

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій
Кафедра електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ **О. КОЛЛАРОВ**
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2023 р.

Кваліфікаційна робота
магістра

на тему Дослідження перехідних процесів у електричній мережі при
порушенні роботи силових вимикачів

Виконав студент 2 курсу, групи ЕЛКм-22
(шифр групи)

спеціальності підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та
(шифр і назва спеціальності підготовки)

та електромеханіка»

_____ **Даніїл ЮРЧЕНКО**

(ім'я та прізвище)

_____ (підпис)

Керівник _____ **к.т.н., доц., М. РОМАНЮК**

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

_____ (підпис)

Рецензент _____

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

_____ (підпис)

Нормоконтроль:

_____ **Е. НЕМЦЕВ**

(підпис)

Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

_____ (дата)

_____ (дата)

ЛУЦЬК – 2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: магістр

Спеціальність: електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (О. КОЛЛАРОВ)

«_____» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Даніїлу ЮРЧЕНКУ

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: Дослідження перехідних процесів у електричній мережі при порушенні роботи силових вимикачів

керівник роботи Микола РОМАНЮК, канд. техн. наук, доцент
 (ім'я та прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 11 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: Потужність КЗ мережі – 3200 МВА.
Генеруюче обладнання: генератор Г1, Г2 – 30 МВт, генератор Г3 – 92 МВт.
Трансформатори: Т1, Т2 – 25 МВА, Т3, Т4 – 16 МВА, Т5-Т8 – 40 МВА, Т9 –
63 МВА. Параметри повітряних ліній електричної мережі: ПЛ1 – 10 км
(0,4 Ом/км), ПЛ2 – 12 км (0,39 Ом/км), ПЛ3 – 16 км (0,41 Ом/км), ПЛ4 –
15 км (0,38 Ом/км), ПЛ5 – 20 км (0,41 Ом/км). Максимальне значення
споживаної активної потужності – 45 МВт. Максимальне значення
коефіцієнта потужності – 0,85. Наявність споживачів 1 та 2 категорії –
наявні. Максимальний робочий струм – 490 А. Мінімальний необхідний
час спрацювання захисту – 0,01 с. Постійна часу у точці КЗ – 0,05 с.
Номінальний струм відключення – 40 кА. Номінальне значення відносного
вмісту аперіодичної складової у струмі, що відключається – 0,3. Струм
термічної стійкості – 50 кА. Час протікання струму термічної стійкості –
3 с.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Огляд електричних мереж і ролі автоматичних вимикачів у їх роботі

2. Визначення впливу роботи вимикачів на перехідні процеси в мережі.

3. Огляд принципів роботи вимикачів з метою поліпшення їх роботи.

4. Розрахунок і вибір силових вимикачів.

5. Моделювання перехідних процесів, викликаних несправностями силових вимикачів.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, якщо передбачається)

Одинадцять слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ініціали, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи 1 – 4	М. РОМАНЮК, доц. каф.		
Нормоконтроль	Е. НЕМЦЕВ		

7. Дата видачі завдання 2 жовтня 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	02.10.23 – 15.10.23	
2.	Розділ 2	16.10.23 – 29.10.23	
3.	Розділ 3	30.10.23 – 12.11.23	
4.	Розділ 4	15.04.23 – 03.12.23	
5.	Розділ 5	04.12.23 – 10.12.23	
6.			

Студент _____
(підпис)

Даніїл ЮРЧЕНКО _____
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Микола РОМАНЮК _____
(ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Даніїл ЮРЧЕНКО. Дослідження перехідних процесів у електричній мережі при порушенні роботи силових вимикачів / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня «магістр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – ДВНЗ ДонНТУ, Луцьк, 2023.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає чотири розділи, висновків, списку використаної літератури та додатків.

У першому розділі здійснено огляд електричних мереж і ролі автоматичних вимикачів у їх роботі при виникненні перехідних процесів.

У другому розділі було виконано огляд принципів роботи вимикачів з метою поліпшення їх роботи.

У третьому розділі здійснено розрахунок і вибір силових вимикачів.

У четвертому розділі було здійснено моделювання перехідних процесів, викликаних несправностями силових вимикачів.

Ключові слова: електрична мережа, силовий вимикач, перехідні процеси, надійність, удосконалення конструкції, короткі замикання, роз'єднувач, несправність, трифазна мережа, моделювання

SUMMARY

Danylo YURCHENKO. Investigation of transient processes in the electrical network when there are disturbances in the operation of power circuit breakers / Graduation qualifying work for obtaining an educational level «master» in specialty 141 Electricity, electrical engineering and electromechanics. – DVNZ DonNTU, Lutsk, 2023.

The thesis consists of an introduction, the main part, which includes four chapters, conclusions, a list of references and appendices.

The first chapter provides an overview of electrical networks and the role of circuit breakers in their operation during transients.

In the second section, the principles of circuit breaker operation are reviewed in order to improve their performance.

In the third section, the calculation and selection of circuit breakers was performed.

In the fourth section, transient processes caused by circuit breaker faults were modeled.

Keywords: electrical network, circuit breaker, transients, reliability, design improvement, short circuits, disconnector, fault, three-phase network, modeling

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	7
1 ОГЛЯД ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ І РОЛІ АВТОМАТИЧНИХ ВИМИКАЧІВ У ЇХ РОБОТІ	9
1.1 Структура та компоненти сучасних електричних мереж	9
1.2 Типи силових вимикачів та їх застосування	11
1.3 Роль перехідних процесів для надійності роботи мережі	15
1.4 Вплив роботи вимикачів на перехідні процеси в мережі	18
1.5 Огляд літературних джерел з питання, що досліджується	22
2 ОГЛЯД ПРИНЦИПІВ РОБОТИ ВИМИКАЧІВ З МЕТОЮ ПОЛІПШЕННЯ ЇХ РОБОТИ	31
2.1 Загальні принципи використання вимикачів у трифазних мережах	31
2.2 Огляд типів вимикачів та принципів визначення їх надійності	35
2.3 Технології удосконалення конструкцій вимикачів	43
2.4 Застосування різноманітних стратегії технічного обслуговування вимикачів	48
3 РОЗРАХУНОК І ВИБІР СИЛОВИХ ВИМИКАЧІВ	56
3.1 Характеристика підстанції та навантажень	56
3.2 Визначення параметрів струмів короткого замикання	58
3.3 Огляд схеми розподільчих пристроїв вищої і нижчої напруги підстанції та засобів захисту	59
3.4 Вибір вимикачів і роз'єднувачів	62
4 МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ, ВИКЛИКАНИХ НЕСПРАВНОСТЯМИ СИЛОВИХ ВИМИКАЧІВ	65
ВИСНОВКИ	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	73
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА	78
ДОДАТОК Б. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА	86

ВСТУП

Зміни умов експлуатації електричного обладнання у системах електропостачання досить часто супