплив розподільчих пристроїв на надійність високовольтного вимикача.

У третьому розділі складено модель високовольтного вимикача та проведені розрахунки надійності високовольтного вимикача. Також розраховано таблично-логічним методом надійність РУ 750 кВ ПС 750 кВ «Київська».

У четвертому розділі розглянуто питання охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуація під час експлуатації високовольтного вимикача 750 кВ.

У п'ятому розділі розроблено стартап-проект по заміні масляного вимикача типу У-110-2000-50У1 на елегазовий вимикач типу HPL170B1.

В процесі роботи над магістерською дисертацією магістрант Корсун О.С. показав уміння самостійно розробляти поставлені наукові задачі, зарекомендував себе як підготовлений до прийняття сучасних рішень та показав необхідний рівень теоретичної та практичної підготовки.

Вважаю, що в цілому магістерська дисертація виконана на високому рівні і заслуговує позитивної оцінки, отже Корсун Олександр Сергійович заслуговує присудження ступеня магістра і кваліфікації магістра з електроенергетики, електротехніки та електромеханіки по спеціальності 141 електроенергетика, електротехніка та електромеханіка за освітньою програмою електричні станції.

**Науковий керівник**  
**магістерської дисертації**

доцент, к.т.н., доц. \_\_\_\_\_ Ю.П. Матеєнко \_\_\_\_\_

(посада, науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

(ініціали, прізвище)

**РЕЦЕНЗІЯ**  
**на магістерську дисертацію**  
**на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня “магістр”**  
на тему: «Дослідження надійності високовольтних вимикачів  
розподільчих пристроїв електроустановок»  
студентом Корсуном Олександром Сергійовичем

Представлена на рецензію магістерська дисертація, повністю відповідає затвердженій темі і виданому завданню, та отримані результати задовольняють цілям поставленим у завданні.

У магістерській дисертації розглянуто проблему надійності високовольтного вимикача, від роботи якого залежить надійність не тільки енергооб'єктів, а й енергосистем, що є актуальною для сучасного етапу розвитку електроенергетики.

Магістерська дисертація виконана в рамках науково-дослідницької роботи кафедри відновлюваних джерел енергії, спеціалізації електричні станції.

В даній роботі проведено дослідження надійності високовольтних вимикачів та впливу. Складено та розраховано модель надійності високовольтного вимикача. Розглянуто вплив розподільчого пристрою на надійність високовольтного вимикача на прикладі РУ 750 кВ ПС 750 кВ «Київська».

Робота задовільняє в повному обсязі вимоги, які пред'являються до магістерських дисертацій. Зауважень по роботі немає.

Вважаю, що магістерська дисертація заслуговує оцінку «добре», а її автору, Корсуну Олександрю Сергійовичу може бути присвоєний ступінь магістра і кваліфікація магістра з електроенергетики, електротехніки та електромеханіки по спеціальності 141 електроенергетика, електротехніка та електромеханіка за освітньою програмою електричні станції.

Рецензент\_доцент, к.т.н., доц.\_\_\_\_\_Т.Л. Кацадзе \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація містить 87 сторінок, 8 рисунків, 24 таблиці, 35 джерел за переліком посилань, 6 аркушів графічної частини.

*Актуальність теми.* Високовольтні вимикачі (ВВ) як один з основних компонентів передачі "генерація-споживання електричної енергії" відіграють визначальну роль у забезпеченні надійного та безпечного функціонування електроенергетичних систем (ЕЕС) у нормальних та аварійних умовах їхньої експлуатації. Тому дослідження їх надійності є першочерговою задачею, адже вони використовуються для конфігурування ЕЕС і керування потоками електроенергії, відключення пошкоджених частин ЕЕС і обмеження розвитку подальших аварій. Через знос та старіння, що відбуваються в процесі експлуатації, вплив робочих струмів у різних режимах ЕЕС та вплив навколишнього середовища, неякісне чи несвоєчасне технічне обслуговування (ТО) в цьому надто складному за конструкцією обладнанні виникають різного роду пошкодження. ВВ є складним за своєю конструкцією механіко-електричним обладнанням. Сукупна кумулятивна дія зазначених факторів спричиняє ослаблення механічних кріплень, погіршення ізоляційних властивостей, поломки котушки вмикання/вимикання, ерозію та (або) поломки основних контактів, воронки і розширення сопел дугогасних камер та інші пошкодження. Це призводить до зниження робочих характеристик та надійності вимикачів, що з часом може стати причиною повної відмови у виконанні ними своїх функцій, зменшення строку служби і передчасного виведення з експлуатації. В цих умовах особливо важливим є достовірне оцінювання фактичного технічного стану високовольтних вимикачів.

*Мета і задачі дослідження.* Метою магістерської дисертації є розгляд надійності високовольтного вимикача, оцінка надійності вимикача в схемі РУ, що дозволить забезпечити надійність електропостачання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі, як:

1. Виконати аналіз існуючих моделей відмов високовольтних вимикачів. Визначити модель, найбільш прийнятну для практичних розрахунків надійності вимикача.
2. Дослідити вплив схеми розподільчого пристрою на надійність високовольтних вимикачів.
3. Провести розрахунки на основі складеної моделі високовольтних вимикачів.

*Об'єкт дослідження.* Високовольтний вимикач 750 кВ.

*Предмет дослідження.* Модель надійності високовольтних вимикачів.

*Методи дослідження.* Під час виконання магістерської дисертації, було використано таблично-логічний метод розрахунку надійності схеми РУ. Також були розраховані параметри надійності високовольтних вимикачів.

*Наукова новизна одержаних результатів.* Удосконалено модель відмов високовольтних вимикачів, що відрізняється від існуючих моделей урахуванням додаткових комутацій, виконуваних вимикачами в різних схемах РУ. Отримано нові результати і залежності частоти відмов вимикачів від експлуатаційних факторів, що визначаються схемою РУ.

## ABSTRACT

The master's dissertation contains 87 pages, 8 figures, 24 tables, 35 sources according to the list of references, 6 sheets of graphic part.

*Actuality of theme.* High-voltage switches (HV) as one of the main components of the transmission "generation-consumption of electricity" play a key role in ensuring the reliable and safe operation of power systems (EES) in normal and emergency conditions of their operation. Therefore, the study of their reliability is a priority, because they are used to configure the power system and control the flow of electricity, disconnecting damaged parts of the power system and limiting the development of further accidents. Due to wear and aging that occur during operation, the impact of operating currents in different modes of the power system and the environment, poor or untimely maintenance (MT) in this very complex equipment, various types of damage occur. Explosive is a complex mechanical and electrical equipment. The combined cumulative effect of these factors causes weakening of mechanical fasteners, deterioration of insulation properties, failure of the on / off coil, erosion and (or) failure of the main contacts, funnels and expansion of the nozzles of arc chambers and other damage. This leads to a decrease in the performance and reliability of the switches, which over time can lead to a complete failure of their functions, reducing the service life and premature decommissioning. In these conditions, it is especially important to reliably assess the actual technical condition of high-voltage switches.

*The purpose and tasks of the study.* The purpose of the master's dissertation is to consider the reliability of the high-voltage switch, the assessment of the reliability of the switch in the DD circuit, which will ensure the reliability of power supply.

To achieve this goal it is necessary to solve such tasks as:

1. Perform an analysis of existing models of high-voltage circuit breakers. Determine the model most suitable for practical calculations of circuit breaker reliability.
2. Investigate the effect of the switchgear circuit on the reliability of high-voltage switches.



3. Carry out calculations based on a composite model of high-voltage switches.

*Object of study.* High-voltage switch of 750 kV.

*Subject of study.* Reliability model of high-voltage switches.

*Research methods.* During the master's dissertation, the tabular-logical method of calculating the reliability of the DD scheme was used. Reliability parameters of high-voltage switches were also calculated.

*Scientific novelty of the obtained results.* The model of failures of high-voltage switches is improved, which differs from the existing models taking into account the additional switching performed by the switches in different circuits of the DD. New results and dependences of frequency of failures of switches on the operational factors defined by the DD scheme are received.

## Зміст

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	11
ВСТУП.....	12
1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ НАДІЙНОСТІ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ .....	14
1.1. Загальні положення .....	14
1.2 Причини відмови високовольтних вимикачів.....	15
1.3 Огляд показників надійності роботи та розподілу обладнання .....	18
1.4. Огляд існуючих моделей відмов вимикачів .....	20
1.5. Аналіз існуючих моделей відмов вимикачів .....	27
1.6. Аналіз моделі відмов вимикачів з урахуванням причин виникнення відмов. ....	37
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ .....	40
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СХЕМИ РОЗПОДІЛЬНОГО ПРИСТРОЮ НА НАДІЙНІСТЬ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ .....	41
2.1 Надійність електричної частини електростанцій та знижувальних підстанцій.....	41
2.2 Аналіз факторів, що визначають ступінь впливу схеми розподільного пристрою на надійність високовольтних вимикачів .....	44
2.3 Дослідження залежності частоти відмов вимикача від пошкоджуваності суміжних вимикачів .....	45
2.4 Дослідження залежності частоти відмов вимикача від пошкоджуваності субсуміжних вимикачів .....	55
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ .....	57
3. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА.....	58
3.1 Загальна дані.....	58
3.2 Розрахунок моделі надійності вимикача 750 кВ.....	58
3.3 Розрахунок надійності вимикача на РП 750 кВ .....	60
ВИСНОВИКИ ДО РОЗДІЛУ .....	67
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ВИМИКАЧА 750 КВ .....	68
Вступ.....	68
4.1 Загальна характеристика об'єкта, технічні характеристики серійного енергетичного устаткування та систем енергопостачання .....	69
4.2 Визначення обсягів і послідовності робіт у ході експлуатації.....	70

4.3 Визначення та оцінка шкідливих і небезпечних виробничих чинників ....	70
4.4 Визначення та оцінка шкідливих і небезпечних виробничих чинників ....	71
4.5 Вибір технічних та організаційних заходів з безпеки праці.....	71
4.6 Вибір засобів індивідуального захисту для обмеження впливу небезпечних і шкідливих виробничих чинників .....	73
4.7 Вибір заходів із запобігання та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій .....	74
4.8 Розрахунок технічного заходу з безпеки експлуатації.....	75
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ .....	77
5. РОЗРОБКА STARTUP-ПРОЕКТУ .....	78
ВСТУП .....	78
5.1 Ідея проекту .....	78
5.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	79
5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	80
5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту .....	82
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ .....	83
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	85

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

РУ – Розподільчий пристрій;  
ЕЕС – Електроенергетичні системи;  
КЗ – Коротке замикання;  
ВВ – Високовольтні вимикачі;  
ТО – Технічне обслуговування;  
АПВ – Автоматичне повторне включення;  
ПЛ – Повітряні лінії;  
КЛ – Кабельні лінії;  
РЗА – Релейний захист та автоматика;  
ДЗШ – Диференційний захист шин;  
ЛЕП – Лінія електропередачі.

## ВСТУП

В даний час зношеність електроустаткування мережеских і генеруючих компаній перевищує 60%. У той же час попит на електричну енергію і потужність неухильно зростає. Ці обставини потребують в найближчій перспективі значного збільшення темпів будівництва нових і реконструкції діючих енергооб'єктів. В умовах обмеження інвестиційних можливостей енергетики гостро постає завдання оптимізації витрат за рівнем капітальних вкладень і надійності на етапі проектування.

Розподільні пристрої (РУ) є важливою частиною електричних станцій і підстанцій. Визначальний вплив на надійність РУ мають високовольні вимикачі, що забезпечують комутацію електричних ланцюгів у всіх режимах. Основним показником, що характеризує експлуатаційну надійність вимикачів, є середній параметр потоку відмов (або частота відмов). Для його визначення використовують методи статистичної обробки ретроспективних даних відмов вимикачів. При використанні для конкретного вимикача середньостатистичного значення параметра потоку відмов не враховуються умови його експлуатації і місце установки в схемі РУ. Дані про відмови показують, що такий підхід призводить до помилкових результатів. Це підтверджується значним розкидом значень середнього параметра потоку відмов вимикачів, наведених в роботах різних авторів. Розрахунок надійності РУ з використанням усередненого значення частоти відмов не є достовірним і може привести до вибору неекономічних схемних рішень.

Підвищення точності визначення показників надійності вимикачів можливо на основі розвитку моделей відмов з урахуванням додаткових факторів, що впливають шляхом відмови від повністю статистичного підходу оцінки показників надійності. При цьому статистичну оцінку необхідно проводити тільки для питомих показників реалізації цих факторів, величина яких для конкретного вимикача повинна визначатися умовами його експлуатації.

Відомо, що найбільш важливими факторами, що впливають на надійність вимикачів, є: кількість вироблених ними комутацій і умови, при яких відбувалася відмова. В цьому випадку статистично визначаються тільки питомі показники пошкоджуваності. Ще одним фактором є конфігурація схеми РУ. Вона впливає на число виконаних операцій комутації. Дослідження показали, що найбільший вплив схема РУ дає на шиноз'єднувальні та секційні вимикачі в схемах зі збірними шинами і на вимикачі трансформаторів підстанцій і блокових трансформаторів електростанцій, відмови яких призводять до найбільших збитків.

Задача досліджень полягає в визначенні моделі і методик розрахунку показників функціональної надійності високовольних вимикачів з урахуванням

топології схеми розподільного пристрою. Також розглянути і систематизувати моделі відмов вимикачів. Вказати їх переваги та недоліки. Виділити найбільш важливі фактори, які необхідно враховувати в моделях при оцінці надійності вимикачів.

# 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ НАДІЙНОСТІ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ

## 1.1. Загальні положення.

Вимикач є основним комутаційним апаратом в електричних установках різних номінальних напруг. Він призначений для увімкнення та вимкнення електричних кіл в різних режимах роботи електричних мереж: тривалому навантаженні, перевантаженні, короткому замиканні, холостому ході, несинхронній роботі. Найбільш важкою і відповідальною операцією є вимкнення струмів коротких замикань (КЗ) і увімкнення вимикача на відповідне коротке замикання.

Більшість високовольтних вимикачів (включаючи їх приводи) призначені для комутації електричних кіл при нормальних і аварійних режимах в мережах трифазного змінного струму частотою 50 Гц з номінальною напругою від 6 до 750 кВ включно.

На сьогоднішній день до 60 % електрообладнання ЕЕС України або експлуатується понад нормативний строк експлуатації, або підходить до граничного терміну експлуатації. До такого обладнання відносяться і високовольтні (елегазові) вимикачі, які вже відпрацювали по 14- 16 років та наближаються до термінів проведення капітальних ремонтів.

Високовольтні вимикачі (ВВ) як один з основних компонентів передачі "генерація-споживання електричної енергії" відіграють визначальну роль у забезпеченні надійного та безпечного функціонування електроенергетичних систем (ЕЕС) у нормальних та аварійних умовах їхньої експлуатації. Тому дослідження їх надійності є першочерговою задачею, адже вони використовуються для конфігурування ЕЕС і керування потоками електроенергії, відключення пошкоджених частин ЕЕС і обмеження розвитку подальших аварій. Через знос та старіння, що відбуваються в процесі експлуатації, вплив робочих струмів у різних режимах ЕЕС та вплив навколишнього середовища, неякісне чи несвоєчасне технічне обслуговування (ТО) в цьому надто складному за конструкцією обладнанні виникають різного роду пошкодження. ВВ є складним за своєю конструкцією механіко-електричним обладнанням. Сукупна кумулятивна дія зазначених факторів спричиняє ослаблення механічних кріплень, погіршення ізоляційних властивостей, поломки котушки вмикання/вимикання, ерозію та (або) поломки основних контактів, воронки і розширення сопел дугогасних камер та інші пошкодження. Це призводить до зниження робочих характеристик та надійності вимикачів, що з часом може стати причиною повної відмови у виконанні ними своїх функцій, зменшення строку служби і передчасного виведення з експлуатації. А також до аварій, пов'язаних із втратою ізоляційних

характеристик вимикача, є пошкодження фарфору, ущільнювачів та прокладок, розгерметизація ізолюючого середовища, втрата тиску газу (повітря, елегазу), надмірна температура газу, відмова регулюючого клапана тиску повітря (для повітряних ВВ), надмірна вологість і зменшена щільність елегазу. Відомо що 38% пошкоджень електричної та діелектричної природи елегазових вимикачів спричинені витокм елегазу, включно і через ущільнення валу приводу. В цих умовах особливо важливим є достовірне оцінювання фактичного технічного стану високовольтних вимикачів. Основним показником технічного стану високовольтних вимикачів є їхній ресурс, визначення якого представляє собою важливу та складну задачу.

## 1.2 Причини відмови високовольтних вимикачів

Першочерговою вимогою до високовольтних вимикачів, які встановлені в розподільних пристроях, є надійність. Від вдалого проведення комутаційних операцій залежить подальша робота підстанції та енергосистеми в цілому. До показників надійності можна віднести: інтенсивність відмов  $\lambda$ , 1/рік; період нормальної експлуатації  $T_0$ , років (годин); ймовірність безвідмовної роботи  $P(t)$ . Інтенсивність відмов підтверджується досвідом експлуатації, а оцінку показників надійності виконують на основі аналізу статистики відмов в експлуатації [1]. Високовольтні вимикачі мають три найбільш характерні періоди роботи (рис. 1.).

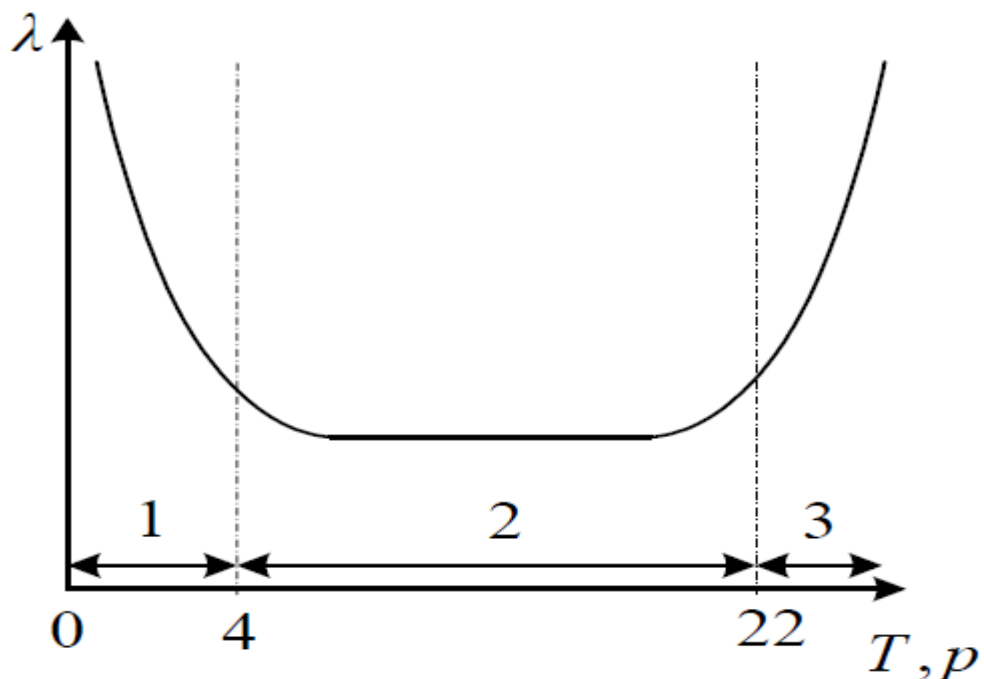


Рисунок 1 – Інтенсивність відмов високовольтних вимикачів:  
 1 – припрацювання ( $0 < t < t_1$ ); 2 – нормальна експлуатація ( $t_1 < t < t_2$ );  
 3 – старіння чи зношеність ( $t > t_2$ ).



Як показано на рис. 1 велика кількість відмов вимикачів виникає в перші роки експлуатації (період припрацювання) та в кінці терміну експлуатації (період старіння або зношеності) згідно з паспортним ресурсом. Період припрацювання характеризується інтенсивністю відмов викликаних відхиленням від вимог конструкторсько-технологічної документації. Період старіння або зношеності характеризується різким збільшенням інтенсивності відмов зумовлених зношеністю. Період нормальної експлуатації характеризується мінімальною і постійною інтенсивністю раптових відмов [2].

Пошкодження комутаційних апаратів відбуваються в стаціонарному стані і при виконанні ними операцій: відключення коротких замикань, навантажень, оперативних перемикачів і т.д.

Основними причинами пошкодження комутаційних апаратів є: неспрацьовування приводів; механічні пошкодження; знос дугогасильних пристроїв; обгорання контактів; перекриття ізоляції при зовнішніх і внутрішніх перенапруженнях.

Розглянемо приблизний розподіл причин відмов вимикачів. У масляних вимикачів вони приведені на рис. 1.1, а у повітряних - на рис. 1.2. Тут і далі причини відмов показані в процентному співвідношенні.



Рис. 1.1. Приблизний розподіл причин відмов масляних вимикачів

### Розподіл причин відмов повітряних вимикачів

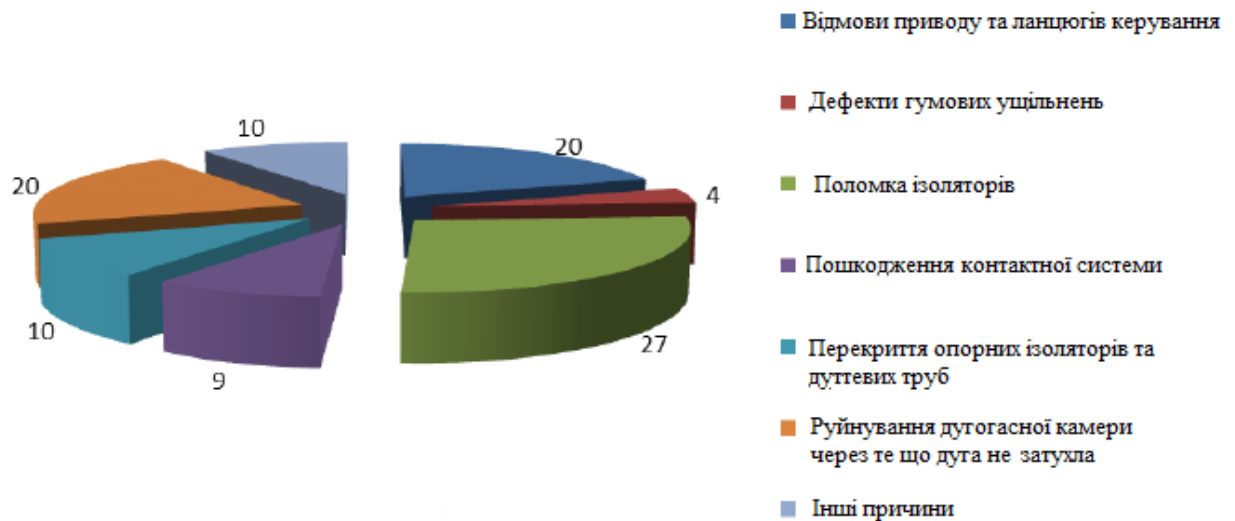


Рис. 1.2 Приблизний розподіл причин відмов повітряних вимикачів

В даний час до 33% відмов масляних вимикачів відбувається при виконанні їх основної функції - відключенні струмів коротких замикань (к.з.) і в переважній більшості випадків (66 - 100%) відмова супроводжується к.з. в середині комірки, а, отже, і на шинах. У повітряних вимикачів число відмов, пов'язаних з відключенням струмів к.з., лежить в межах 14 - 25%, але число відмов, що супроводжуються к.з. в комірці також високе (20 - 100%).

Головним недоліком вакуумних вимикачів і комплектних розподільних пристроїв (КРУ) є недостатня механічна міцність, розгерметизація дугогасного пристрою внаслідок поганої пайки.

Проаналізувавши експлуатацію елегазових вимикачів, які введені в роботу на підприємствах України, було встановлено такі причини відмов: обрив скло епоксидних тяг в дугогасильній камері; розірвання дугогасильних камер під час виконання неуспішного АПВ на елегазовому вимикачі LTB800E/4 з причини нездатності вимкнення вимикачем струму майже 500 А (холостий струм лінії); втрата тиску дугогасильного середовища; спалення електромагнітів вмикання та вимкнення; порушення кріплення ковзких контактів до дуттевого циліндра, що в свою чергу призвело до пробою ізоляційного проміжку між рухомим та нерухомим контактами вимикача, який виконав 6718 циклів; зафіксовано відмови бакових елегазових вимикачів з причини блокування кіл управління, які спричинила мала потужність і низька надійність обігрівальних приладів баків [3, 4, 5, 6]. Діаграма розподілу відмов для елегазових вимикачів зображена на рис. 3.

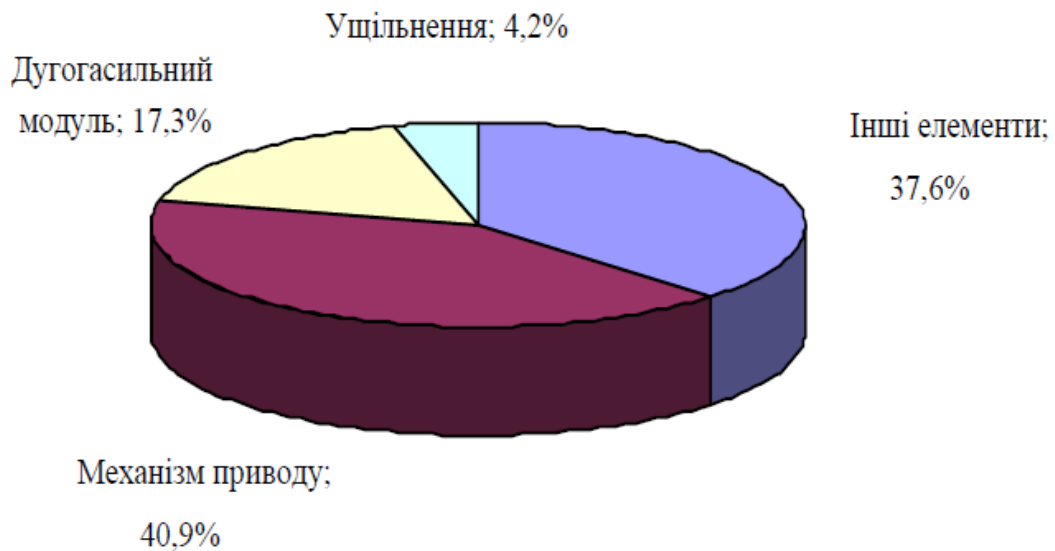


Рис. 1.3 – Діаграма відмов елегазових вимикачів

Тривалість відновлення комутаційних апаратів зростає зі збільшенням номінальної напруги електроустановок і, як правило, співставна з тривалістю відновлення повітряних ліній.

Відмови в комплектних розподільних пристроях розподіляються наступним чином: недоліки експлуатації (попадання на обладнання вологи і пилу, а також тварин через незачинені отвори, помилкові дії персоналу і ін.) - 24,8%; старіння матеріалів в процесі експлуатації - 11,7%; недоліки виготовлення і конструкції - 9,7%; вплив кліматичних і атмосферних умов - 9%; нерозрахункові режими в мережі - 11,7%; дефекти ремонту - 4,7%; монтажу - 2,4%; інші дії - 23%.

### 1.3 Огляд показників надійності роботи та розподілу обладнання

Надійність є комплексним величиною, що включає в себе можливості виконання заданих функцій у заданому об'єкті при певних системах функціонування [7]. Вона включає в себе окремі властивості надійності, такі як безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність, живучість, збереженість та ін. Кожна одинична властивість надійності відображається набором одиничних показників надійності. Конкретні показники, що використовуються при оцінці надійності, визначають типовий результат роботи та виборним методом дослідження. Найбільш важливі завдання, при вирішенні яких необхідно використовувати показники надійності окремих одиниць обладнання, є завданням визначення структурної надійності, у тому числі надійності схем розподільчих пристроїв.

Розподільчі пристрої є частиною електричних станцій і підстанцій. Оцінка їх надійності заснована на використанні наступних одиничних показників надійності обладнання:

- середнього параметра потоку відмов  $\omega$  (далі по тексту параметр потоку відмов або частота відмов),
- середнього часу відновлення  $T_v$ ,
- частоти ремонтів  $\mu$ ,
- середньої тривалості ремонтів  $T_p$ .

Частота ремонтів (капітальних, середніх, поточних) і їх середня тривалість регламентована нормативними документами [8] і інструкціями заводів-виробників. Значення цих показників наведені у відповідній довідковій літературі [9, 10]. Середній час відновлення (середній час проведення аварійного ремонту) визначається як математичне сподівання випадкової величини - часу відновлення, виходячи зі статистичних даних відновлення обладнання. На практиці при обчисленні даного показника застосовується статистичний аналог математичного очікування - середнє арифметичне значення. Таким чином, перші три показники визначаються видом, типом і класом напруги розглянутого обладнання і є або строго детермінованими в рамках існуючої системи планово-попереджувальних ремонтів обладнання, або визначаються виходячи з практики проведення аварійних ремонтів.

Параметр потоку відмов є найбільш важливим з перерахованих вище показників надійності. Він визначає експлуатаційну надійність даного обладнання. Для відновлюваних об'єктів параметр потоку відмов може бути визначений статистично за формулою:

$$\omega = \frac{m}{n \times \Delta t} \quad (1.1)$$

де  $m$  - кількість одиниць обладнання, що відмовило;  $n$  - загальне число обладнання що розглядається  $\Delta t$  - інтервал часу спостережень, виражений в роках.

При використанні в розрахунках структурної надійності значень частот відмов, визначених за формулою 1.1, доводиться приймати допущення про те, що кожна конкретна одиниця устаткування схеми буде працювати в аналогічних умовах, що і усереднена статистичними методами одиниця устаткування. Такий підхід є цілком виправданим для ряду електротехнічного обладнання (трансформаторів, автотрансформаторів, енергоблоків, електродвигунів), для

якого параметр потоку відмов слабо залежить від будь-яких факторів, або визначення такої залежності є складною або не вирішуваною задачею.

Параметр потоку відмов повітряних (ПЛ) і кабельних (КЛ) ліній електропередач, збірних шин РУ визначається виходячи з питомих показників. Для ПЛ і КЛ він залежить від довжини лінії і при практичних розрахунках визначається за формулою:

$$\omega_{\text{л}} = \omega_{0\text{л}} \times L/100 \quad (1.2)$$

де  $\omega_{0\text{л}}$  - питома значення частоти відмов лінії, приведені до 100 кілометрів,  $L$  - довжина лінії, виражена в кілометрах.

Параметр потоку відмов збірних шин розподільних пристроїв залежить від кількості приєднань

$$\omega_{\text{л}} = \omega_{0\text{ш}} \times n_{\text{приєд.}} \quad (1.3)$$

де  $\omega_{0\text{ш}}$  — питома значення частоти відмов на одне приєднання,  $n_{\text{приєд.}}$  — число приєднань. Іноді проводиться диференціювання параметра потоку відмов шин для схем з оперативними функціями роз'єднувачів і без них.

З вищесказаного можна зробити висновок про те, що параметр потоку відмов більшості обладнання має або постійне значення, або визначається виходячи з питомих значень. Виняток становлять високовольтні вимикачі, визначення параметра потоку відмов яких представляє найбільший інтерес.

Для визначення середнього параметра потоку відмов конкретного вимикача використовуються математичні моделі відмов. Під моделлю відмов прийнято розуміти математичний опис процесу виникнення відмови [11]. За десятиліття розвитку теорії надійності в електроенергетиці модель відмов вимикачів еволюціонувала від спрощених до повних моделей, причому розвиток тих і інших на різних етапах проходив паралельно.

#### **1.4. Огляд існуючих моделей відмов вимикачів**

Високовольтні вимикачі є найважливішими елементами електроенергетичної системи. Відмови даних апаратів призводять до значних технічних і економічних наслідків. Тому найбільш пильну увагу вітчизняні та зарубіжні вчені приділяли визначенню показників надійності саме вимикачів.

Існуючі моделі відмов вимикачів можна розділити на чотири основні групи:

- прості моделі;

- моделі з урахуванням типу комутованого приєднання;
- моделі з урахуванням причин виникнення відмов;
- повні моделі.

Спочатку модель відмов вимикачів представляла собою модель відмов комірки розподільного пристрою. Параметр потоку відмов вимикача включав в себе частоти відмов всіх елементів, що входять в РУ, а саме: власне вимикача з приводом, роз'єднувачів, трансформаторів струму, ошиновки і ділянки збірних шин, що примикає до осередку РУ. Надалі частота відмов збірних шин була виключена з параметра потоку відмов вимикача, а самі збірні шини при розрахунках надійності розглядалися як окремий елемент. Цей факт пояснюється використанням в країні схем з оперативними функціями роз'єднувачів, аварійність збірних шин в яких значно відрізнялася. Параметр потоку відмов вимикачів в спрощеній моделі без урахування причин виникнення аварійних відключень і їх наслідків визначається за формулою:

$$\omega_B = \omega_{\text{вим}} + \omega_{\text{роз}} + \omega_{\text{рЗА}} + \omega_{\text{ТС}} + \omega_{\text{ош}} \quad (1.4)$$

де  $\omega_{\text{вим}}$  - параметр потоку відмов власне вимикача з приводом;  $\omega_{\text{роз}}$  - параметр потоку відмов роз'єднувачів;  $\omega_{\text{рЗА}}$  - параметр потоку відмов релейного захисту та автоматики;  $\omega_{\text{ТС}}$  - параметр потоку відмов трансформаторів струму;  $\omega_{\text{ош}}$  - параметр потоку відмов ошиновки в межах осередку.

Надалі спрощена модель відмов розвивалася у напрямку обліку різної пошкоджуваності вимикачів в залежності від типу комутованих приєднань. Вимикачі поділялися на апарати, встановлені в ланцюгах ліній (лінійні вимикачі), з відповідним параметром потоку відмов  $\omega_{\text{ЛВ}}$ , і апарати, встановлені в інших ланцюгах (вимикачі інших приєднань), з частотою відмов  $\omega_{\text{ПВ}}$ . Дійсно, пошкоджуваність лінійних вимикачів сильно відрізняється від пошкоджуваності вимикачів інших приєднань через підвищену аварійність самих ліній і необхідність більш часто виводити дані приєднання в профілактичні ремонти. В результаті лінійними вимикачами виробляється набагато більша кількість операцій комутації струмів короткого замикання (КЗ). Причому в короткий інтервал часу можливо багаторазове відключення КЗ і включення на існуюче КЗ при роботі автоматики повторного включення (АПВ). Для лінійних вимикачів так само характерна підвищена кількість комутацій навантажувальних струмів. За даними [12] в залежності від рівня напруги співвідношення  $\omega_{\text{ЛВ}} / \omega_{\text{ПВ}}$  знаходиться в діапазоні від 2 до 2,9 для повітряних вимикачів та від 2 до 7 - для масляних вимикачів.

Прикладом спрощеної моделі відмов вимикачів з урахуванням типу комутованого приєднання (лінія, інше приєднання) може служити модель,

розглянута в роботі [13]. Відповідно до моделі, відмови вимикачів залежать від числа відключаються ними КЗ приблизно пропорційно протяжності  $L$  приєднаної до вимикача лінії електропередачі. Для визначення параметра потоку відмов лінійних вимикачів в [13] наводяться дві складові  $\omega_1$  та  $\omega_2$  одна з яких має постійне значення, а друга - залежить від довжини лінії. Значення частоти відмов обчислюється за формулою

$$\omega_B = \omega_1 + \omega_2 \times L/100 \quad (1.5)$$

Так само в роботі [13] модель відмов вимикачів вдосконалена з позиції створення підходу до обліку в частоті ушкоджень наслідків відмов. При цьому пропонується при аналізі надійності схем РУ розрізняти раптові відмови вимикачів, що призводять до дії пристроїв резервування відмов вимикачів (УРОВ) або захисту збірних шин і відключення суміжних вимикачів, і відмови, які виявляються при обходах і оглядах і вимагають лише виведення вимикача під позаплановий ремонт. В роботі визначено коефіцієнт  $k_{3ш}$ , що характеризує частку раптових відмов від загального числа відмов вимикача. При цьому параметр потоку раптових відмов можна визначити за формулою

$$\omega'_B = k_{3ш} \times \omega_B \quad (1.6)$$

а параметр потоку відмов, виявлених при огляді

$$\omega''_B = (1 - k_{3ш}) \times \omega_B \quad (1.7)$$

Надалі розвиток моделей відмов вимикачів йшов по шляху додаткового обліку причин виникнення відмов. Пропонувалися моделі з різною глибиною диференціювання. Спочатку зі структури відмов вимикачів була виділена складова, що характеризує частоту відмов вимикачів при автоматичному відключенні коротких замикань. Був введений параметр, що характеризує відносну пошкоджуваність вимикача при відключенні струмів КЗ  $a_B$  [14]. При цьому параметр потоку відмов пропонувалось вираховувати за формулою

$$\omega_B = p_B + a_B \times p_{ЕЛ} \quad (1.8)$$

де  $p_B$  - параметр потоку відмов вимикачів без урахування ушкоджень при відключенні КЗ;  $p_{ЕЛ}$  - сума частот відмов комутуваних вимикачем елементів.

Потім в структурі параметра потоку відмов виділили складові ушкоджень вимикачів в статичному стані, під час оперативних перемикачів і при автоматичному відключенні пошкодженого приєднання або збірних шин. В роботі [15] пропонувалось враховувати внесок кожної складової відповідними коефіцієнтами  $K_{СТ}$ ,  $K_{ОП}$ ,  $K_{КЗ}$ , обчисленими для базової схеми. В якості базової приймалася схема з одним вимикачем на приєднання з підключеною лінією середньої довжини і при числі комутацій вимикачем 20 операцій в рік. Коефіцієнти  $K_{СТ}$ ,  $K_{ОП}$ ,  $K_{КЗ}$  для схеми з одним вимикачем на приєднання становили 0,2; 0,6; 0,2 відповідно. Параметр потоку відмов вимикачів для інших

схем з іншим числом оперативних перемикачів, вироблених вимикачами, або іншою довжиною ліній, що підключаються визначалося за формулою

$$\omega_B = \omega_{CP} \cdot \left( K_{CT} + \frac{N_L + N_T}{20} \cdot K_{OP} + \frac{L_D}{L_{CP}} \cdot K_{K3} \right), \quad (1.9)$$

де  $N_L$  і  $N_T$  - число операцій, вироблених вимикачем в схемі для виведення в ремонт відповідно лінії і трансформатора; 20 - число операцій, вироблених лінійним вимикачем;  $L_{CP}$  - середня довжина лінії в схемі з одним вимикачем на приєднання;  $L_D$  - дійсна довжина лінії;  $\omega_{CP}$  - частота відмов вимикачів для схеми з одним вимикачем на приєднання.

Найбільш повна модель відмов вимикачів з причин їх виникнення розглянута в роботі [16]. Приймаються до розгляду пошкодження вимикача в статичному стані, під час оперативних перемикачів і при автоматичному відключенні пошкодженого приєднання або збірних шин. Пошкодження в статичному стані і під час оперативних перемикачів складають власну частоту відмов вимикачів  $\omega_{COB}$  - пошкодження при ліквідації вимикачем КЗ на суміжних елементах складають частоту відмов вимикача при автоматичному відключенні їм пошкоджених елементів зі АВТ. Середній параметр потоку відмов дорівнює сумі двох складових:

$$\omega_B = \omega_{COB} + \omega_{ABT} = \omega_{CT} + a_{OP} \cdot N_{OP} + a_{K3} \cdot \omega_{ЭЛ}, \quad (1.10)$$

де  $\omega_{CT}$  - частота відмов вимикача в статичному стані, 1 / рік;  $a_{OP}$  - відносна частота відмов під час оперативних перемикачів, 1 / операцію;  $N_{OP}$  - число операцій вироблених вимикачем в рік;  $a_{K3}$  - відносна частота відмов при автоматичному відключенні коротких замикань, 1 / операцію;  $\omega_{ЭЛ}$  - сума частот відмов суміжних елементів, при якій відключається вимикач, 1 / рік.

В роботі [17] модель уточнена з позиції врахування дій пристроїв автоматичного повторного включення (АПВ). У модель розрахунку частоти відмов вимикачів приєднань з наявністю автоматичного повторного включення не входять операції при роботі АПВ. Однак, вимикач при цьому відключався (включався), що має бути враховано в кількості операцій вироблених вимикачем в рік при розрахунку пошкоджуваності при автоматичному відключенні струмів КЗ

$$\omega_B = \omega_{CT} + a_{OP} \cdot N_{OP} + a_{K3} \cdot \sum_{i=1}^n (1 + \alpha \cdot K_{АПВ}) \cdot \omega_{ЭЛ_i}, \quad (1.11)$$

де  $\alpha$  - показник наявності АПВ (0 - автоматичне повторне включення на елементі не проводиться, 1 - проводиться);  $K_{АПВ}$  - відносна частота неуспішних дій АПВ.



Подальший розвиток модель відмов вимикачів отримала в повних моделях. Основним напрямком розвитку стала ідея обліку як причин виникнення відмов, так і їх наслідків. Суть виділення складових параметра потоку відмов за наслідками відмов полягає в тому, що односторонні і двосторонні відмови мають різні технічні та економічні наслідки. Для прикладу розглянемо схему «Дві робочі системи шин з обхідною» (рисунок 1.1). Нехай лінія W1 і трансформатор T1 підключені до першої системи шин, а лінія W2 і трансформатор T2 - до другої. При пошкодженні шиноз'єднувального вимикача, виявлених при оглядах, які не супроводжуються виникненням КЗ, необхідно тільки вивести його в ремонт без будь-яких наслідків. При односторонній відмові шиноз'єднувального вимикача Q5 в сторону першої системи шин відключається сам вимикач Q5 і вимикачі Q1 і Q3 з відключенням лінії W1 і трансформатора T1. Аналогічно при односторонній відмові шиноз'єднувального вимикача Q5 в сторону другої системи шин відключається сам вимикач Q5 і вимикачі Q2 і Q4 з відключенням лінії W2 і трансформатора T2. Якщо дана схема застосована на підстанції, в якій кожне приєднання має резерв (два трансформатора, дві лінії електропередачі одного напрямку), то одностороння відмова шиноз'єднувального вимикача призведе лише до відключення половини від загального числа приєднань зі збереженням усього потоку потужності через що залишилися в роботі лінії і трансформатор з урахуванням їх допустимої перевантажувальної здатності. Двостороння відмова вимикача Q5 призведе до відключення обох систем шин з погашенням всього РУ підстанції та значного економічного збитку.

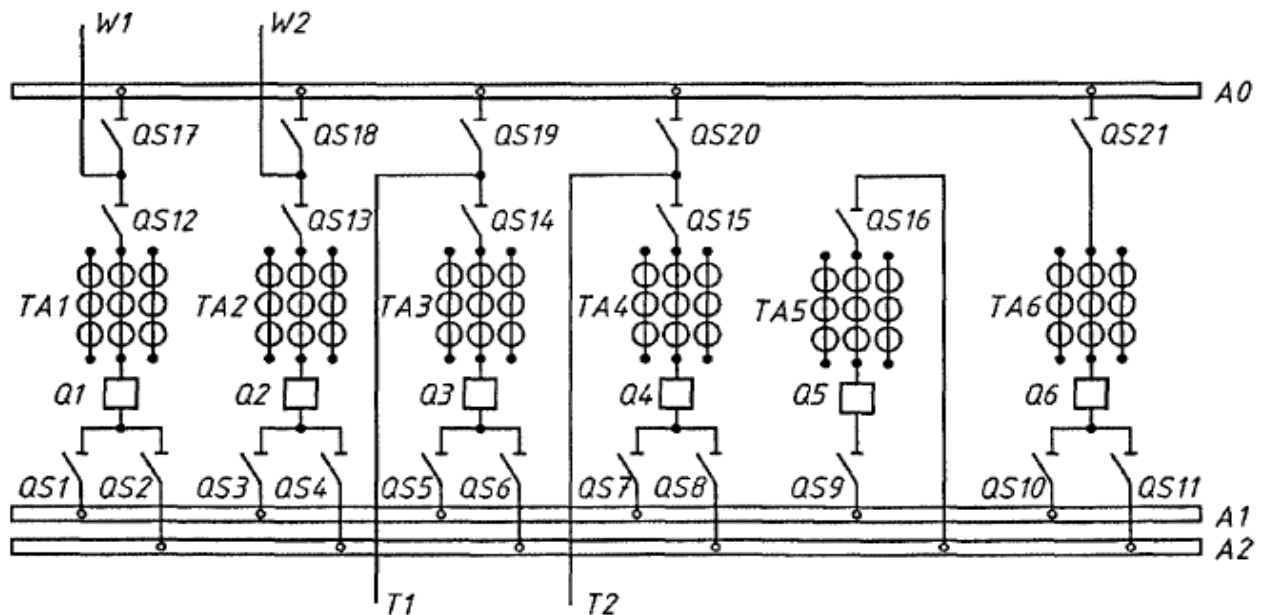


Рис. 1.4 - Схема «Дві робочі системи шин з обхідною»

Для врахування наслідків при розрахунках схемної надійності виділяють наступні складові: «КЗ в одну сторону» (кожну сторону), «КЗ в дві сторони», відмови типу «розрив». Тут під відмовами «КЗ в одну сторону» розуміються відмови, що призводять до відключення одного з приєднань або до відключення

збірних шин. Під «КЗ в дві сторони» розуміються відмови, що призводять до відключення двох приєднань або приєднання і збірні шини, що об'єднує вимикач. Під відмовами типу «розрив» розуміються ушкодження без аварійного відключення приєднань, але що вимагає виведення вимикача в ремонт.

Прикладом повних моделей служить модель, розглянута в роботі [18]. Частота ушкоджень вимикачів визначається:

- відносною частотою відмов вимикачів при автоматичному відключенні ушкоджень  $a_B^0$ ;
- відносною частотою відмов вимикачів під час оперативних перемикачів, що призводять до автоматичного відключення кожного з поєднаних їм елементів  $a_{O,B}^0$  або одночасно обох елементів, що об'єднуються  $a_{O,B}$ ;
- частотою відмов вимикачів в статичному стані, що призводять до автоматичного відключення кожного з поєднаних ним елементів  $\omega_{\Pi}^0$  або одночасно обох елементів, що об'єднуються  $\omega_{\Pi,B}$  в і залежить від частоти відключень вимикачами ушкоджень  $\omega_{\Pi}$  і частоти оперативних перемикачів, що виконуються вимикачами,  $\omega_{O,B}$ .

Сумарне значення частоти ушкоджень вимикача складає:

$$\omega_{\Sigma} = a_B^0 \cdot \omega_{\Pi} + (2 \cdot a_{O,B}^0 - a_{O,B}) \cdot \omega_{O,B} + (2 \cdot \omega_{\Pi,B}^0 - \omega_{\Pi,B}). \quad (1.12)$$

При цьому під частотою відмов вимикачів в статичному стані  $\omega_{\Pi}^0$  і  $\omega_{\Pi,B}$  розуміється пошкодження не тільки самого вимикача, а й обладнання комірки вимикача.

У наведеній формулі перший доданок визначає частоту відмов вимикачів при відключенні пошкоджених елементів, другий - частоту відмов вимикачів під час оперативних перемикачів і третій - частоту відмов вимикачів в статичному стані.

Для виключення подвійного обліку випадків одночасного автоматичного відключення обох елементів, що об'єднуються вимикачем, з суми відносних частот відмов вимикача, що призводять до автоматичного відключення кожного з поєднаних елементів  $2 \times a_{O,B}^0$ , віднімається частота відмов вимикача, що призводять до автоматичного відключення обох об'єднаних вимикачем елементів  $a_{O,B}$ .

З цієї ж причини з суми частот відмов вимикача в статичному стані, що призводять до автоматичного відключення кожного з поєднаних елементів  $2 \times \omega_{ПВ}^0$ , віднімається частота відмов вимикача, що призводять до автоматичного відключення обох об'єднаних вимикачем елементів  $\omega_{ПВ}$ .

В роботі [19] розроблена схожа модель. Пропонується враховувати наступні основні види відмов вимикачів:

1. Відмови вимикача, що знаходиться під напругою без проведення операцій, що призводять до коротких замикань з розвитком аварії, що виражаються в автоматичному відключенні всіх елементів, що живлять точку короткого замикання  $\omega_{СТ1}^{AB}$  відмова / рік. До таких пошкоджень відноситься перекриття ізоляції з боку живлять елементів.
2. Відмови вимикача, що знаходиться під напругою без проведення операцій, що не приводять до розвитку аварії (помилкові включення і відключення вимикача в періоди безвідмовної роботи приєднаних до нього елементів, перекриття ізоляції з боку елементів, що живляться через вимикач),  $\omega_{СТ2}^{AB}$  відмова / рік;
3. Відмови вимикачів в дії (включення, виключення) при проведенні планових перемикачів  $\omega_{ОП}^{AB}$  відмова / операція;
4. Відмови у відключенні при коротких замиканнях на приєднаних до вимикача елементах, що призводять до розвитку аварії,  $\omega_{КЗ1}^{AB}$  відмова / операція;
5. Відмова вимикача в автоматичному включенні під дією пристроїв АПВ та інших видів автоматики  $\omega_{КЗ2}^{AB}$ , відмова / операція.

Взаємозв'язок перелічених видів пошкоджень вимикача описується наступною функцією

$$\begin{aligned} \omega_B^{AB} = & \omega_{СТ1}^{AB} + \omega_{СТ2}^{AB} + \omega_{ОП}^{AB} \cdot n_{ОП} + n_{УСТ}^{КЗ} \cdot \left[ \omega_{КЗ1}^{AB} \cdot \sum_{k=0}^{k_{АПВ}} \exp(-k \cdot (\omega_{КЗ1}^{AB} + \omega_{КЗ2}^{AB})) \right] + \\ & + n_{УСТ}^{КЗ} \cdot \left[ \omega_{КЗ2}^{AB} \cdot \sum_{k=0}^{k_{АПВ}} \exp(-(k \cdot \omega_{КЗ1}^{AB} + (k-1) \cdot \omega_{КЗ2}^{AB})) \right] + \\ & + n_{АПВ}^{КЗ} \cdot \left[ \omega_{КЗ1}^{AB} + \omega_{КЗ2}^{AB} \cdot \exp(-\omega_{КЗ1}^{AB}) \right] \end{aligned} \quad (1.13)$$

де  $n_{ОП}$  - середньорічна кількість планових операцій, операція / рік;  $n_{УСТ}^{КЗ}$  - середньорічна кількість стійких коротких замикань на приєднаному до вимикача елементі, откл / рік;  $n_{АПВ}^{КЗ}$  - середньорічна кількість самовідновлюються відмов приєданого до вимикача елемента, відкл. / рік;  $k_{АПВ}$  - кратність дії пристрою АПВ (при відсутності АПВ  $k_{АПВ} = 0$ , при одноразовому АПВ  $k_{АПВ} = 1$  і т. д.), відносних. од.

У роботі так само пропонується враховувати зміну частоти відмов у часі. Параметр потоку відмов в довільний момент часу  $t$  складе

$$\omega_B^{AB}(t) = \omega_B^{AB} \cdot (0,1 \cdot t)^{\alpha_B - 1}, \quad (1.14)$$

$$\omega_B^{AB'}(t) = \omega_B^{AB'} \cdot (0,1 \cdot t)^{\alpha_B' - 1}. \quad (1.15)$$

для стаціонарного значення параметра потоку відмов і параметра потоку відмов, що призводять до розвитку аварії відповідно.

Розглянуті вище моделі відмов відображають існуючі підходи до визначення частоти відмов вимикачів. На даний час розроблено більше десяти моделей. Однак, при наявності різноманітних підходів до сих пір не існує єдиної методики визначення параметра потоку відмов вимикачів. Характерно також значне розходження в кількісних оцінках складових моделей відмов вимикачів в роботах різних авторів. У цих умовах представляється важливою завдання оцінки застосовності різних моделей і формування єдиного підходу до визначення параметра потоку відмов вимикачів для цілі їх подальшого використання в задачах розрахунку надійності схем РУ.

## 1.5. Аналіз існуючих моделей відмов вимикачів

У параграфі розглянуті переваги і недоліки існуючих моделей відмов високовольтних вимикачів.

Спрощені моделі прості в застосуванні і вимагають мінімального обсягу і глибини статистичного матеріалу для оцінки, що входять в розрахункові вирази складових. Однак, суттєвим недоліком є відсутність обліку причин і наслідків відмов. Для вимикачів, встановлених в різних ланцюгах, значення пошкоджуваності розрізняються до 7 разів [12]. Отже, при використанні єдиного усередненого значення параметра потоку відмов для вимикачів всіх приєднань, що характерно для спрощеної моделі, похибка розрахунку схемної надійності різко зростає. При розрахунках надійності із застосуванням спрощених моделей, тобто при бездифференційованому підході за наслідками відмов, доводиться приймати допущення про те, що всі відмови є двосторонніми. За даними [20] вони становлять лише 25-35% від загального числа пошкоджень, в той час як більша частина відмов має більш легкі наслідки. Тому оцінка схемної надійності на основі простих моделей є грубою і часто недостовірною.

Моделі, що враховують тип комутованого приєднання, мають аналогічні недоліки. Поділ вимикачів на апарати, встановлені в ланцюгах ліній і в інших

ланцюгах, лише частково вирішує дану проблему, так як різниця між частотами відмов спостерігається не тільки для лінійних вимикачів, а й для вимикачів інших приєднань.

Моделі з урахуванням причин виникнення відмов є більш точними в порівнянні з простими моделями, тому що в них враховуються різні умови роботи вимикачів. Значення параметра потоку відмов кожного конкретного вимикача в даній моделі визначається типом комутованого приєднання, його частотою відмов і частотою виведення в ремонт. При використанні моделі відсутні труднощі пов'язані з недоліком вихідних даних для оцінки питомих статистичних показників. Обсягу і глибини статистичної інформації часто досить для визначення питомих показників пошкоджуваності. Однак, як і для простих моделей, недоліком є відсутність обліку наслідків відмов, що призводить до не достовірною оцінки надійності схем розподільних пристроїв і завищення значення шкоди від недовідпуску електроенергії.

Повні моделі є найбільш точними, тому що враховують як умови роботи вимикача, так і наслідки відмов. Основною причиною, що перешкоджає застосуванню даних моделей, є відсутність необхідних статистичних даних по відмовах устаткування з необхідною глибиною диференціювання.

У зв'язку з вищесказаним доводиться стикатися з ситуацією, коли застосування найбільш точних повних моделей неможливо через відсутність необхідної статистичної інформації, а використання спрощених моделей веде до неточності при розрахунках надійності схем.

Однак, ситуація не настільки безвихідна. Наявність в структурі параметра потоку відмов вимикачів як односторонніх, так і двосторонніх відмов визначається історичними передумовами, в результаті відмови від яких можна застосувати більш просту модель.

Спочатку модель відмов вимикачів враховувала пошкоджуваність всього обладнання, що входить в комірку РУ. Надалі модель удосконалювалася, але при розрахунках за вдосконаленими моделям продовжували враховувати відмови устаткування комірки.

Розглянемо наслідки відмов обладнання осередку РУ на прикладі схеми «Дві робочі системи шин з обхідною» (рисунок 1.1). Відключення збірних шин або приєднань в даній схемі може бути викликано відмовами наступного обладнання осередку РУ: самого вимикача з приводом  $\omega_{\text{ВЫКЛ}}$  пристроїв релейного захисту та автоматики (РЗА)  $\omega_{\text{РЗА}}$ , шинних  $\omega_{\text{Ш РАЗ}}$  лінійних  $\omega_{\text{Л РАЗ}}$  роз'єднувачів, трансформаторів струму  $\omega_{\text{ТТ}}$  і ошиновки в межах осередку  $\omega_{\text{ОШ}}$

$$\omega_{\text{В}} = \omega_{\text{ВЫКЛ}} + \omega_{\text{РЗА}} + \omega_{\text{Ш РАЗ}} + \omega_{\text{Л РАЗ}} + \omega_{\text{ТТ}} + \omega_{\text{ОШ}}. \quad (1.16)$$

При відмовах шинних роз'єднувачів QS1-QS9 або QS16 спрацьовує диференційний захист шин (ДЗШ), відключаючи всі підключені до збірних шин приєднання. Вимикач, в ланцюзі якого встановлений даний роз'єднувач, так само відключиться, тому дану відмову відноситься до відмов типу «КЗ в одну сторону» (сторону збірних шин). При відмовах лінійних роз'єднувачів QS12-QS15 релейний захист відключає відповідні вимикачі Q1-Q4 і вимикач на протилежному боці лінії або за трансформатором. В результаті відключається тільки лінія або трансформатор, що є відмовою типу «КЗ в одну сторону» (сторону приєднання).

Відмови трансформатора струму призводять до відключення приєднання або збірних шин в залежності від взаємного розташування вимикача і трансформатора струму по відношенню до збірних шин. Наслідки характерні для відмов типу «КЗ в одну сторону» (сторону приєднання або збірних шин).

Наслідки відмов ошиновки залежать від місця пошкодження. У разі, якщо пошкодження сталося до вимикача по відношенню до збірних шин, відключаються всі приєднання, підключені до даної системи шин, в результаті дії ДЗШ. Дана відмова є односторонньою відмовою в сторону збірних шин. При пошкодженні на ділянці від вимикача до трансформатора струму відключається як збірні шини дією ДЗШ, так і приєднання дією резервних захистів протилежного кінця лінії або трансформатора. Дана відмова є відмовою типу «КЗ в обидві сторони». Пошкодження ошиновки на ділянці від трансформатора струму до лінії або силового трансформатора призводять до відключення приєднання, а, отже, і до відмови типу «КЗ в одну сторону».

Частота відмов РЗА в загальному випадку включає наступні складові: частота зайвих спрацьовувань  $\omega_{\text{изл}}$ , частота помилкових спрацьовувань  $\omega_{\text{лож}}$  і частота відмов у спрацюванні  $\omega_{\text{отк}}$

$$\omega_{\text{РЗА}} = \omega_{\text{изл}} + \omega_{\text{лож}} + \omega_{\text{отк}} \quad (1.17)$$

При зайвих і помилкових спрацьовування відключається тільки саме приєднання впливом на відповідний вимикач. Тому дані відмови можна віднести до типу «КЗ в одну сторону». Відмови в спрацюванні пристроїв РЗА ліквідуються дією резервних захистів. Накладання відмов основних захистів на відмови резервних захистів не розглядаються через малу ймовірність цих подій.

Аналогічні міркування можна провести для будь-якої іншої схеми.

Параметр потоку відмов власне вимикача з приводом має складну структуру. Для виявлення складових зробимо аналіз розібраних в роботі [21] основних дефектів.

Відмови вимикача можна розділити на наступні групи:

1. Відмови в приводі;
2. Відмови в системі керування;
3. Внутрішні пошкодження;
4. Зовнішні пошкодження.

Відмови в приводі призводять або до НЕ відключення, або до неповного відключення вимикача з повторними пробоями в міжконтактному проміжку. Всі внутрішні пошкодження і відмови в системі управління призводять до роботи пристроїв резервування відмов вимикачів і двосторонніх відмов (надмірний знос дугогасильної камери і контактів призводить до зменшення комутаційної здатності вимикача і відмов при відключенні; при несправності відключаючого (включаючого) електромагніта контакти вимикача НЕ розмикаються, що призводить до відмови його спрацьовування; будь-які невідповідності параметрів дугогасного середовища встановленим вимогам (знижений або підвищений тиск, небезпечно низький рівень, наявність небезпечних домішок) проводять до пошкоджень і відмов і т.д.).

Єдиними з виявлених дефектів, що призводять до односторонніх відмов, є зовнішні відмови. Основною причиною подібних відмов є перекриття зовнішньої ізоляції. Причому для колонкових вимикачів перекриття ізоляції між виводом і землею або між двома виводами призводить до відключення як приєднання, так і шин (або другого приєднання) в результаті дії ДЗШ (або захистів приєднання) і резервних захистів протилежного кінця лінії (за трансформатором). Дана відмова призведе до відмови в обидві сторони. Аналогічно для бакових вимикачів при перекритті введення в сторону шин відключаються як шини, так і приєднання. Одностороння відмова в сторону приєднання можливий для бакових вимикачів при замиканнях по зовнішній поверхні вводу, розташованого з боку приєднання. Перекриття ізоляції між двома вводами бакового вимикача призводить до двосторонніх відмов.

Для наочності всі складові параметра потоку відмов зведені в таблиці 1.1. З таблиці видно, що двосторонні відмови обумовлені в основному відмовами власне вимикача з приводом. Частота відмов ошиновки на ділянці між трансформатором струму і вимикачем незначна з огляду на невелику протяжність самої ділянки і низьку пошкоджуваність

гнучкої ошиновки.

Таблиця 1.1 - Складові відмов обладнання комірки РУ

Елемент схеми	«КЗ в одну сторону»		«КЗ в дві сторони»
	Лінії (транс- форматора)	Шин (другого приєднання)	
<i>Роз'єднувач</i>	+	+	—
<i>Трансформатор струму</i>	+	+	—
<i>Трансформатор напруги</i>	—	+	—
<i>Гнучка ошиновка</i>	+	+	+
<i>РЗА</i>			
Зайве спрацьовування	+	+	—
Хибне спрацьовування	+	+	—
Відмова в спрацьовуванні	—	—	—
<i>Власне вимикач</i>			
Привід вимикача	—	—	+
Дугогасна камера	—	—	+
Дугогасне середовище	—	—	+
Контакти	—	—	+
Перекриття ізоляції	+	+	+

Таким чином, відмови іншого обладнання осередку РУ призводять тільки до односторонніх відмов. Тому облік в параметрі потоку відмов вимикача всього переліку обладнання осередку РУ призводить до появи значної змісту складової типу «КЗ в одну сторону». Для вирішення даної проблеми доводиться використовувати більш складні моделі, виділяючи складові односторонніх відмов, які в свою чергу з'являються в моделях у вигляді одного з доданків, що враховують пошкоджуваність обладнання осередку РУ.

У ряді робіт пропонується враховувати в частоті відмов вимикача тільки відмови власне вимикача з приводом. Однак, не ясно, яким чином враховувати частоти відмов іншого обладнання комірки РУ, які в сукупності становлять близько 70% всіх відмов комірки.

При розрахунках надійності схем РУ пропонується розділити відмови устаткування осередки на три складові:

1. Відмови власне вимикача з приводом  $\omega_B$ .
2. Відмови першого приєднання (власне приєднання або збірних шин)  $\omega_{ПР1}$ .



### 3. Відмови другого приєднання (власне приєднання або збірних шин) $\omega_{\text{ПР2}}$ .

Під приєднанням тут слід розуміти все устаткування та струмовідні частини, розташовані по одну сторону від вимикача на ділянці до наступного автоматичного комутаційного апарату, включаючи цей апарат. Загальний параметр потоку відмов може бути обчислений як сума частот відмов всього обладнання, що знаходяться на даній ділянці. Можливість простого підсумовування параметрів потоку відмов пояснюється тим, що відмови будь-якого з цих апаратів проводять до однакових наслідків, тобто в даному випадку має місце послідовне з'єднання елементів щодо надійності.

Для лінійного приєднання параметр потоку відмов  $\omega_{\text{ПРЛ}}$  повинен включати частоту відмов лінії  $\omega_{\text{Л}}$  лінійних та інших роз'єднувачів  $\omega_{\text{Р}}$ , що знаходяться по одну сторону з лінією по відношенню до вимикача, трансформаторів струму  $\omega_{\text{ТТ}}$  (якщо встановлені на стороні лінії), помилкових  $\omega_{\text{ЛОЖ}}$  і зайвих  $\omega_{\text{ИЗЛ}}$  спрацьовувань пристроїв РЗА і відмов частини ошиновки  $\omega_{\text{ОШ}}$ . Параметр потоку відмов ошиновки можна умовно розділити між двома приєднаннями навпіл, тому що вимикач в основному розташований в середині комірки. Загальний параметр потоку відмов лінійного приєднання може бути визначений за формулою

$$\omega_{\text{ПРЛ}} = \omega_{\text{Л}} + n_{\text{Р}} \cdot \omega_{\text{Р}} + \omega_{\text{ЛОЖ}} + \omega_{\text{ИЗЛ}} + \omega_{\text{ТТ}} + \omega_{\text{ОШ}}/2. \quad (1.18)$$

Для трансформаторного приєднання параметр потоку відмов  $\omega_{\text{ПРТ}}$  повинен включати частоту відмов власне трансформатора  $\omega_{\text{Т}}$ , роз'єднувачів в колі трансформатора  $\omega_{\text{Т}}$ , трансформаторів струму  $\omega_{\text{ТТ}}$  (при установці їх з боку трансформатора), помилкових  $\omega_{\text{ЛОЖ}}$  і зайвих  $\omega_{\text{ИЗЛ}}$  спрацьовувань пристроїв РЗА і відмов частини ошиновки  $\omega_{\text{ОШ}}$ .

$$\omega_{\text{ПРТ}} = \omega_{\text{Т}} + n_{\text{Р}} \cdot \omega_{\text{Р}} + \omega_{\text{ЛОЖ}} + \omega_{\text{ИЗЛ}} + \omega_{\text{ТТ}} + \omega_{\text{ОШ}}/2. \quad (1.19)$$

Для приєднання збірних шин необхідно враховувати як відмови власне збірних шин  $\omega_{\text{Ш}}$ , так і відмови шинних роз'єднувачів  $\omega_{\text{Р}}$ , трансформаторів напруги  $\omega_{\text{ТН}}$ , і трансформаторів струму  $\omega_{\text{ТТ}}$ , (при їх установці з боку шин), помилкових  $\omega_{\text{ЛОЖ}}$  і зайвих  $\omega_{\text{ИЗЛ}}$  спрацьовувань пристроїв РЗА і відмов частини ошиновки  $\omega_{\text{ОШ}}$ .

$$\omega_{\text{ПРШ}} = \omega_{\text{Ш}} + n_{\text{Р}} \cdot \omega_{\text{Р}} + \omega_{\text{ЛОЖ}} + \omega_{\text{ИЗЛ}} + \omega_{\text{ТН}} + \omega_{\text{ТТ}} + \omega_{\text{ОШ}}/2. \quad (1.20)$$

У параметр потоку відмов вимикача необхідно включати тільки частоту відмов власне вимикача з приводом, а для самого вимикача застосувати більш просту модель (у порівнянні з моделлю повного типу).

В роботі [20] для вимикачів пропонується використовувати найпростішу модель відмов - модель комірки розподільчого пристрою. В основі такого підходу лежить два положення:

1. Частка відмов сучасних вимикачів в загальній частоті відмов комірки розподільчого пристрою не перевищує 20%.

2. Частота відмов сучасних високонадійних вимикачів на порядок менше ніж для вимикачів попереднього покоління.

Ці два положення привели автора роботи [20] до висновку про можливість застосування спрощеної моделі, так як різниця між вимикачами, встановлених на різних ділянках схем, по абсолютній величині не незначна, а в загальній частоті відмов комірки РУ не суттєва. Він (висновок) є не зовсім коректним для випадку використання такої моделі при розрахунках схемної надійності. Наведемо простий приклад. Нехай частка відмов трансформаторного вимикача в осередку РУ становить 15%. Тоді співвідношення відмов вимикача і решти устаткування осередку  $0,15 / 0,85$ . Прийемо, що частота відмов лінійного вимикача в два рази більше, ніж трансформаторного. Тоді співвідношення відмов для даної комірки  $0,3 / 0,85$ . Співвідношення частот відмов комірки трансформаторного і лінійного вимикача складе  $1 / 1,15$ . Таким чином, частота відмов власне вимикача, що характеризує ймовірність виникнення аварійних ситуацій з найбільш важкими наслідками, збільшилася в два рази, а в структурі комірки всього на 15%. Результати розрахунку надійності схем РУ при такому підході будуть не достовірними.

Висновки про більш високу надійність сучасних вимикачів і, в зв'язку з цим, незначної по абсолютній величині різниці показників надійності між вимикачами, встановлених на різних ділянках схеми, не знаходить статистичного підтвердження. Такі висновки зроблені виходячи з того, що частота відмов сучасних елегазових вимикачів на порядок менше значення частоти відмов вимикачів попереднього покоління, що не зовсім правильно. Рівень надійності того чи іншого апарату при розрахунках структурної надійності оцінюється не по частоті відмов, а по величині ймовірності його знаходження в стані аварійного або планового ремонту.

У таблиці 1.2 представлені зведені статистичні дані частот відмов, ремонтів, часу відновлення і часу ремонту для вимикачів різних видів і класів напруги [10,20,22,23]. На підставі цих даних проведено розрахунки ймовірностей знаходження вимикачів в різних експлуатаційних станах протягом року. Результати розрахунків зведені в таблицю 1.3.

Для напруги 110 кВ, незважаючи на найменшу частоту відмов, елегазові вимикачі мають високу ймовірність знаходження в аварійному ремонті - 161,3% від повітряних. Це пов'язано зі збільшенням часу відновлення вимикача до рівня

129 ч по відношенню до 40 год і 20 год для повітряних і масляних вимикачів відповідно. Імовірність знаходження в ремонті так само відрізняється в 2 рази від повітряних і знаходиться на одному рівні з масляними баковими вимикачами. Аналогічна ситуація спостерігається в мережі 220 кВ.

У мережах 330, 750 кВ частота відмов елегазових вимикачів в 2,5-40 разів менше ніж у інших вимикачів. При цьому час відновлення знаходиться на рівні повітряних вимикачів. Цим обумовлена на порядок менша ймовірність знаходження цих вимикачів в стані аварійного ремонт.

Таблиця 1.2 - Зведена таблиця показників надійності високовольтних вимикачів

Вид вимикача	Клас напруги, кВ	Параметри							
		$\omega_{\text{CP}}$ , 1/год	$\omega_{\text{CP}}$ , %	$T_{\text{в}}$ , ч	$T_{\text{в}}$ , %	$\mu$ , 1/год	$\mu$ , %	$T_{\text{р}}$ , ч	$T_{\text{р}}$ , %
ММ	35	0,02	100%	25	63%	0,14	70%	9	31%
МБ		0,01	50%	30	75%	0,14	70%	12	41%
ВВ		0,02	100%	40	100%	0,2	100%	29	100%
ММ	110	0,06	300%	20	100%	0,14	70%	30	67%
МБ		0,016	80%	40	200%	0,14	70%	23	51%
ЕГ		0,005	25%	129	645%	0,07	35%	56,1	125%
ВВ		0,02	100%	20	100%	0,2	100%	45	100%
МБ	220	0,055	275%	50	91%	0,14	70%	43	35%
ЕГ		0,01	50%	82,6	150%	0,066	33%	77,3	63%
ВВ		0,02	100%	55	100%	0,2	100%	122	100%
ЕГ	330	0,007	23%	18	30%	0,08	40%	29,6	26%
ВВ		0,03	100%	60	100%	0,2	100%	113	100%
ЕГ	750	0,004	3%	82,6	138%	0,066	33%	77,3	58%
ВВ		0,15	100%	60	100%	0,2	100%	133	100%

**Примітки:** 1. \* - ММ – маломасляні вимикачі; МБ - масляні бакові вимикачі; ВВ - повітряні вимикачі; ЕГ - елегазові вимикачі. 2. Параметри:  $\omega_{\text{CP}}$  - середній параметр потоку відмов;  $T_{\text{в}}$  - середня тривалість аварійного ремонту;  $\mu$  - частота ремонтів;  $T_{\text{р}}$  - тривалість планових ремонтів.

Таблиця 1.3 - Імовірність знаходження вимикачів в різних експлуатаційних станах протягом року

Вид вимикача	Клас напруги, кВ	Ймовірності знаходження в стані					
		Аварійного ремонту, $\times 10^{-5}$ в.о.	Аварійного ремонту, %	Планового ремонту, $\times 10^{-5}$ в.о.	Планового ремонту, %	Ремонту, $\times 10^{-5}$ в.о.	Ремонту, %
ММ	35	5,71	63%	14,38	22%	20,09	27%
МБ		3,42	38%	19,18	29%	22,60	30%
ВВ		9,13	100%	66,21	100%	75,34	100%
ММ	110	13,70	300%	47,95	47%	61,64	57%
МБ		7,31	160%	36,76	36%	44,06	41%
ЕГ		7,36	161%	44,83	44%	52,19	49%
ВВ		4,57	100%	103	100%	107	100%
МБ	220	31,39	250%	68,72	25%	100	34%
ЕГ		9,43	75%	58,24	21%	67,67	23%
ВВ		12,56	100%	279	100%	291	100%
ЕГ	330	1,44	7%	27,03	10%	28,47	10%
ВВ		20,55	100%	258	100%	279	100%
ЕГ	750	3,77	4%	58,24	19%	62,01	15%
ВВ		103	100%	304	100%	406	100%

Однак, за абсолютною величиною ймовірність аварійного ремонту знаходиться на одному рівні з вимикачами 110-220 кВ. Тому значне зниження частоти відмов сучасних вимикачів не привело до настільки ж помітного зменшення ймовірності відмов. Таким чином, застосування спрощених моделей при розрахунках схемної надійності в сучасних умовах не виправдано.

Виходячи з усього вищесказаного, для високовольтних вимикачів найбільш доцільно використовувати модель третього типу з урахуванням причин виникнення відмов (1.11).

## **1.6. Аналіз моделі відмов вимикачів з урахуванням причин виникнення відмов.**

Відповідно до прийнятого типом моделі, частота відмов визначається як конструктивними особливостями вимикачів, так і показниками пошкоджуваності і частоти ремонтів комутованих приєднань. Надійність конструкції вимикача визначається питомими статистичними показниками:

- частотою відмов у статичному стані  $\omega_{\text{СТ}}$  (1 / рік),
- відносною частотою відмов під час оперативних перемикачів  $a_{\text{ОП}}$  (1 / операцію),
- відносною частотою відмов при автоматичному відключенні коротких замикань (КЗ)  $a_{\text{АВТ}}$  (1 / операцію).

Пошкоджуваність і частота ремонтів комутованих приєднань враховується в моделі відмов вимикачів числом операцій в рік  $N_{\text{ОП}}$ , вироблених під час оперативних перемикачів, і числом операцій в рік  $N_{\text{АВТ}}$  проведених при ліквідації КЗ. У найбільш загальному вигляді модель відмов описується формулою.

$$\omega_{\text{В}} = \omega_{\text{СТ}} + a_{\text{ОП}} \cdot N_{\text{ОП}} + a_{\text{АВТ}} \cdot N_{\text{АВТ}}. \quad (1.21)$$

Відносна частота відмов під час оперативних перемикачів  $a_{\text{ОП}}$  дорівнює відношенню числа відмов під час оперативних перемикачів  $k_{\text{ОП.0}}$  до загальної кількості операцій вимикачем  $k_{\text{ОП.}\Sigma}$  [12]:

$$a_{\text{оп}} = k_{\text{оп.о}}/k_{\text{оп.с}} \cdot \quad (1.22)$$

Відносна частота відмов при автоматичному відключенні коротких замикань  $a_{\text{авт}}$  дорівнює відношенню числа відмов при автоматичному відключенні  $k_{\text{авт.о}}$  до загальної кількості операцій автоматичного відключення  $k_{\text{оп.с}}$  [12]:

$$a_{\text{кз}} = k_{\text{авт.о}}/k_{\text{авт.с}} \cdot \quad (1.23)$$

Кількість операцій вироблених вимикачем в рік під час оперативних перемикачів  $N_{\text{оп}}$  і при ліквідації КЗ  $N_{\text{авт}}$  є ймовірними характеристиками. При визначенні цих значень необхідно врахувати всі комутації, які він може проводити при виконанні відповідних операцій.

Згідно [16] число операцій, вироблених вимикачем під час оперативних перемикачів в рік, визначається двома складовими:

$$N_{\text{оп}} = N_{\text{сх}} \cdot (\mu_{\text{реж}} + \mu_{\text{рем}}) + (N_{\text{сх}} - 1) \cdot (1 - a_{\text{авт}}) \cdot N_{\text{авт}} \cdot \quad (1.24)$$

Перший доданок залежить від частоти проведення планових ремонтів комутованого обладнання  $\mu_{\text{рем}}$  і частоти режимних перемикачів  $\mu_{\text{реж}}$  з урахуванням числа операцій  $N_{\text{сх}}$  вироблених в даній схемі по введенню і виведенню обладнання в ремонт і з ремонту відповідно. Другий доданок визначається частою проведення оперативних перемикачів з виведення і введення обладнання в ремонт і з ремонту відповідно після ліквідації вимикачем коротких замикань.

Число операцій вироблених вимикачем при ліквідації КЗ на рік визначається сумою частот відмов комутованих їм елементів:

$$N_{\text{авт}} = \sum_{i=1}^n \omega_{\text{эл}i} \cdot \quad (1.25)$$

Крім операцій, виконуваних вимикачами при подачі команди на відключення пристроями захисту, вони виробляють комутації під дією пристроїв автоматики. Облік збільшення числа операцій, що проводяться за рахунок роботи пристроїв АПВ здійснюється за формулою

$$N_{\text{авт}} = (1 + \alpha \cdot K_{\text{АПВ}}) \cdot \omega_{\text{эл}} \quad (1.26)$$

де  $\alpha$  - показник наявності АПВ;  $K_{\text{АПВ}}$  - відносна частота неуспішних дій АПВ.

Крім здійснення комутацій приєднань і збірних шин, вимикач ліквідує відмови суміжних вимикачів. Під суміжними розуміють вимикачі, комутуючі в

схемі РУ один вузол і що резервують відмови один одного. Вимикач в цьому випадку виконує додаткові операції включення-відключення як за умови протікання струмів КЗ при роботі пристроїв резервування відмов вимикачів, так і без протікання струмів КЗ, якщо відмови суміжних вимикачів не супроводжувалися КЗ. Число таких операцій визначається схемою РУ і місцем вимикача в цій схемі. При цьому вони враховані в питомих частотах відмов під час оперативних перемикачів  $a_{оп}$  і  $a_{авт}$ , але не враховані в  $N_{оп}$  і  $N_{авт}$ .



## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

В даному розділі було розглянуто основні причини відмов високовольтних вимикачів. Також було розглянуто й систематизовано моделі відмов високовольтних вимикачів, розроблені за багаторічний період розвитку теорії надійності в електроенергетиці. Розібрані переваги і недоліки моделей відмов вимикачів. Показано, що застосування найбільш точних повних моделей неможливо через відсутність необхідної статистичної інформації, а використання спрощених моделей веде до неточності при розрахунках надійності схем.

## **2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СХЕМИ РОЗПОДІЛЬНОГО ПРИСТРОЮ НА НАДІЙНІСТЬ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ**

### **2.1 Надійність електричної частини електростанцій та знижувальних підстанцій**

Надійність роботи ЕС і ПС забезпечують на стадіях їх проектування, спорудження та експлуатації. На стадії проектування важливе значення має розроблення надійних головних схем електричних з'єднань, схем видачі потужності та живлення власних потреб. Під час спорудження ЕС та ПС повинна бути забезпечена висока якість усіх будівельно-монтажних робіт. На стадії експлуатації однаковою мірою важливі раціональне керування режимами та досконалість системи ТОР.

Забезпечення надійності головних схем електричних з'єднань електричних станцій і підстанцій. Головні схеми електричних з'єднань мають проектуватися так, щоб забезпечити високу надійність функціонування ЕС (ПС) у нормальних, ремонтних та післяаварійних експлуатаційних режимах. У нормальних режимах головна схема має забезпечувати виконання станцією (підстанцією) всіх покладених на неї функцій, а в ремонтних та післяаварійних режимах схема має забезпечувати збереження:

- необхідної кількості електричних зв'язків для видачі електроенергії від ЕС до ЕЕС та від ПС до споживачів;
- усіх транзитів потужності на шинах вищої та середньої напруги ПС.

Необхідного рівня надійності головних схем електричних з'єднань ЕС (ПС) на стадії проектування досягають, вибираючи відповідну структуру самої схеми; типів, параметрів та кількості силового устаткування; схем РУ вищої, середньої та нижчої напруги; засобів системної та технологічної автоматики.

Значно впливає на надійність головних схем рівень надійності силового устаткування. Генератори ЕС, трансформатори й автотрансформатори ЕС та ПС необхідно конструювати так, щоб забезпечувати безаварійність роботи в нормальних умовах, під час перевантажень, під час гроз, у пускових та спеціальних режимах тощо.

Експлуатація також володіє певними можливостями для підвищення надійності роботи силового електроустаткування. Насамперед в умовах експлуатації необхідно дотримуватися всіх норм і приписів системи ТОР та постійно вдосконалювати цю систему, а також неухильно дотримуватися режимних вимог.

Під час планових ремонтів силових агрегатів ліквідують виявлені під час оглядів і випробувань дефекти та несправності, щоб вони не розвинулися в пошкодження, замінюють зношені деталі для відновлення ресурсу, модернізують конструктивно недосконалі та малонадійні вузли і системи. Підвищення ефективності ТОР досягають впровадженням передових технологій ремонтних робіт та сучасних систем діагностики.

Діагностування технічного стану надзвичайно важливе для генерувальних агрегатів і силових трансформаторів. Неперервне чи навіть періодичне (під час режимних і планових зупинок та вимикань) діагностичне спостереження за характером зміни стану основних вузлів та елементів агрегату дає змогу запобігати пошкодженням і аваріям. Діагностування сприяє виробленню рекомендацій для проведення ремонтів за технічним станом, які забезпечують істотно вищу надійність роботи силового устаткування ЕС і ПС порівняно з періодичними ремонтами в системі ППР.

Режимні вимоги до силового електроустаткування доволі жорсткі. Для трансформаторів і автотрансформаторів не можна перевищувати допустимих норм систематичних навантажень і аварійних перевантажень. Для генераторів ЕС нормовано режими перевантажень за струмом статора та ротора, пускові та спеціальні режими, до яких належать: режим недозбудження, режим синхронного компенсатора, асинхронний режим та режим несиметричного навантаження. Для енергоблоків важливо не перевищувати нормованої кількості пусків та зупинок. Порушувати режимні вимоги недопустимо, оскільки їх кінцевим наслідком є передчасні відмови та зниження ресурсу устаткування.

До надійності роботи власних потреб ПС жорсткі вимоги. Їх механізми не резервують, а електропостачання приводів виконують від двох джерел живлення з автоматичним вмиканням резервного джерела. На двотрансформаторних ПС 35–750 кВ встановлюють по два трансформатори власних потреб, потужність яких вибирають за навантаженням електроприймачів власних потреб з урахуванням допустимості 30-відсоткового перевантаження під час аварійних і планових ремонтів одного з трансформаторів. Потужність електроприймачів власних потреб ПС мала, тому вони всі живляться від вторинної напруги 380/220 В трансформаторів власних потреб.

Забезпечення надійності розподільних установок електричних станцій і підстанцій. Надійність РУ визначається надійністю їх схем, надійністю електроустаткування і насамперед комутаційної апаратури, надійністю контактних з'єднань та ізоляції, надійністю грозозахисту. Надійність РУ має бути високою. Така вимога зумовлена важкими наслідками пошкоджень у них, особливо на системах шин, які часто призводять до важких системних аварій.

Схеми РУ вибирають на стадії проектування ЕС і ПС. Досвід експлуатації, техніко-економічні показники, розрахунки ступеня надійності дали змогу

розробити нормативні вимоги щодо використання конкретних схем РУ залежно від номінальної напруги, кількості приєднань, типу ЕС та ПС. Такі нормативні вимоги даються в Нормам технологічного проектування та відповідній довідковій літературі, наприклад [24]. Дотримання цих вимог забезпечує рівень надійності вибраних схем РУ, близький до оптимального. Лише в особливих випадках виникає потреба розраховувати показники надійності та уточнювати загальні нормативні вимоги щодо вибору схем РУ.

На стадії проектування ЕС і ПС вирішують також питання забезпечення блискавкозахисту РУ. Ефективність захисту РУ від прямих ударів блискавки забезпечується правильним вибором висоти, кількості та місць встановлення громовідводів, а також спорудженням контура заземлення з опором не вищим від нормованого значення. Ефективність захисту РУ від набігаючих з повітряних ЛЕП хвиль грозового походження забезпечується обмеженням імпульсного струму через вентильні розрядники (до 5–14 кА залежно від типу розрядника) та віддалей між розрядниками і захищуваним устаткуванням до нормованого значення зон захисту.

Для обмеження струму через вентильний розрядник, необхідно запобігти прямим ударам блискавки у проводи ПЛ поблизу РУ або різко зменшити ймовірність таких ударів. Для цього ділянки безтросових ліній завдовжки 1–3 км (підходи до ПС) захищають тросами. Якщо ж лінія захищена тросом по всій довжині, то на підходах до РУ ретельно виконують додаткові вимоги: опір заземлення кожної опори не повинен перевищувати 10 Ом; кут захисту проводів тросом не повинен перевищувати 30°.

Під час спорудження РУ особливу увагу необхідно звертати на монтаж контактних з'єднань. Враховуючи їх велику кількість у межах території кожного РУ, можливі епізодичні порушення окремих з'єднань, що істотно впливає на показники надійності РУ. Тому під час виконання монтажних робіт намагаються забезпечити достатню щільність контакту та механічну міцність кожного з'єднання. Якість монтажних робіт перевіряють під час здавання РУ в експлуатацію, одним з етапів якої є комплексне випробування устаткування під навантаженням протягом 72 годин.

На цьому етапі контролюють температурний режим усіх контактних з'єднань. Контактні з'єднання, температура яких перевищила допустиму, відбраковують і монтують повторно.

В умовах експлуатації надійність РУ забезпечують такими заходами:

- догляд і нагляд за устаткуванням і приміщеннями;
- періодичні огляди устаткування та конструкцій;

- температурний контроль устаткування та контактних з'єднань; профілактичні випробовування ізоляції;
- діагностування стану силового устаткування;
- спеціальні випробовування конструктивних елементів;
- планово-попереджувальні та післяаварійні ремонти устаткування та систем шин.

Для РУ важливого значення набуває забезпечення надійності роботи зовнішньої ізоляції, особливо в місцевостях з забрудненою атмосферою. Для цього ізоляцію чистять, миють, покривають гідрофобними пастами і, за потреби, посилюють. Періодичне сухе чи вологе чищення ізоляції (2–3 рази на рік) є основним засобом боротьби з її забрудненням. Ізолятори відкритих РУ напругою 35–750 кВ найефективніше очищуються через обливання переривчастим чи неперервним струменем води під тиском.

## **2.2 Аналіз факторів, що визначають ступінь впливу схеми розподільного пристрою на надійність високовольтних вимикачів**

Розподільчі пристрої є важливими установками електричних станцій і підстанцій. Вони призначені для прийому і розподілу електричної енергії; для захисту приєднань, що відходять від коротких замикань, а також від комутаційних і грозових перенапруг; для проведення вимірювань параметрів переданої електричної енергії в вузлах і по гілках РУ; для організації безпечного проведення ремонтних робіт на відхідних приєднаннях і на обладнанні РУ. Даний комплекс завдань вирішує численне обладнання, об'єднане між собою певним чином з використанням струмоведучих частин: збірних шин і ошиновки. Конфігурація і принцип об'єднання обладнання визначає топологію побудови, відображену в схемі РУ.

Недоліком моделі (1.11) є відсутність обліку топології побудови схеми РУ, а також місця установки конкретного вимикача в різних схемах РУ. Залежність частоти відмов високовольтних вимикачів від топології побудови схеми РУ обумовлено тим, що крім операцій комутації приєднань і збірних шин, вимикачі виконують функції резервування відмов один одного. При цьому збільшується число операцій, вироблених вимикачами, що підвищує ймовірність відмови. Кількість додаткових операцій для конкретного вимикача буде залежати від числа вимикачів, відмови яких він резервує, тобто від топології побудови схеми РУ.

Визначення частоти відмов конкретного вимикача може виконуватися за формулою

$$\begin{aligned} \omega_{Bk} = \omega_{Bk \text{ HEЗ}} + a_{\Sigma} \cdot \sum_{i=m1, m2} \left[ K_i \cdot \left( \sum_{j=1}^{n_i} (\omega_{B(j,i) \text{ HEЗ}}) - \omega_{Bk \text{ HEЗ}} \right) \right] + \\ + a_{\Sigma}^2 \cdot \sum_{i=m1, m2} K_i \cdot \left( \sum_{s=m3, m4} K_s \cdot \left( \sum_{p=1}^{n_s} (\omega_{B(p,s) \text{ HEЗ}}) - \omega_{B(j,i) \text{ HEЗ}} \right) \right). \end{aligned} \quad (2.1)$$

Дослідження залежності впливу на надійність вимикачів топології побудови схеми РУ до сих пір не проводилася. За даними [24] різниця в частотах відмов при розрахунках за формулами (1.11) і (2.1) може перевищувати 15%, тому важливим завданням є кількісна оцінка ступеня впливу на надійність вимикачів топології побудови схеми РУ.

Відповідно до формули (2.1) ступінь впливу на надійність вимикача топології розподільного пристрою визначається безвідмовністю суміжних і субсуміжних вимикачів і їх кількістю. Оцінімо вплив відмов вимикачів РУ один на одного в залежності від впливу параметрів. Розділимо складові рівняння (2.1) на три складові групи:

$$\omega_{Bk} = \omega_{Bk \text{ HEЗ}} + \omega_{\text{ВСМ HEЗ}} + \omega_{\text{ВСУБСМ HEЗ}}, \quad (2.2)$$

де  $\omega_{\text{ВСМ HEЗ}}$  - складова частоти відмов k-го вимикача від суміжних вимикачів,  $\omega_{\text{ВСУБСМ HEЗ}}$  - складова частоти відмов k-го вимикача від субсуміжних (розташованих за кожним з суміжних) вимикачів.

Розділивши ліву і праву частину рівняння 2.2 на  $\omega_{Bk \text{ HEЗ}}$ , отримаємо:

$$\omega_{Bk}^* = 1 + \frac{\omega_{\text{ВСМ HEЗ}}}{\omega_{Bk \text{ HEЗ}}} + \frac{\omega_{\text{ВСУБСМ HEЗ}}}{\omega_{Bk \text{ HEЗ}}} = 1 + \omega_{\text{ВСМ HEЗ}}^* + \omega_{\text{ВСУБСМ HEЗ}}^*. \quad (2.3)$$

У наведеному виразі кожний з доданків визначає частку, що вноситься власне вимикачем, суміжними і субсуміжними вимикачами відповідно. Найбільший і безпосередній внесок в підвищення частоти відмов вимикачів вносять відмови суміжних вимикачів. Субсуміжні вимикачі вносять опосередкований (через підвищення частоти відмов суміжних вимикачів) внесок, який в порівнянні з суміжними вимикачами на порядок менше. У зв'язку з цим вплив кожної складової доцільно розглянути окремо.

### 2.3 Дослідження залежності частоти відмов вимикача від пошкоджуваності суміжних вимикачів

Ступінь впливу відмов суміжних вимикачів визначає другий доданок рівняння (2.3). Значення відносної частоти відмов від суміжних вимикачів можна визначити за виразом

$$\omega_{B\text{ CM}}^* = a_{\Sigma} \cdot \sum_{i=m1, m2} K_i \cdot \left[ \left( \sum_{j=1}^{n_i} \omega_{B(j,i) \text{ HEЗ}} \right) / \omega_{Bk \text{ HEЗ}} - 1 \right]. \quad (2.4)$$

Введемо поняття середнього параметра потоку відмов вимикачів по вузлу ЮСРiНЕЗ (середньоарифметичного значення по вимикачам, підключених до i-го вузла РУ). Цю установку можна визначити за формулою

$$\omega_{CPi \text{ HEЗ}} = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} \omega_{B(j,i) \text{ HEЗ}}}{n_i}. \quad (2.5)$$

З урахуванням (2.5) рівняння (2.4) набуде вигляду

$$\begin{aligned} \omega_{B\text{ CM}}^* &= a_{\Sigma} \cdot \sum_{i=m1, m2} \left( \frac{1}{1 - (n_i - 2) \cdot a_{\Sigma}} \cdot \frac{n_i \cdot \omega_{CPi \text{ HEЗ}} - \omega_{Bk \text{ HEЗ}}}{\omega_{Bk \text{ HEЗ}}} \right) = \\ &= a_{\Sigma} \cdot \sum_{i=m1, m2} \left[ \frac{n_i}{1 - (n_i - 2) \cdot a_{\Sigma}} \cdot \left( \frac{\omega_{CPi \text{ HEЗ}}}{\omega_{Bk \text{ HEЗ}}} - \frac{1}{n_i} \right) \right]. \end{aligned} \quad (2.6)$$

З наведеного виразу (2.6) випливає, що частота відмов від суміжних вимикачів залежить:

- від кількості суміжних вимикачів  $n$ ,
- числа вузлів, комутованих вимикачем  $i$ ,
- відносної частоти відмов через відмови суміжних вимикачів  $\alpha_{\Sigma}$ ,
- відношення середнього параметра потоку відмов вимикачів по вузлу до незалежної складової параметра потоку відмов розглянутого вимикача.

Визначимо діапазони зміни, що впливають на змінні. У таблиці 2.1 на основі аналізу типових схем РУ [25], визначені максимальні значення кількості суміжних вимикачів ( $n_{\text{МАКС}}-1$ ) В залежності від класу напруги, топології побудови схеми РУ і функціональної ролі вимикача в схемі РУ. Все розмаїття побудови РУ розділене на п'ять типів схем:

1. Спрощені схеми з числом вимикачів на приєднання менше одного.
2. Кільцеві схеми з одним вимикачем на приєднання.
3. Радіальні схеми зі збірними шинами з числом вимикачів на приєднання більш одного.

4. Кільцеві схеми зі збірними шинами з числом вимикачів на приєднання більш одного з  $n_{\text{МАКС}} = 6/12$ .

5. Радіально-кільцеві схеми зі збірними шинами з числом вимикачів на приєднання більш одного з  $n_{\text{МАКС}} = 6/12$ .

При формуванні таблиці 2.1 прийняті до уваги обмеження по допустимому числу одночасно відключаються приєднань і вимикачів при пошкодженні трансформаторів, ліній і відмовах вимикачів, викладених в [25, п. 1.3.4]:

- відмова будь-якого вимикача, в РУ 35-110 кВ з секціонованими збірними шинами, як правило, не повинна призводити до відключення більше 6 приєднань, в тому числі не більше 1 трансформатора якщо при цьому не порушується більш одного ланцюга транзиту і електропостачання особливо відповідальних електроприймачів 1 -ої категорії;

- відмова будь-якого вимикача в РУ 220 кВ з секціонованими збірними шинами, як правило, не повинна призводити до відключення більше 4-х приєднань в т.ч. не більше 1 трансформатора, якщо при цьому не порушується більш одного ланцюга транзиту, електропостачання особливо відповідальних електроприймачів 1-ої категорії і стійкість роботи енергосистеми;

- відмова будь-якого вимикача в РУ 330 кВ і вище не повинна призводити до відключення більше одного трансформатора і однієї лінії, якщо це допустимо за умовами стійкості енергосистеми;

- відмова будь-якого вимикача в РУ 330 кВ і вище при ремонті іншого вимикача не повинна призводити до відключення більше 1 трансформатора і двох ліній, якщо при цьому забезпечується стійкість енергосистеми;

- число вимикачів, що одночасно відключаються в межах РУ однієї напруги повинно бути не більше: при пошкодженні лінії - двох; при пошкодженні трансформаторів напругою до 500 кВ включно - чотирьох, а при напрузі 750 кВ - трьох.

Мінімально можливе число суміжних вимикачів для одного вузла одно  $n_{\text{МИН}} = 2$ . Таким чином, діапазон зміни числа вимикачів, комутуючих один вузол,  $n = 2 \div 8$ .



Таблиця 2.1 - Максимальне число суміжних вимикачів в залежності від класу напруги, функціональної ролі вимикача і типу побудови схеми РУ

Ном. напруга, кВ	Максимальне число суміжних ВВ ( $n_{\text{МАКС}}-1$ ) для схеми типу						Максимальна значення	
	1-2		3		4			
	п	ш	п	ш	п	ш	п	ш
35	1/2	1/2	7	7/14	—	-	7	7/14
110	1/2	1/2	5	5/10	6	6/12	6	6/12
220	1/2	1/2	5	5/10	6	6/12	6	6/12
330	1/2	-	-	-	6	6/12	6	6/12
500	1/2	—	-	-	6	6/12	6	6/12
750	1/2	—	—	-	6	6/12	6	6/12

Примітки:

1. В чисельнику вказано максимальне значення суміжних вимикачів з однієї зі сторін вимикача, в знаменнику - загальне число суміжних вимикачів;
2. Прочерк означає, що для даного напруги схема не рекомендована в [25].
3. П-вимикач приєднання; Ш – шіноз'єднувальний / секційний вимикач або вимикач автоматичної перемички спрощених схем.

Число вузлів, комутованих вимикачем, визначається схемою побудови РУ і місцем вимикача в схемі. Можливі значення 1 або 2. Запропоновано нову класифікацію вимикачів для різних схем РУ. Вимикачі будь-якої типової схеми РУ можна розділити на чотири типи:

1. Вимикачі, комутуючі один вузол РУ: вимикачі приєднань схем першого і третього типу; лінійні вимикачі, що не входять в кільцеву частину схем четвертого типу.

2. Вимикачі, комутуючі два вузла РУ, з одним суміжним вимикачем з кожної зі сторін: вимикачі автоматичних перемичок схем першого типу; вимикачі схем другого типу; середні вимикачі полуторних ланцюжків схем четвертого типу.

3. Вимикачі, комутуючі два вузла РУ, з одним суміжним вимикачем з одного боку і з  $n$  суміжними вимикачами з іншого боку: трансформаторні вимикачі схем

9Н, 12Н; лінійні вимикачі схеми 15; шинні вимикачі полуторних ланцюжків схем четвертого типу.

4. Вимикачі, комутуючі два вузла РУ, з числом суміжних вимикачів по обидва боки більше одного: секційні і шинні з'єднувальні вимикачі схем третього типу.

Відповідно до наведеної класифікації, для вимикачів першого типу, формула (2.6) набуде вигляду

$$\omega_{В\text{ CM}}^* = \frac{a_{\Sigma} \cdot n}{1 - (n - 2) \cdot a_{\Sigma}} \cdot \left( \frac{\omega_{CPi\text{ HE3}}}{\omega_{Bk\text{ HE3}}} - \frac{1}{n} \right). \quad (2.7)$$

Розглянемо вимикачі другого типу, для яких відносна частота відмов від суміжних вимикачів складе

$$\begin{aligned} \omega_{В\text{ CM}}^* &= a_{\Sigma} \cdot \frac{\omega_{B1\text{ HE3}}}{\omega_{Bk\text{ HE3}}} + a_{\Sigma} \cdot \frac{\omega_{B2\text{ HE3}}}{\omega_{Bk\text{ HE3}}} = \\ &= a_{\Sigma} \cdot \frac{3 \cdot (\omega_{B1\text{ HE3}} + \omega_{B2\text{ HE3}} + \omega_{Bk\text{ HE3}}) / 3 - \omega_{Bk\text{ HE3}}}{\omega_{Bk\text{ HE3}}} = \\ &= a_{\Sigma} \cdot \frac{\omega_{CP\text{ HE3}} \cdot n - \omega_{Bk\text{ HE3}}}{\omega_{Bk\text{ HE3}}} = [1 - (n - 2) \cdot a_{\Sigma}] \cdot \frac{a_{\Sigma} \cdot n}{1 - (n - 2) \cdot a_{\Sigma}} \cdot \left( \frac{\omega_{CPi\text{ HE3}}}{\omega_{Bk\text{ HE3}}} - \frac{1}{n} \right). \end{aligned} \quad (2.8)$$

Для даних вимикачів розрахунок може здійснюватися згідно з виразом (2.6) при  $n = 3$  збільшивши  $a_{\Sigma}$  в  $[1 - (n - 2) \cdot a_{\Sigma}]$  раз.

Рівняння для визначення відносної частоти відмов для вимикачів третього типу можна записати в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \omega_{В\text{ CM}}^* &= \frac{a_{\Sigma}}{1 - (n_i - 2) \cdot a_{\Sigma}} \cdot \frac{\omega_{CPi\text{ HE3}} \cdot n - \omega_{Bk\text{ HE3}}}{\omega_{Bk\text{ HE3}}} + a_{\Sigma} \cdot \frac{\omega_{B2\text{ HE3}}}{\omega_{Bk\text{ HE3}}} = \frac{a_{\Sigma}}{1 - (n_i - 2) \cdot a_{\Sigma}} \times \\ &\times \frac{\omega_{CPi\text{ HE3}} \cdot n + [1 - (n - 2) \cdot a_{\Sigma}] \cdot \omega_{B2\text{ HE3}} - \omega_{Bk\text{ HE3}}}{\omega_{Bk\text{ HE3}}} = \frac{a_{\Sigma} \cdot n}{1 - (n - 2) \cdot a_{\Sigma}} \cdot \left( \frac{\omega_{CPi\text{ HE3}}}{\omega_{Bk\text{ HE3}}} - \frac{1}{n} \right). \end{aligned} \quad (2.9)$$

Наведена формула показує, що для даних вимикачів допустимо використовувати формулу (2.6). При визначенні середнього параметра потоку відмов по вузлу в суму необхідно включити незалежну складову суміжного

вимикача з боку другого виведення розглянутого вимикача з коефіцієнтом  $[1 - (n - 2) \cdot a_{\Sigma}]$ , а число вимикачів  $n$ , комутуючих збірні шини, залишити без зміни.

Відповідно до чинних нормативних рекомендацій, приєднання в схемах РУ зі збірними шинами слід рівномірно розподіляти по секціях / системам шин. Тому для вимикачів четвертого типу число суміжних вимикачів з боку кожного з виводів в переважній більшості випадків або дорівнює один одному, або відрізняється на одиницю. У першому наближенні без суттєвої похибки для розрахунків можна прийняти рівними кількість одиниць вимикачів, комутуючих різні секції / системи шин. При цьому формула (2.6) набуде вигляду

$$\omega_{В\text{СМ}}^* = 2 \cdot \frac{a_{\Sigma} \cdot n}{1 - (n - 2) \cdot a_{\Sigma}} \cdot \left( \frac{\alpha \cdot \omega_{\text{СП1 НЕЗ}}}{\omega_{\text{Вк НЕЗ}}} - \frac{1}{n} \right). \quad (2.10)$$

Відтак, для вимикачів четвертого типу можна також використовувати формулу (2.6), збільшивши  $a_{\Sigma}$  при розрахунках в два рази.

Таким чином, для будь-якого вимикача будь-якої схеми РУ відносна частота відмов від суміжних вимикачів визначається формулою (2.6) з урахуванням відповідних коригуючих коефіцієнтів  $\alpha_{K1}$  і  $\alpha_{K2}$ , що залежать від типу вимикача. Значення коефіцієнтів для різних типів вимикачів зведені в таблицю 2.2. Розрахунок відносної частоти відмов від суміжних вимикачів повинен проводитись за формулою

$$\omega_{В\text{СМ}}^* = \alpha_{K1} \cdot \frac{a_{\Sigma} \cdot n}{1 - (n - 2) \cdot a_{\Sigma}} \cdot \left( \frac{\alpha_{K2} \cdot \omega_{\text{СП1 НЕЗ}}}{\omega_{\text{Вк НЕЗ}}} - \frac{1}{n} \right). \quad (2.11)$$

Таблиця 2.2 - Коректувальні коефіцієнти для вимикачів різних типів

Вимикач	Значення коригувального коефіцієнта $\alpha_{K1}$	Значення коригувального коефіцієнта $\alpha_{K2}$
Першого типу	1	1
Другого типу	$1 - a_{\Sigma}$	1
Третього типу	1	$(n\omega_{\text{СП1 НЕЗ}} + (1 - (n - 2) \cdot a_{\Sigma}) \omega_{\text{СП1 НЕЗ}}) / n\omega_{\text{СП1 НЕЗ}}$
Четвертого типу	2	$(\omega_{\text{СП1 НЕЗ}} + \omega_{\text{СП2 НЕЗ}}) / 2\omega_{\text{СП1 НЕЗ}}$

**Примітка:**  $\omega_{\text{СП1 НЕЗ}}$ ,  $\omega_{\text{СП2 НЕЗ}}$  - середні незалежні частоти відмов вимикачів по вузлу з боку першого і другого введення розглянутого вимикача відповідно;  $n$  - число вимикачів, підключених до вузла з  $\omega_{\text{СП1 НЕЗ}}$ .

У таблиці 2.3 наведено діапазони зміни відносної частоти відмов вимикача в результаті відмов суміжних вимикачів  $a_{\Sigma}$  в залежності від класу напруги схеми РУ. У таблиці враховані сучасні елегазові та вакуумні вимикачі, які на порядок надійніше масляних і повітряних вимикачів.

На основі інформації про відмови вимикачів виділені кордону зміни параметра  $a_{\Sigma}$ : 0,001÷0,025 1 / операцію. Менші значення характерні для елегазових і вакуумних вимикачів, великі - для масляних і повітряних.

Відношення середнього параметра потоку відмов вимикачів по вузлу до незалежної складової параметра потоку відмов розглянутого вимикача залежить від великої кількості факторів. В значній мірі це відношення буде залежати від типів комутуваних вимикачем приєднаних елементів: лінія, трансформатор, збірні шини. Вимикачі, в залежності від комутуваних приєднань, можна розділити на наступні типи:

1. Вимикачі, що комутують в РУ два трансформатора (ТТВ).
2. Вимикачі, що комутують в РУ дві лінії (ЛЛВ).
3. Вимикачі, що комутують в РУ дві секції / системи шин (ШВ).
4. Вимикачі, що комутують в РУ лінію і трансформатор (ТЛВ).
5. Вимикачі, що комутують в РУ лінію і збірні шини (ЛШВ).
6. Вимикачі, що комутують в РУ трансформатор і збірні шини (ТШВ)

Таблиця 2.3 - Діапазони зміни відносної частоти відмов через відмови суміжних вимикачів  $a_{\Sigma}$  в залежності від класу напруги схеми РУ

Уном, кВ	$a_{OP}, 1/\text{операцію}$		$a_{K3}, 1/\text{операцію}$		$a_{\Sigma}, 1/\text{операцію}$	
	хв.	макс	хв.	макс	хв.	макс
35	0,005	0,013	0,005	0,012	0,01	0,025
110	0,004	0,006	0,003	0,013	0,007	0,019
220	0,004	0,011	0,003	0,009	0,007	0,02
330	0,001	0,003	0,002	0,006	0,003	0,009
500	0,006	0,008	0,003	0,02	0,009	0,028
750	0,006	0,008	0,003	0,02	0,009	0,028

Найбільша різниця в незалежних частотах відмов вимикачів для різних топологій побудови схем РУ буде при таких поєднаннях типів вимикачів, комутуючих вузол:

- для спрощених схем - для вузлів при поєднанні вимикачів груп ТТВ і ТЛВ, при максимально можливій довжині лінії, що комутується вимикачем ТЛВ, і найбільш надійних трансформаторах;

- для кільцевих схем - якщо розглянутий вимикач групи ТЛВ, два суміжних - ТЛВ і ЛЛВ, при максимальних довжинах ліній, які не є спільними для цих вимикачів і невеликій довжині лінії, що комутується даним вимикачем;

- для схем зі збірними шинами - при максимальному числі вимикачів, комутуючих збірні шини, при поєднанні: розглянутий вимикач ТШВ, два суміжних ШВ і інші ЛШВ при максимально можливій довжині лінії для розглянутого класу напруги.

Классификация выключателей типовых схем РУ в соответствии с перечисленными выше критериями представлена в приложении А.

Виходячи зі статистики відмов, встановлено такі співвідношення  $\omega_{\text{CPi HEЗ}} / \omega_{\text{K HEЗ}}$  для різних напруг і схем: 35 кВ-3,11; 110кВ- 5,06; 220 кВ - 1,99; 330 кВ - 1,86; 500 кВ - 1,8; 750 кВ - 1,36.

Оцінімо ступінь впливу вимикачів на частоту відмов при зазначених вище граничних умовах. Критерієм необхідності врахування відмов суміжних вимикачів є перевищення допустимої відсоткової інженерної похибки розрахунків. Запишемо нерівність, при якому буде виконуватися дана умова

$$\frac{a_{\Sigma} \cdot n}{1 - (n - 2) \cdot a_{\Sigma}} \cdot \left( \frac{\omega_{\text{CP HEЗ}}}{\omega_{\text{Bk HEЗ}}} - \frac{1}{n} \right) \geq 0,05. \quad (2.12)$$

Помножимо ліву і праву частину рівняння 2.12 на позитивний коефіцієнт  $[1 - (n - 2) \cdot a_{\Sigma}] / a_{\Sigma}$ , що не змінить знак нерівності. В результаті отримаємо

$$n \cdot \frac{\omega_{\text{CP HEЗ}}}{\omega_{\text{Bk HEЗ}}} - 1 \geq \frac{0,05 \cdot [1 - (n - 2) \cdot a_{\Sigma}]}{a_{\Sigma}}. \quad (2.13)$$

Перенесемо одиницю в праву частину нерівності і розділимо ліву і праву частину на позитивний коефіцієнт  $n$ , отримаємо

$$\frac{\omega_{\text{CP HEЗ}}}{\omega_{\text{BK HEЗ}}} \geq \frac{0,05 \cdot [1 - (n - 2) \cdot a_{\Sigma}] + a_{\Sigma}}{n \cdot a_{\Sigma}}. \quad (2.14)$$

Позначимо мінімальне значення відношення середнього параметра потоку відмов вимикачів на вузлу до незалежної складової параметра потоку відмов розглянутого вимикача, при якому похибка становитиме 5%, через  $\alpha$ . Значення цього коефіцієнта дорівнює

$$\alpha = \frac{0,05 \cdot [1 - (n - 2) \cdot a_{\Sigma}] + a_{\Sigma}}{n \cdot a_{\Sigma}}. \quad (2.15)$$

На малюнку 2.1 представлені графіки функцій  $\alpha = f(a_{\Sigma})$  для різних значень  $n$  - числа вимикачів, комутуючих вузол. У всіх точках кривих малюнка 2.1 значення частоти відмов від суміжних вимикачів становить 5% від незалежної складової самого вимикача. Вище графіків відповідних функцій знаходяться зони з частотами відмов більше 5%. Верхня межа зони обрана на рівні максимально можливого співвідношення  $\omega_{\text{CP HEЗ}} / \omega_{\text{BK HEЗ}} = 5$ . Зона з  $\omega_{\text{CP HEЗ}} / \omega_{\text{K HEЗ}} < 1$  характерна для вимикачів, комутують ЛЕП, з  $\omega_{\text{CP HEЗ}} / \omega_{\text{K HEЗ}} > 1$  - для шіноз'єднувальних, секційних і трансформаторних вимикачів.

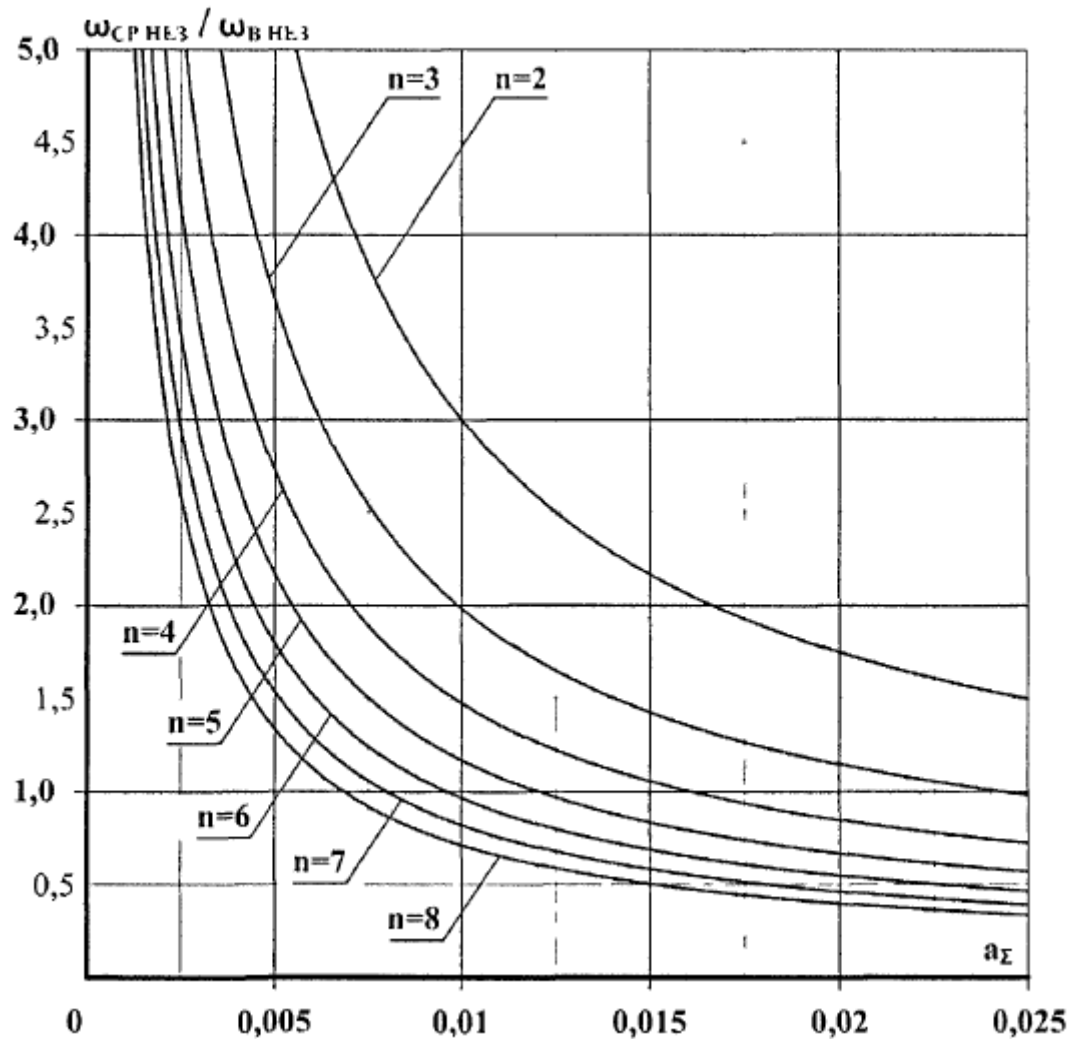


Рис. 2.1 - Графіки функцій  $a=f(a_{\Sigma},n)$  – з п'ятивідсотковою похибкою розрахунків при невиконанні обліку відмов суміжних вимикачів

Виходячи з отриманих результатів і аналізу графіків функцій  $a=f(a_{\Sigma},n)$ , можна зробити наступні висновки:

- для вимикачів, крім секційних і шиноз'єднувальних, з низькими значеннями відносних частот відмов під час оперативних перемикачів і при ліквідації коротких замикань, в межах до  $a_{OP} + a_{ABT} = 0,001$ , можна не враховувати відмови суміжних вимикачів;
- для лінійних вимикачів з числом суміжних до трьох похибка розрахунку через неврахування відмов суміжних вимикачів не перевищить 5% при будь-якому значенні  $a_{\Sigma}$ ;
- для шинних і секційних вимикачів необхідно враховувати відмови суміжних вимикачів незалежно від співвідношення  $\omega_{CP HE3} / \omega_{K HE3}$  при  $n=3$  і  $a_{\Sigma} > 0,012$ ,  $n=4$  і  $a_{\Sigma} > 0,008$ ,  $n=5$  і  $a_{\Sigma} > 0,006$ ,  $n=7$  і  $a_{\Sigma} > 0,004$ ,  $n=8$  і  $a_{\Sigma} > 0,035$ .

Визначимо максимально можливі значення відносної частоти відмов від суміжних вимикачів. Для цього проведені розрахунки по формулі (2.11) при максимальному значенні  $a_{\Sigma} = 0,025$  1 / операцію.

Таблиця 2.4 - Максимально можливі значення відносної частоти відмов вимикача від суміжних вимикачів у відсотках від незалежної складової

$\frac{\omega_{CP \text{ HEЗ}}}{\omega_{BK \text{ HEЗ}}}$	Число суміжних вимикачів						
	2	3	4	5	6	7	8
0,5	0,0%	1,3%	2,6%	4,1%	5,6%	7,1%	8,8%
0,75	1,3%	3,2%	5,3%	7,4%	9,7%	12,1%	14,7%
1	2,5%	5,1%	7,9%	10,8%	13,9%	17,1%	20,6%
1,5	5,0%	9,0%	13,2%	17,6%	22,2%	27,1%	32,4%
2	7,5%	12,8%	18,4%	24,3%	30,6%	37,1%	44,1%
2,5	10,0%	16,7%	23,7%	31,1%	38,9%	47,1%	—
3	12,5%	20,5%	28,9%	37,8%	47,2%	—	—
3,5	15,0%	24,4%	34,2%	44,6%	—	—	—
4	17,5%	28,2%	39,5%	—	—	—	—
4,5	20,0%	32,1%	44,7%	—	—	—	—
5	22,5%	35,9%	—	—	—	—	—

Результати розрахунків наведені в таблиці 2.4 у відсотках від незалежної складової частоти відмов вимикача при різних значеннях числа суміжних вимикачів і співвідношень  $\omega_{CP \text{ HEЗ}} / \omega_{BK \text{ HEЗ}}$ . Варто зазначити, що отримати значення, що перевищують 50% від незалежної складової відмов вимикачів, на практиці не можливо, тому що при числі вимикачів 5 і більше співвідношення  $\omega_{CP \text{ HEЗ}} / \omega_{BK \text{ HEЗ}}$  не перевищує значення 3/1.

## 2.4 Дослідження залежності частоти відмов вимикача від пошкоджуваності субсуміжних вимикачів

У параграфі 2.1 було відзначено, що субсмежние вимикачі надають опосередкований вплив на підвищення пошкоджуваності розглянутого вимикача через підвищення частоти відмов суміжних вимикачів. Ступінь цього впливу на один-два порядки менше ніж від суміжних вимикачів. Тому враховувати її слід тільки при одночасному виконанні таких умов:

- суміжні вимикачі істотно (більш 5%) впливають на частоту відмов розглянутого вимикача;



- частка субсуміжних вимикачів в процентному відношенні до суміжних вимикачів перевищує величину 5%.

Оцінка виконання першої умови проводиться по кривим, наведеним на малюнку 2.1.

Оцінку ступеня впливу частоти відмов вимикачів на надійність даного вимикача, розташованих за суміжними вимикачами, буде здійснювати від частоти відмов, внесених суміжними вимикачами. Для цього розділимо відповідні складові у формулі (2.1) один на одного. В результаті отримаємо

$$w_2 = \frac{\frac{a_\Sigma^2 \sum_{j=1, j \neq M(k,i)}^n \omega_{B(j,i)HEЗ}}{(1-(n-2) \cdot a_\Sigma)(1-(m-2) \cdot a_\Sigma)}}{\frac{a_\Sigma}{1-(n-2) \cdot a_\Sigma} \sum_{p=1, p \neq N(j)}^{n_s} \omega_{B(p,s)HEЗ}} = \frac{a_\Sigma \sum_{j=1, j \neq M(k,i)}^n \omega_{B(j,i)HEЗ}}{(1-(n-2) \cdot a_\Sigma) \sum_{p=1, p \neq N(j)}^{n_s} \omega_{B(p,s)HEЗ}}, \quad (2.16)$$

де  $m$  - число субсуміжних вимикачів,  $n$  - число суміжних вимикачів.

Запишемо суму частот відмов вимикачів як добуток середнього значення частоти відмов вимикачів, комутуючих вузол, до числа вимикачів за винятком суміжного (розглянутого) вимикача. В результаті отримаємо наступне рівняння

$$w_2 = \frac{a_\Sigma}{1-(m-2) \cdot a_\Sigma} \cdot \frac{m-1}{n-1} \cdot \frac{\omega_{CP \text{ СУБСМ}}}{\omega_{CP \text{ СМ}}}, \quad (2.17)$$

де  $m$  - число субсуміжних вимикачів,  $n$  - число суміжних вимикачів,  $\omega_{CP \text{ СУБСМ}}$  - середня частота відмов від субсмежних вимикачів,

$\omega_{CP \text{ СМ}}$  - середня частота відмов суміжних вимикачів.

Розділимо приведене рівняння на три множника

$$w_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3, \quad (2.18)$$

$$\text{де } K_1 = \frac{a_\Sigma}{1-(m-2) \cdot a_\Sigma}, K_2 = \frac{m-1}{n-1}, K_3 = \frac{\omega_{CP \text{ СУБСМ}}}{\omega_{CP \text{ СМ}}}.$$

Для елегазових і вакуумних вимикачів частота відмов практично не залежить від відмов субсмежних вимикачів, для визначення їх параметра потоку відмов може бути використана формула

$$\omega_{Bk} = \omega_{BkHEЗ} + \sum_{i=m1, m2} \left[ \frac{a_\Sigma}{1-(n_i-2) \cdot a_\Sigma} \left( \sum_{j=1}^{n_i} \omega_{BjHEЗ} - \omega_{BkHEЗ} \right) \right]. \quad (2.19)$$

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

В даному розділі було проаналізовано залежність частоти відмов вимикачів від відмов суміжних вимикачів в схемах РУ. Показано, що на надійність високовольтних вимикачів істотно впливає топологія схеми розподільного пристрою і місце вимикача в конкретній схемі РУ.

Проаналізовано вплив відмов субсуміжних вимикачів на надійність вимикача, що розглядається. Показано, що враховувати відмови субсуміжних вимикачів слід тільки при одночасному виконанні таких умов: суміжні вимикачі істотно впливають на частоту відмов розглянутого вимикача; частка субсуміжних вимикачів в процентному відношенні до суміжних вимикачів перевищує величину 5%. В розділі показано, що для високонадійних елегазових вимикачів можна не враховувати відмови субсуміжних вимикачів.

### 3. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

#### 3.1 Загальна дані

В роботі розглядається підстанція ПС-750 кВ «Київська», схема з'єднань ВРП. Вона входить до складу Центрального регіону ОЕС України, здійснює централізоване електропостачання Житомирської, Київської, Чернігівської, Черкаської областей та м. Київ на території площею 110,6 тис. кв. км.

ПС 750 КВ “Київська” живиться по лініях ПЛ-750 кВ Вінниця, ПЛ-750 ЧАЕС, ПЛ-750 РАЕС та ПЛ-750 ХАЕС. Для прийому та розподілу електроенергії на ПС використовуються п'ять розподільчих пристроїв – відкриті (ВРП) 750 кВ, 330 кВ та 35 кВ та закриті (ЗРП) 15,75 кВ та 10 кВ, які включають в себе електричні апарати, шини та допоміжні пристрої.

На ПС «Київська» встановлені два автотрансформатори АТ-1 та АТ-2 типу АОДЦТН-333000/750/330/15.75 кВ. Вони складаються з трьох фаз, понижують напругу з 750 кВ до 330 кВ та 15,75 кВ і передають енергію по лініях 330 кВ "Київського кільця" для електропостачання Києва та Київської області.

ВРП-750 кВ виконаний схемою з двома системами шин та трьома вимикачами на два приєднання (“полуторна” схема). Така схема дозволяє проводити ремонт та ревізію вимикачів, шин та роз'єднувачів без порушення роботи приєднань, що забезпечує високу надійність роботи ПС. Схема має чотири приєднання: ПЛ-750 кВ Київська - ХАЕС, ПЛ-750 кВ Київська - ЧАЕС, ПЛ-750 кВ Київська - Вінниця, ПЛ-750 кВ Київська - РАЕС.

ВРП 330 кВ представлений у вигляді схеми 3/2 (“полуторна” схема) та схемою з двома вимикачами на одне приєднання (приєднання обмотки АТ-1 та лінія ПС 330 кВ Київська - Новокиївська). Загалом схема має чотири приєднання: ПЛ- 330 кВ Київська - Північна2, ПЛ-330 кВ Київська - ЧАЕС, ПЛ-330 кВ Київська -Північна1, ПЛ-330 кВ Київська - Новокиївська.

Вимикачі на ВРП 750 кВ – 13 елегазових вимикачів типу GL318FK3,4.

#### 3.2 Розрахунок моделі надійності вимикача 750 кВ

Для розрахунку надійності вимикача потрібно скласти математичну модель вимикача, яка математично описує всі процеси вимикача під час його експлуатації. Модель надійності вимикача складається з

- середнього параметра потоку відмов  $\omega$
- середнього часу відновлення  $T_v$ ,

- частоти ремонтів  $\mu$ ,
- середньої тривалості ремонтів  $T_p$ .

Частота ремонтів (капітальних, середніх, поточних) і їх середня тривалість регламентована нормативними документами і інструкціями заводів-виробників. Значення цих показників наведені у відповідній довідковій літературі. Середній час відновлення (середній час проведення аварійного ремонту) визначається як математичне сподівання випадкової величини - часу відновлення, виходячи зі статистичних даних відновлення обладнання. На практиці при обчисленні даного показника застосовується статистичний аналог математичного очікування - середнє арифметичне значення.

Найбільш повна модель відмов:

$$\omega_B = \omega_{COB} + \omega_{ABT} = \omega_B + \alpha_{OP} \times N_{OP} + \alpha_{K3} \times \omega_{EL}$$

$\omega_{COB}$  - пошкодження при ліквідації вимикачем КЗ на суміжних елементах складають частоту відмов вимикача при автоматичному відключенні їм пошкоджених елементів зі АВТ.

$\omega_{CT}$  - частота відмов вимикача в статичному стані, для елегазових вимикачів становить 0,002 1 / рік;

$\alpha_{OP}$  - відносна частота відмов під час оперативних перемикачів, 1 / операцію;

$N_{OP}$  - число операцій вироблених вимикачем в рік;

$\alpha_{K3}$  - відносна частота відмов при автоматичному відключенні коротких замикань, 1 / операцію;

$\omega_{EL}$  - сума частот відмов суміжних елементів, при якій відключається вимикач, 0,053 1 / рік.

Розрахуємо потрібні показники по формулам:

$$\alpha_{OP} = K_{OP.0} / K_{OP\Sigma} = 0.001 / 0.3 = 0.003 \text{ (1 / операцію)},$$

$$\alpha_{K3} = K_{ABT.0} / K_{ABT\Sigma} = 0.04 / 0.8 = 0.05 \text{ (1 / операцію)},$$

$$N_{ABT} = (1 - \alpha \times K_{АПВ}) \times \omega_{EL} = (1 - 1 \times 0.1) \times 0.053 = 0.0471 / \text{рік},$$

де  $\alpha$  - показник наявності АПВ;  $K_{АПВ}$  - відносна частота неуспішних дій АПВ.

$$N_{OP} = N_{CX}(\mu_{РЕЖ} + \mu_{РЕМ}) + (N_{CX} - 1) \times (1 - \alpha_{ABT}) \times N_{ABT} = 0.18(0.05 + 0.3) + (0.18 - 1) \times (1 - 0.03) \times 0.047 = 0.025 \text{ 1/рік}$$

Звідси модель відмов досліджуваного вимикача:

$$\omega_B = \omega_{\text{СОБ}} + \omega_{\text{АВТ}} = \omega_B + \alpha_{\text{ОП}} \times N_{\text{ОП}} + \alpha_{\text{КЗ}} \times \omega_{\text{ЕЛ}} = 0.002 + 0.003 \times 0.025 + 0.05 \times 0.053 = 0.0047 \text{ 1/рік.}$$

Значення частоти ремонтів і середньої тривалості ремонтів зняті з довідників.

Розрахуємо середнього часу відновлення вимикача за формулою:

$$T_B = \frac{1}{m} (T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_n) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_{\text{Bi}} = \frac{1}{5} \times 413 = 82.6$$

Всі показники моделі надійності вимикача запишемо в таблицю 3.1

Елемент	$\omega$ , 1/рік	$T_B$ , г/1	$\mu$ , 1/рік	$T_p$ , г/1
Вимикач	0.0047	82.6	0,066	77.3

### 3.3 Розрахунок надійності вимикача на РП 750 кВ

Розрахункова схема зображена на Рис. 3.1, приймемо що по ПЛ 750 кВ ХАЕС, РАЕС та Вінниця передається по 1000 МВт, а  $T_{\text{вст}} = 7000$  год/рік,  $T_{\text{max}} = 6780$  год/рік

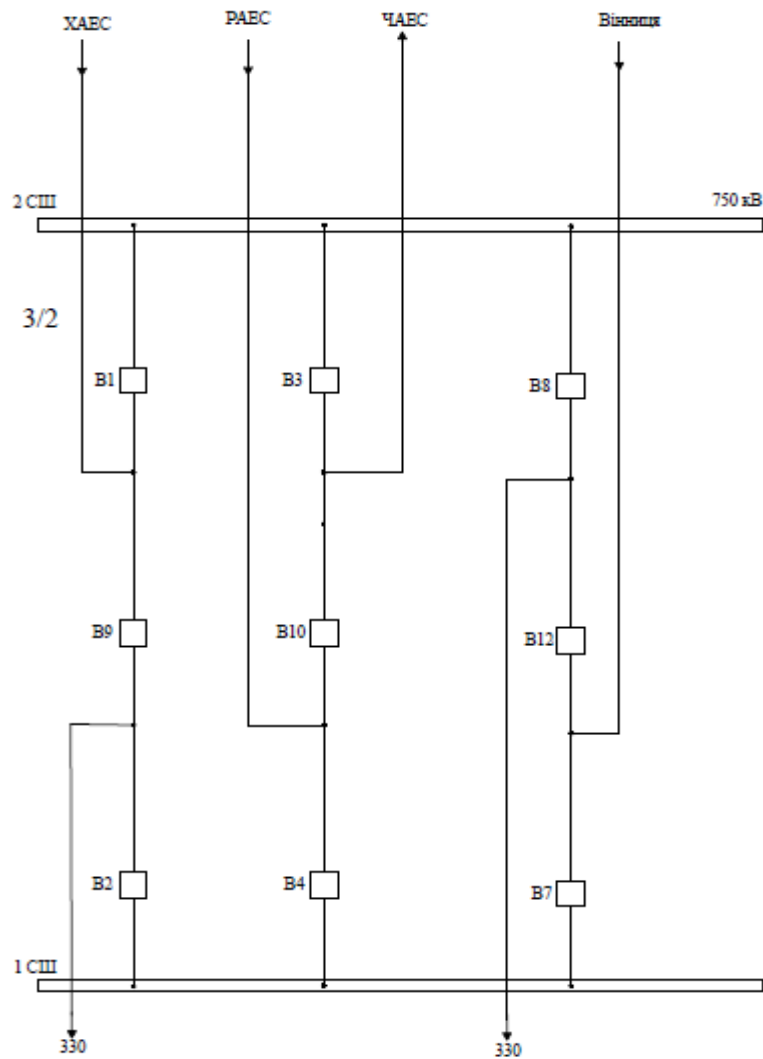


Рис. 3.1 – Розрахункова схема ВРП 750 кВ

Таблиця 3.2– Показники надійності елементів схеми електричних з'єднань РП 750 кВ

Елемент	$\omega$ , 1/рік	$T_B$ , г/1	$\mu$ , 1/рік	$T_p$ , г/1
Вимикач	0.0047	82.6	0,066	77.3
Автотрансформатор	0,072	10	10	10
Лінії 750 кВ	0,25 на 100 км	20	11	10
Збірні шини 750 Кв на одне приєднання	0,01	6	0.167	30

1. Складаємо вертикальний ряд ураховуваних елементів таблиці розрахункових зв'язків (табл. 3.3).

Параметр потоку (частота) відмов:

$$- \text{ліній } \omega_{л1} = \frac{0,25 \times L}{100} = \frac{0,25 \times 100}{100} = 0,25 \left(\frac{1}{\text{рік}}\right) \quad (330)$$

$$\omega_{л2} = \frac{0,25 \times L}{100} = \frac{0,25 \times 100}{100} = 0,25 \left(\frac{1}{\text{рік}}\right) \quad (330)$$

$$\omega_{л3} = \frac{0,25 \times L}{100} = \frac{0,25 \times 250}{100} = 0,625 \left(\frac{1}{\text{рік}}\right) \quad (\text{ЧАЕС})$$

$$- \text{Збірних шин } \omega_{ш} = 0.01 \times 4 = 0.04 \left(\frac{1}{\text{рік}}\right)$$

$$- \text{Вимикачів 750 кВ } \omega_B = 0.03 + 0.0025 \times N_{оп}$$

Визначаємо кількість операцій, здійснених вимикачами за рік (значеннями  $\omega_{ат}$  та  $\omega_{ш}$  через те, що вони малі, нехтуємо), для вимикачів:

B2, B3

$$N_{оп} = 4\mu_{л} + 2\mu_{ш} + 3\omega_{л1}(1 - a_{в.авт}) = 4 \times 11 + 2 \times 0.167 \times 4 + 3 \times 0.25 \times (1 - 0.008) = 46.08 \text{ 1/рік}$$

$$N_{оп} = 4\mu_{л} + 2\mu_{ш} + 3\omega_{л3}(1 - a_{в.авт}) = 4 \times 11 + 2 \times 0.167 \times 4 + 3 \times 0.625 \times (1 - 0.008) = 47.19 \text{ 1/рік}$$

B8

$$N_{оп} = 4\mu_{ат} + 2\mu_{ш} = 4 \times 1 + 2 \times 0.167 \times 4 = 5.3 \text{ 1/рік}$$

B1, B4, B7

$$N_{оп} = 4(\mu_6 + 0.9\omega_6) + 2\mu_{ш} + 3 \times 0.1\omega_6(1 - a_{в.авт}) = 4(10 + 0.9 \times 0.25) + 2 \times 0.167 \times 4 + 3 \times 0.1 \times 0.25(1 - 0.008) = 42.3 \text{ 1/рік}$$

B9, B10

$$N_{оп} = 4(\mu_6 + 0.9\omega_6 + \mu_{л}) + 3(0.1\omega_6 + \omega_{л1}) \times 0.991 = 4(10 + 0.9 \times 0.25 + 10) + 3(0.1 \times 0.25 + 0.625) \times 0.991 = 82.83 \text{ 1/рік}$$

B12

$$N_{оп} = 4(\mu_6 + 0.9\omega_6 + \mu_{ат}) + 3 \times 0.1\omega_6(1 - a_{в.авт}) = 4(10 + 0.9 \times 0.25 + 1) + 3 \times 0.1 \times 0.25 \times 0.992 = 44.97 \text{ 1/рік}$$

Сумарна кількість операцій, здійснених вимикачами в РП 500 кВ за один рік:

$$2 \times 46.08 + 5.3 + 3 \times 42.3 + 2 \times 82.83 + 44.97 = 435$$

Ураховуючи малу різницю в кількості операцій, обираємо для вимикачів B1, B2, B3, B4, B7, B12 однакове значення

$$N_{OP} = N_{OP\text{ СЕР}} = 44$$

Тоді

$$\omega_B = 0. N_{OP} = 0.03 + 0.0025 \times 44 = 0.14 \text{ 1/рік}$$

B9,B10

$$\omega_B = 0. N_{OP} = 0.03 + 0.0025 \times 82,8 = 0.237 \text{ 1/рік}$$

B8

$$\omega_B = 0. N_{OP} = 0.03 + 0.0025 \times 5.3 = 0.043 \text{ 1/рік}$$

2. Складаємо горизонтальний ряд ремонтних режимів вимикачів та за виразом визначаємо їх імовірність. Ураховуючи, що ймовірність ремонтного стану вимикачів залежить від тривалості планових ремонтів, обираємо для всіх вимикачів 750 кВ однакові значення  $q_B$ , розраховані за середнім статистичним значенням  $\omega_B = 0.047$ .

$$q_B = \frac{0.047 + 86.2 + 0.066 + 77.3}{8760} = 0.01$$

3. Розраховуємо імовірність нормального стану схеми

$$q_0 = 1 - \Sigma q_j = 1 - 9 \times 0.01 = 0.91$$

4. Заповнюємо таблицю розрахункових зв'язків (табл. 3.3).

$$T_{ij} = 82.6 - \frac{82.6^2}{2 \times 77.3} = 38.3 \text{ год.}$$

$$T_{ij} = T_{\text{вш}} = 24 \text{ год.}$$

5. Використовуючи дані табл. 3.3, визначаємо сумарну тривалість розрахункових аварійних ситуацій за рік:

$$\text{Якщо } \Delta P = 1000 \text{ МВт } \Sigma \omega_{ij} T_{ij} = 6.182 \text{ год/рік}$$

$$\text{якщо } \Delta P = 2000 \text{ МВт } \Sigma \omega_{ij} T_{ij} = 4 \times 0.38 \times 0.02 \times 1 = 0.0304 \text{ год/рік.}$$



6. Визначаємо середньорічний недовідпуск електроенергії в систему:

Якщо  $\Delta P = 1000 \text{ МВт}$

$$\Delta W = \frac{7000}{8760} \times 1000 \times 10^3 \times 6.182 = 4883 \times 10^3 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік.}$$

Якщо  $\Delta P = 2000 \text{ МВт}$

$$\Delta W = \frac{7000}{8760} \times 2000 \times 10^3 \times 0.0304 = 48 \times 10^3 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік.}$$

Таблиця 3.3 – Розрахункові зв'язки для схеми 3/2

Обладнання в плановому ремонті	Частота відмов $\omega_B$	Норм. $q_0 = 0.91$	Передана потужність, що втрачається ( $P_r$ , МВт) і середня тривалість аварії ( $T_{ij}$ год) в режимах ремонтів для вимикачів, $q_B = 0.01$								
			B1	B2	B3	B4	B7	B8	B9	B10	B12
<b>B1</b>	0,14	1000/1	-	1000/1	1000/1	1000/1	1000/1	2000/5 1000/1	1000/39	1000/1	2000/5 1000/1
<b>B2</b>	0,14	-	1000/1	-	-	-	1000/1	-	-	1000/1	-
<b>B3</b>	0,14	-	-	-	-	1000/1	-	1000/1	1000/1	-	1000/1
<b>B4</b>	0,14	1000/1	1000/1	1000/1	1000/1	-	2000/1, 1000/1	1000/1	1000/1	1000/39	1000/1
<b>B7</b>	0,14	1000/1	1000/1	1000/1	1000/1	1000/1	-	1000/39	1000/39	1000/1	1000/39
<b>B8</b>	0,43	-	-	-	-	-	1000/39	-	-	1000/1	-
<b>B9</b>	0,237	1000/1	1000/39	1000/1	1000/1	1000/1	1000/1	1000/1	1000/1	1000/1	1000/1
<b>B10</b>	0,237	1000/1	1000/1	1000/1	1000/1	1000/39	1000/1	1000/1	1000/1	-	1000/1
<b>B12</b>	0,14	1000/1	1000/1	1000/1	1000/1	1000/1	1000/39	1000/1	1000/1	1000/1	-
<b>Л1(ВРП 330)</b>	0,25	1000/1	1000/1	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Л2(ЧАЕС)</b>	0,625	1000/1	-	-	-	1000/1	-	-	-	-	-
<b>Л3(ВРП 330)</b>	0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Ш1</b>	0,04	-	-	-	-	-	-	1000/24	1000/24	-	1000/24
<b>Ш2</b>	0,04	-	-	-	-	-	1000/24	-	-	1000/24	-

## 7. Розраховуємо збиток від ненадійності РП

Системний збиток за  $Z_{oc} = 0.15 \times 10^{-3}$  тис. у.о./кВт·год становитиме:

$$Z_{oc} = 0.15 \times 10^{-3} \times (4883 + 48) \times 10^{-3} = 739 \text{ тис. у. о./рік.}$$

Під час аварій зі скиданням потужності  $P_{\text{пер.}}$  2000 МВт дефіцит потужності в системі  $2000-1400=600$  МВт. Йому відповідає зниження

$$\Delta f = \frac{50 \times 600}{2 \times 8760} = 1.71 \text{ Гц}$$

Частота в системі знизиться до  $\Delta f = 50 - 1.71 = 48.29$  Гц, що вище від уставки АЧР 48 Гц. Отже, споживачі системи відключатися не будуть і  $Z_{\text{спож}} = 0$ .

Щоб розрахувати збиток від зниження частоти в системі, обчислимо значення питомого збитку  $Z_{0,f} = 0.034$  у.о./кВт·год.

Визначимо, що  $Z_f = 8750 \times 10^3 \times 0.034 \times 10^3 \times 0.0304 \frac{2}{24} = 0.75$  тис. у.о./рік

(можна знехтувати).

Сумарний збиток

$$Z_{\Sigma} = 739 + 0.75 \approx 739 \text{ тис. у.о./рік.}$$

## ВИСНОВИКИ ДО РОЗДІЛУ

В даному розділі було складено математичну модель високовольтного вимикача, яка математично описує всі процеси вимикача під час його експлуатації. Дослідження впливу РУ на надійність вимикача проводиться на ПС 750кВ «Київська». Розрахунок надійності вимикача в схемі РУ 750 кВ проводився таблично-логічним методом. Зроблені розрахунки показали що схема РУ робить істотний вплив на надійність вимикачів. Проведено розрахунок збиток від ненадійності РП.

## **4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ВИМИКАЧА 750 КВ**

### **Вступ**

Вимикачі призначені для оперативної та аварійної комутації в енергосистемах, тобто виконання операцій включення і відключення окремих ланцюгів при ручному або автоматичному управлінні. У включеному стані вимикачі повинні безперешкодно пропускати струми навантаження. Характер режиму роботи цих апаратів дещо незвичайний: нормальним для них вважається як включений стан, коли вони обтікаються струмом навантаження, так і відключене, при якому вони забезпечують необхідну електричну ізоляцію між роз'єднаними ділянками ланцюга. Комутація ланцюга, здійснювана при перемиканні вимикача з одного положення в інше, проводиться нерегулярно, час від часу, а виконання ним специфічних вимог щодо відключення виникає в ланцюзі короткого замикання надзвичайно рідко. Вимикачі повинні надійно виконувати свої функції протягом терміну служби (25 років), перебуваючи в будь-якому із зазначених станів, і одночасно бути завжди готовими до миттєвого ефективного виконанню будь-яких комутаційних операцій, часто після тривалого перебування в нерухомому стані. Звідси випливає, що вони повинні мати дуже високий коефіцієнт готовності: при малій тривалості процесів комутації (кілька хвилин на рік) повинна бути забезпечена постійна готовність до здійснення комутацій.

Тому не дивно що в електроустановках одним із найнебезпечніших механізмів є високовольтні вимикачі, оскільки вони сприймають найбільше навантаження при розмиканні контактів, де виникає горіння дуги, в результаті чого різко піднімається температура до високих значень.

Мета розділу – розроблення засобів та заходів, щодо запобігання та зменшення впливу на працівників небезпечних та шкідливих виробничих чинників (НШВЧ), що виникають у ході експлуатації високовольтного вимикача.

Предмет досліджень – забезпечення зменшення шкідливого впливу і небезпечних виробничих чинників, які виникають у ході експлуатації високовольтних вимикачів.

Завдання досліджень, що передбачають в кінцевому варіанті:

- розробка певних технічних та організаційних заходів та засобів з охорони праці та безпеки життєдіяльності, які базуються на новітніх досягненнях у галузі охорони праці, промислової безпеки.
- аналіз умов праці під час експлуатації електроустановок, що розміщуються на електричних станціях

Усі розроблені заходи будуть основані на чинних нормативних документах, інструкціях з експлуатації вимикачів, інструкціях охорони праці електричних станцій та електричних підприємств.

#### **4.1 Загальна характеристика об'єкта, технічні характеристики серійного енергетичного устаткування та систем енергопостачання**

Таблиця 4.1. Загальна характеристика об'єкту

Найменування ЕУ	Вид розміщення	Розміщення робочого місця	Категорія електроприміщення	Категорія з пожежної безпеки
1	2	3	4	5
ВРП 750 кВ ПС 750 кВ «Київська»	Відкрита ЕУ, за межами населеного пункту	Зовнішнє (на відкритій місцевості)	особливо небезпечне	Категорія Д

Таблиця 4.2. Показники технічних характеристик ЕУ

Найменування ЕУ і марка	Основні характеристики	Числове значення показника
Високовольтний вимикач GL318FK3,4	Напруга	800 кВ
	Номінальний струм	5,5 кА
	Відключаюча здатність	63 кА
	Габаритні розміри	1100x8783x5299 см
	Електродинамічна стійкість	170 кА
	Час включення / відключення	2 цикли

## 4.2 Визначення обсягів і послідовності робіт у ході експлуатації

Таблиця 4.3. Послідовність виконання робіт

Вид робіт	Спосіб доставки і розгрузки	Період виконання робіт і тривалість	Кількісний склад бригади	Група з електробезпеки
1	2	3	4	5
Огляд вимикача В-750 АТ-1	-	Періодично впродовж року, один раз на добу	1 особа	IV

Комутаційні операції (включення і відключення) вимикачем елегазового типу слід робити тільки при наявності мінімально допустимого тиску елегазу SF6. В іншому випадку може відбутися пошкодження вимикача. Для запобігання негативних наслідків передбачена сигналізація зниження тиску елегазу у вимикачі, а також блокування ланцюгів керування вимикачем при зниженні тиску елегазу до неприпустимого рівня, при якому не забезпечується ізоляція і гасіння дуги при комутації струмів.

Елегазовий вимикач розрахований на певну кількість комутацій в залежності від величини струму відключення, після чого має бути здійснене технічне обслуговування. Для обліку кількості комутацій на обслуговуваних підстанціях ведеться журнал обліку кількості операцій з вимикачем. У даний журнал фіксуються як автоматичні відключення, так і планові.

## 4.3 Визначення та оцінка шкідливих і небезпечних виробничих чинників

В електроустановках напругою вище 1000В дотик до струмовідних частин небезпечний в будь якому випадку незалежно від схеми живлення. Тому тут приймаються всі заходи для того, щоб зробити струмовідні частини недоступними для випадкового дотику до них людини. Їх розташовують на

недоступних відстанях, надійно огорожують, суворо регламентують правила доступу до установки то що [28].

Огляд вимикача виконується 1 оперативним працівником, який перебуває на чергуванні в змінні. Робота проводиться на відкритому повітрі, тому на нього впливають за [29] такі небезпечні та шкідливі виробничі чинники:

Таблиця 4.4. Чинники умов праці та їх показники

Найменування чинника	Основні характеристики	Числове значення показника
1	2	3
Параметри мікроклімату	Температура повітря Вологість Швидкість вітру	(-15...28) °C (55...75) % (1,5...5) м/с
Важкість праці	Робоче положення	«стоячи», «стоячи зігнувшись»
Рівень освітлення	Коефіцієнт природного освітлення, %	87%
Шум	Шумовий рівень	74 дБА
Дія електромагнітного поля	Напруженість електричного поля	25кВ/м
	Напруженість магнітного поля	12кА/м
Напруженість праці	Тривалість <i>зосередженого спостереження</i>	60 % робочого часу
	Тривалість <i>активних дій</i>	50 % робочого часу
	Змінність	1 зміна , 12 годин
	Напруженість органів чуття: зір	30 % робочого часу

#### 4.4 Визначення та оцінка шкідливих і небезпечних виробничих чинників

Таблиця 4.5. Перелік небезпечних і шкідливих виробничих чинників

Небезпечні і шкідливі чинники	Фактичне значення	Допустиме значення
1	2	3
Електричного походження		
Напруга	800 кВ	750 В
Струм	4000 А	0,6 мА
Напруженість електричного поля	25 кВ/м	5 кВ/м
Напруженість магнітного поля	12кА/м	1,4 кА/м
Неелектричного походження		
Оцінка умов праці	Шкідливі І категорії	

#### 4.5 Вибір технічних та організаційних заходів з безпеки праці

Згідно із [28], в якості захисту від ураження людей електричним струмом застосовується заземлення. Крім того безпека експлуатації при нормальному



режимі роботи забезпечується застосуванням ізолювальних пристроїв, огороженням струмовідних частин, використанням малих напруг. Особи, що обслуговують електроустановки повинні користуватися ЗІЗ - спецвзуття, рукавиці. Засоби захисту необхідно періодично випробувати, їх слід захищати від механічних пошкоджень, впливу факторів, що погіршують їх діелектричні властивості.

Загальні вимога безпеки до виробничого обладнання встановлені згідно з [29], в якому визначені вимоги до основних елементів конструкції, органів управління і засобів захисту, які входять в конструкцію виробничого обладнання любого виду і призначення. Перед допуском до роботи на комутаційних апаратах з дистанційним керуванням слід виконати такі організаційні та технічні заходи:

Таблиця 4.6. Технічні і організаційні заходи

Вид заходу	Найменування заходу	Опис, показники і характеристики
1	2	3
Організаційні заходи з електробезпеки		
Категорія робіт щодо заходів безпеки	Поблизу струмовідних частин ЕУ.	Щоденний огляд вимикача раз в зміну.
Вид дозвільного документу	Графік оглядів	Поточна експлуатація
Технічні заходи з електробезпеки		
Огороджувальний засіб	Огорожа ВРУ	Сітчаста, висота 2 м, механічне блокування входу
Розміщення знаку електробезпеки	Знак електробезпеки	Наноситься на металеву поверхню рами вимикача
Захисне заземлення	Захисне заземлення конструкцій обладнання, що не перебувають під напругою.	Заземлення рами вимикача та шафи привода.

Підніматися на елегазовий вимикач, що перебуває під робочим тиском, дозволяється тільки в разі проведення випробувальних і налагоджувальних робіт (регулювання демпферів, зняття віброграм, під'єднання або від'єднання

провідників від вимірювальних приладів, визначення місць витоку повітря тощо).

#### 4.6 Вибір засобів індивідуального захисту для обмеження впливу небезпечних і шкідливих виробничих чинників

На ВРУ 750кВ у разі виконання робіт в зоні впливу електричного поля напруженістю понад 5кВ/м необхідно обмежувати тривалість перебування людей згідно з вимогами [29] або застосовувати засоби захисту від впливу електричного поля. В залежності від частоти та напруженості ЕМП, характеру роботи застосовують захист, який при всіх випадках повинен забезпечувати рівні опромінювання на робочому місці, що не перевищують допустимі значення. Таким захистом є: екранування робочого місця та засобів індивідуального захисту; віддалення його від джерела ЕМП; обмеження часу роботи в умовах ЕМП.

Таблиця 4.7. Перелік засобів індивідуального захисту

Вид ЗІЗ	Призначення	Марка або маркування. Модель. Матеріал.	Гарантований термін використання	Технічні характеристики
1	2	3	4	5
Захисний одяг	Захист від знижених температур	ТВН «Cerva». Костюм.	3 роки використання	За температури повітря до мінус 20 °С
Захисне взуття	Захист від механічних ушкоджень	AB4060/1 S3. Черевики.	12 місяців	Черевики робочі, захисні
Захист рук	Захист від механічних ушкоджень та впливу електричної дуги.	Двошарові діелектричні рукавички AFG 41 1.	5 робочих змін	Під час виконання роботи
Захист голови	Захист від електричного струму	Універсал M215	2 роки	Під час переміщення по підстанції

Таблиця 4.8. Перелік електрозахисних засобів

Вид ЕЗЗ	Найменування	Технічні характеристики	Призначення і норми випробувань
---------	--------------	-------------------------	---------------------------------

1	2	3	4
Індивідуальний екранувальний комплект	КЕ-ВРН	Обслуговування ЕУ (огляд,ремонт).	На напругу 330-750 кВ. Періодичні випробування - що 6 місяців
Штанга вимірювальна універсальна	ШИУ-500	Перевірка ізоляції, накладання заземлень, проведення вимірів	330-750 кВ Раз у 3 місяці
Захисні пристосування	Захисне переносне заземлення, ізолюючі підставки	Служать для ізоляції працівника від землі.	330-750 кВ Раз у 18 місяців

Персонал обслуговуючий вимикачі, повинен знати їх будову та принцип роботи, повинен бути ознайомлений з цією інструкцією і строго дотримуватися цим вимогам.

#### 4.7 Вибір заходів із запобігання та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій

Таблиця 4.9. Перелік заходів і засобів з пожежної безпеки

Група заходів	Технічні характеристики	Критерії вибору
1	2	3
Технічні		
Вуглекислотний вогнегасник ВВК-3,5:	Переносний, тривалість дії – 15 с, довжина струмені – 1,5м	У приміщенні, розміщено в коридорах через 70 м.
Вуглекислотний вогнегасник ВВК-56:	Пересувний, тривалість дії – 100 с, довжина струмені – 5м	На вулиці під накриттям
Організаційні		
План дій з попередження пожеж	Визначає дії персоналу підприємства при виникненні пожежі, порядок взаємодії з пожежними підрозділами, напрямки введення сил і засобів на гасіння пожежі з урахуванням заходів безпеки і раціонального розміщення пожежної техніки.	Відділ з охорони праці
ЗІЗ		
Захисний одяг водонепроникний	ВК «КОМБІ», комбінезон	Багаторазового використання. Термін зберігання – 6 років.
Протигаз	М98 «Scott» з фільтром ХС від монооксиду вуглецю.	Температура зберігання – від 30 °С до 170 °С. Термін зберігання – 15 років

## 4.8 Розрахунок технічного заходу з безпеки експлуатації

Розглянемо можливі випадки попадання людини під напругу і оцінимо їх небезпеку відповідно до [30]. До таких випадків можна віднести: однофазний прямий дотик (рис. 4.8а); дотик до корпусу заземленого електроустаткування (рис. 4.8б); струм який протікатиме через людину, що потрапила під крокову напругу (рис. 4.8в);

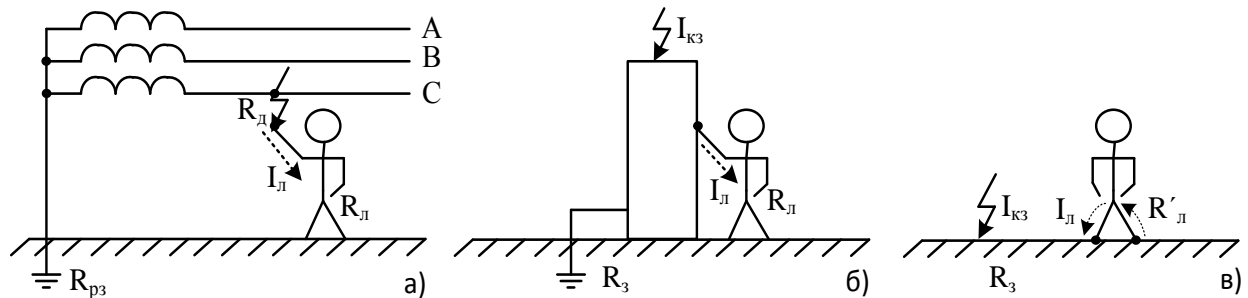


Рис. 4.8. Випадки попадання людини під напругу:

- а) однофазний прямий дотик; б) - дотик до корпусу заземленого електроустаткування;  
в) струм який протікатиме через людину, що потрапила під крокову напругу.

Таким чином вхідними даними для розрахунків будуть:

- фазне значення напруги:  $U_{\phi} = U_{л}/\sqrt{3} = 750/\sqrt{3} = 400.02 \text{ кВ}$ ;
- електричний опір людини приблизно рівний:  $R_{л} = 1000 \text{ Ом}$ ;
- опір людини при попаданні під крокову напругу (враховується опір взуття), прийmemo:  $R'_{л} = 1500 \text{ Ом}$ ;
- опір електричної дуги:  $R_{д} = 3000 \text{ Ом}$ ;
- опір робочого заземлення становить:  $R_{пз} = 0.5 \text{ Ом}$ ;
- опір заземлюючого пристрою згідно [31] становить:  $R_{зп} = 0.5 \text{ Ом}$ ;
- струм однофазного короткого замикання на землю на ВРП 750 кВ прийmemo:  $I_{кз} = 10000 \text{ А}$ ;
- коефіцієнт напруги дотику, що враховує місце положення людини і характер потенціальної кривої згідно [32]:  $\alpha_1 = 0.15$ ;
- коефіцієнт напруги кроку, що враховує характер потенціальної кривої і залежить від виду заземлення [32]:  $\beta_1 = 0.15$ ;

Розрахуємо струм однофазного прямого дотику:

$$I_{\text{л}} = \frac{U_{\text{ф}}}{R_{\text{л}} + R_{\text{д}} + R_{\text{рз}}} = \frac{400.02 \cdot 10^3}{1000 + 3000 + 0.5} = 100 \text{ A}$$

Розрахуємо струм дотику до корпусу заземленої електроустановки:

$$I_{\text{л}} = \frac{I_{\text{кз}} \cdot R_{\text{зп}} \cdot \alpha_1}{R_{\text{л}}} = \frac{10000 \cdot 0.5 \cdot 0.15}{1000} = 0.75 \text{ A}$$

Розрахуємо струм який протікатиме через людину, що потрапила під крокову напругу:

$$I_{\text{л}} = \frac{I_{\text{кз}} \cdot R_{\text{зп}} \cdot \beta_1}{R'_{\text{л}}} = \frac{10000 \cdot 0.5 \cdot 0.15}{3000} = 0.5 \text{ A}$$

Результати розрахунку та порівняння з максимально допустимими значенням струму зведено в таблицю 5.10.

Таблиця 4.10. – Значення струмів протікання через людину на ВРП 750 кВ

Вид дотику	Значення розрахункового струму, А	Нормовані значення струму згідно [4] при 0.5 с дії на людину, А
Однофазний прямий дотик (рис.4.8а)	100	0,125
Дотик до заземленої електроуст. (рис.4.8б)	0.75	
Попадання під крокову напругу (рис.4.8в)	0.5	

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

В даному розділі було проведено аналіз умов праці під час експлуатації високовольтного вимикача, що розташований на підстанції 750кВ “Київська” на ВРП 750кВ.

Отже основним шкідливим чинником на персонал під час роботи на підстанції є напруженість електричного та магнітного полів, так як персонал обслуговує високовольтне обладнання. Тому згідно державних стандартів робота на ВРП проводиться в захисному екранувальному комплекті та обмежується тривалість перебування працівників (не більше 10 хв) в умовах ЕМП. В даному розділі було розглянуто експлуатацію елегазового вимикача на підстанції та розроблено технічні та організаційні заходи та засоби з охорони праці та безпеки життєдіяльності при обслуговуванні високовольтних вимикачів, які наведені в табл. 5.6. Також було визначено, що роботи з обслуговування високовольтного вимикача виконує оперативний персонал в кількості 12 осіб, по 3 чоловіки в зміні відповідно з IV групою з електробезпеки.

В розділі також розглянено можливі випадки попадання людини під напругу на ВРП і розраховано струми, які протікатимуть через людину під час дотику.

## 5. РОЗРОБКА STARTUP-ПРОЕКТУ

### ВСТУП

Масляний вимикач типу У-110-2000-50У1 являє собою високо аварійний електричний апарат, який потребує постійного догляду під час роботи та частого ремонту. Беручи до уваги те, що масляний вимикач типу У-110-2000-50У1 застарілий, витрати на попереджувальні та аварійні ремонти даного пристрою обійдеться для електричної станції дуже дорого. Елегазовий вимикач типу HPL170B1 є сучасним високонадійним електричним апаратом, завдяки чому він не вимагає постійного догляду за технічним станом (потребує тільки візуального огляду) та є гарною альтернативою масляному вимикачу типу У-110-2000-50У1, та це дасть змогу значно підвищити надійність роботи електричної станції та енергосистеми.

#### 5.1 Ідея проекту

В даному підрозділі були проаналізовані та подані у вигляді таблиці:

- Зміст ідеї (що пропонується);
- Можливі напрямки застосування;
- Основні вигоди, що може отримати користувач послуги;
- Відмінності від існуючих аналогів, замінників.

Перші три пункти були подані в таблиці (табл. 5.1), вони дають уявлення про зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Ідея полягає в заміні масляного вимикача У-110 на елегазовий типу HPL170B1	Підстанції ОСП, ОСР, МСР	Зменшення витрат на ремонт та експлуатацію вимикачів.
	Абонентські підстанції	Збільшення надійності.
	Електростанції	

Вимикач HPL170B1 в порівнянні з вимикачем У-110-2000-50У1, забезпечує:

- Більшу надійність та якість роботи;
- Довгий термін гарантійного обслуговування;

- Менша періодичність ремонту;
- Безпечність використання.

## 5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Для реалізації даної ідеї – реконструкції масляного вимикача У-110-2000-50У1 на вимикач HPL170B1, проведено розробку проекту реконструкції комірки 110 кВ разом з вимикачем.

Вимикач типу HPL170B1 відноситься до електричних комутаційних апаратів високої напруги, в яких в якості дугогасного та ізоляційного середовища використовується елегаз (шестифториста сірка SF<sub>6</sub>). Чистий елегаз з щільністю, що відповідає тиску 0,5 МПа при температурі 20 °С, починає скраплюватися при температурі близько мінус 40 °С. Щоб забезпечити працездатність вимикача при низьких температурах повітря до мінус 55 °С, використовують суміш елегазу і чотирьохфтористого вуглецю CF<sub>4</sub>.

Для контролю щільності газової суміші на вимикачі встановлюється монітор щільності, який видає сигнал при зниженні щільності через витоки. Монітор щільності має індикатор тиску газу, приведенного до температури 20 °С, яке характеризує щільність газу у вимикачі.

Вимикач типу У-110-2000-50У1 призначений для комутації електричних ланцюгів при нормальних та аварійних режимах. Встановлюється у відкритих розподільчих пристроях станцій та підстанцій енергетичних систем на номінальну напругу 110 кВ змінного струму частотою 50 Гц.

Вимикач складається з трьох полюсів, з'єднаних в єдиний агрегат за допомогою шпильок, труб і розташованих в них сполучних тяг.

Полюс-бак циліндричної або овальної форми, який встановлений на фундамент або на раму. На кришці бака змонтовані прохідні високовольтні вводи, кутові коробки, механізми газовідводу. Бак всередині ізолюваний електрокартоном або електротехнічною фанерою, у верхній частині бака встановлені трансформатори струму, до нижньої частини вводів кріпляться дугогасильні камери які електрично з'єднуються між собою траверсою з ізолюваною тягою. До днища бака прикріплено пристрій підігріву масла. В днище бака, на рівні нижньої точки, уварена труба для зливу конденсату.

Дугогасильний пристрій вимикачів 110 кВ і вище являє собою дугогасильну камеру багаторазового розриву з шунтом, яка працює за принципом масляного дугтя від багатьох генеруючих проміжків. Застосування опору (шунта) забезпечує:

- рівномірний розподіл напруги між камерами;



- зменшення темпу відновлення напруги і зменшення піку напруги, що з'являється на контактах вимикача після відключення;
- зниження перенапруг при відключеннях.

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту наведено в табл. 5.2

Таблиця 5.2 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Заміна вимикача	Розробка проекту реконструкції	наявна	доступна
2	Заміна вимикача	Вибір необхідного обладнання	наявна	доступна
3	Заміна вимикача	Монтаж вимикача	наявна	доступна

### 5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Для того щоб спланувати напрями розвитку проекту та потреби потенційних клієнтів, потрібно визначити ринкові можливості, які використовуються під час ринкового впровадження об'єкту.

Аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку; зображено в табл. 5.3

Таблиця 5.3 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку(найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	>10
2	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
3	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Мінімальний рівень первинних інвестицій, регулювання державою інвестицій
4	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Стандарти з випереджаючими вимогами
5	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку),%	73%

Для того, щоб розрахувати внутрішню норму прибутку, тобто рентабельність інвестицій, була використана формула (5.1)

$$R_i = \frac{\Pi_p}{K}, \quad (5.1)$$

Де,  $R_i$  – норма прибутку;

$\Pi_p$  – прибуток за період  $n$ ;

$K$  – величина початкових інвестицій.

В даному випадку інвестором виступає енергопідприємство, на якому відбувається реконструкція.

Розмір інвестицій складає 10 млн. грн., з яких:

- 8 млн грн., вартість нового обладнання;
- 100 тис. грн., вартість обладнання для планового обслуговування;
- 1,9 млн. грн., вартість монтажу.

За наявними фактичними даними, кожне виведення в аварійний ремонт масляного вимикача У-110-2000-50У1 обходиться підприємству в 5 % від вартості основних фондів, тобто 0,5 млн. грн. В загальному випадку, сума, яку може зекономити підприємство на ремонті та вимикача У-110-2000-50У1, за термін експлуатації нового вимикача НРЛ170В1, складає 5,0 млн. грн. або 0,5 млн грн /рік.

Експлуатаційні витрати ( $B_e$ ) прийняті за статистикою 1 % на рік від вартості основних фондів ( $B_e = 1\% / 100\% \times 10 \text{ млн грн.} = 0,1 \text{ млн грн/рік}$ ).

Розрахуємо рентабельність інвестицій:

$$R_i = (0,5 - 0,1) / 2 = 0,2 \text{ (1/рік)}$$

У відсотках це значення складає 20%

Доцільно буде провести розрахунки для періоду окупності проекту:

$$T_{ок} = \frac{1}{R_i} = \frac{K}{\Pi_p} = 2 / 0,4 = 5 \text{ років} \quad (5.2)$$

З розрахунку випливає, що період окупності інвестицій  $T_0$  складає 5 років.

На основі аналізу факторів загроз та ринкових можливостей маркетингового середовища був складений SWOT– аналіз. Матриця аналізу сильних (Strenght) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities).

Таблиця 5.4 SWOT – аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Значне підвищення надійності та безаварійної роботи.	Слабкі сторони: час відведений на заміну, підготовка персоналу.
Можливості: Реконструкція всіх застарілих вимикачів.	Загрози: Державний регулятор (НКРЕКП) може не включити заміну вимикача в інвестиційну програму конкретного енергопідприємства

## 5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розробка ринкової стратегії першим передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Реконструкція масляних вимикачів У-110-2000-50У1 на елегазовий вимикач є фінансово затратним, але необхідним кроком для забезпечення надійності роботи електричних станцій, підстанцій та енергосистеми в цілому.

Далі будуть наведені деякі переваги елегазового вимикача: зручність в експлуатації і технічного обслуговування; невеликі габаритні розміри; великий комутаційний ресурс; малий власний час відключення і включення; тривалий термін служби.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

Узагальнивши проведений аналіз потрібно зазначити:

1. З огляду на нагальну потребу в заміні зношеного та морально застарілого обладнання, ринкова комерціалізація стартап-проекту є актуальною.
2. Є перспективи його впровадження з огляду на потенційні групи клієнтів, бар'єри входження, стан конкуренції та конкурентоспроможність проекту.
3. Для ринкової реалізації проекту слід обрати технологію, яка передбачає заміну вимикачів під час ремонтних робіт чи реконструкції підстанцій чи РП електростанцій.
4. Подальша імплементація проекту є доцільною.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В даній роботі розглянуто ряд питань, пов'язаних з надійністю високовольтних вимикачів на основі розрахунку моделі відмов вимикача та врахуванням схеми розподільного пристрою, в якій встановлений вимикач. Основні результати дисертаційної роботи полягають в наступних 8 положеннях:

1. Досліджено причини пошкоджуваності високовольтних вимикачів. Показано, що велика кількість відмов вимикачів виникає в перші роки експлуатації (період припрацювання) та в кінці терміну експлуатації (період старіння або зношеності) згідно з паспортним ресурсом.

2. Розглянуто та систематизовано моделі відмов вимикачів. Вказані їх переваги та недоліки. Виділено найбільш важливі фактори, які необхідно враховувати в моделях при оцінці надійності вимикачів.

3. На основі аналізу статистичних даних про відмови вимикачів обґрунтовано застосування моделі з урахуванням причин їх виникнення.

4. Показано, що застосування найбільш точних повних моделей неможливо через відсутність необхідної статистичної інформації, а використання спрощених моделей веде до неточності при розрахунках надійності схем.

5. Проаналізовано вплив відмов субсуміжних вимикачів на надійність вимикача, що розглядається. Показано, що враховувати відмови субсуміжних вимикачів слід тільки при одночасному виконанні таких умов: суміжні вимикачі істотно впливають на частоту відмов розглянутого вимикача; частка субсуміжних вимикачів в процентному відношенні до суміжних вимикачів перевищує величину 5%. Показано, що для високонадійних елегазових вимикачів можна не враховувати відмови субсуміжних вимикачів.

6. Отримано аналіз залежності частоти відмов вимикачів від відмов суміжних і субсуміжних вимикачів в схемах РУ, що дозволяє прийняти рішення в практичних завданнях оцінки надійності вимикачів про доцільність обліку відмов суміжних вимикачів. Наведено практичні рекомендації щодо обліку відмов суміжних і субсуміжних вимикачів.

7. Запропоновано нову класифікацію вимикачів за типами і групами в залежності від схеми РУ, місця в схемі РУ і виду комутованих приєднань, що дозволило виробити узагальнені рішення для окремих виділених груп в задачах обліку відмов суміжних вимикачів.

8. Складено та розраховано модель надійності високовольтного вимикача. Також розраховано таблично-логічним методом вплив місця розташування вимикача у РУ на його надійність. Проведені розрахунки показали, що схема РУ робить істотний вплив на надійність вимикачів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гук Ю. Б. Основы надежности электрических установок / Ю. Б. Гук. – Л. : ЛГУ, 1976. – 192 с.
2. Проблемы надежности электроэнергетических систем / И. А. Александров, В. А. Веников, В. В. Могирев и др. // Энергетика и транспорт. – 1976. – № 1. – С. 38–45.
3. Тарасевич П. Й. Перспективи розвитку засобів виявлення високовольних вимикачів напругою 110–750 кВ, що відмовили / П. Й. Тарасевич // Електроенергетичні та електромеханічні системи. – Л. : Вид-во Нац. університету «Львівська політехніка», – 2009. – С. 91–96.
4. Андреев Д. А. Анализ методов расчета коммутационного ресурса высоковольтных выключателей / Д. А. Андреев, И. А. Назарычев // Вестник ИГЭУ. – 2008. – № 2. – С. 69–84.
5. Досвід та перспективи експлуатації елегазових вимикачів у Південно-Західній енергетичній системі / Р. І. Михайлюк, С. В. Мисенко, В. М. Кутін, О. Є. Рубаненко // Енергетика та електрифікація. – 2014. – № 3. – С. 34–37
6. Кутін В. М. Досвід впровадження та забезпечення надійності елегазових вимикачів в умовах експлуатації / В. М. Кутін, О. Є. Рубаненко, С. В. Мисенко // Наукові праці ВНТУ. – 2013. – № 1. – С. 1–7.
7. Надежность систем энергетики и их оборудования / Под общей редакцией Ю.Н. Руденко: В 4-х т. Т. 1: Справочник по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики / Под ред. Ю.Н. Руденко. - М.: Энергоатомиздат, 1994-480 с.
8. Правила организации технического обслуживания и ремонта оборудования, зданий и сооружений электростанций и сетей. - Введ. 01-01-2004-М., 2003.
9. Назарычев А.Н. Методы и модели оптимизации ремонтов электрооборудования объектов энергетики с учетом технического состояния / Под. ред. В.А. Савельева; Иван. гос. ун-т. - Иваново, 2002. - 168 с.
10. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций: справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: учеб. пособие для вузов. - 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1989. -608 с.
11. Гук Ю.Б. Основы надежности электроэнергетических установок. - Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1976. -192 с.
12. Справочник по проектированию электроэнергетических систем/В.В. Ершевич, А.Н. Зейлингер, Г.А. Илларионов и др.; Под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 352 с.

13. Розанов М.Н. Надежность электроэнергетических систем. - М.: «Энергия», 1974-176 с
14. Синьчугов Ф.И. Выбор главных схем электрических соединений блочных электростанций // Электрические станции, 1967, № 5. с. 9-19.
15. Двоскин Л.И, Схемы и конструкции распределительных устройств. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 240 с.
16. Околович М.Н. Проектирование электрической части станций: Учебник для вузов. - М.: Энергоиздат, 1982. - 400 с
17. Розанов М.Н. Надежность электроэнергетических систем. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 200 с.
18. Синьчугов Ф.И. Расчет надежности схем электрических соединений. - М.: «Энергия», 1971. - 176 с.
19. Непомнящий В.А. Учет надежности при проектировании энергосистем. - М.: Энергия, 1978-200 с.
20. Абдурахманов А.М. Разработка моделей надежности коммутационного оборудования и рекомендаций по их применению в задачах электроэнергетики / А.М. Абдурахманов: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. - М.: МЭИ (ТУ), 2008. - 20 с.
21. Андреев Д.А. Оценка надежности электроустановок на основе диагностики состояния структурных элементов/ Д.А. Андреев., А.Н. Назарычев, В.А. Савельев, А.И. Таджикибаев // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: сб. науч. тр.-Вып. 58- С. 103-124.
22. Шунтов А.В. Методические основы формирования схем выдачи мощности электростанций / А.В. Шунтов: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. - М.: МЭИ (ТУ), 2001. - 310 с.
23. Крупенев Д.С. Методика декомпозиции и синтеза системной надежности электроэнергетических систем / Д.С. Крупенев: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2011-20 с.
24. Сулыненков И.Н., Назарычев А.Н. Совершенствование модели отказов выключателей// Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып.60. Методы и средства исследования и обеспечения надежности систем энергетики / Отв. ред. Н.И. Воропай, А.И. Таджикибаев (ПЭИПК) 2010: изд. Ученого совета ПЭИПК. - СПб.: «Северная звезда», 2010. - с. 296-306.

25. Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35-750 кВ. Типовые решения : утв. приказом ОАО «ФСК ЕЭС» от 20 декабря 2007 г. N 441- Введ. 20-12-2007. - М., 2007. — 132 с.
26. Надійність електроенергетичних систем і електричних мереж / А. В. Журахівський, С. В. Казанський, Ю. П. Матеєнко, О. Р. Пастух ; – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 457 с.
27. Ткачук К.Н., Зацарний В.В., Третьякова Л.Д., Мітюк Л.О. Охорона праці і промислова безпека: навчальний посібник. Київ: Лібра, 20010. 425 с.
28. Правила улаштування електроустановок. Правила улаштування електроустановок.. Розділ 1.7. Заземлення і захисні заходи безпеки. (ПУЕ – 2006), введений з 1.01. 2007 р. – Харків: Форт, 2010. – 736 с.
29. ДСанПіН 3.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. Вид. офіц. Київ: Держнаглядохоронпраці, 2002. 38 с.
30. ГКД 34.20.507-2003. Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила. Київ: Об'єднання енергетичних підприємств «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики», 2009. 598 с.
31. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ-2018). Вид. офіц. Харків: Форт, 2018. 458 с.
32. ДНАОП 1.1.10-1.07-01. Правила експлуатації електрозахисних засобів.
33. Бланк, С. Стартап. Настольная книга основателя / С. Бланк, Б. Дорф ; пер. с англ. Т. Гутман, И. Окунькова, Е. Бакушева. – 2-е изд. – Москва : Альпина Паблишер, 2014. – 614 с.
34. Дрейпер, У. Стартапы : профессиональные игры Кремниевой долины / У. Дрейпер ; предисл. Э. Шмидта ; пер. с англ. В. Егорова. – Москва : Эксмо, 2012. – 378 с.
35. Коэн, Д. Стартап в Сети : мастер-классы успешных предпринимателей / Д. Коэн, Б. Фелд ; пер. с англ. М. Иутина. – 2-е изд. – Москва : Альпина Паблишер, 2013. – 337 с.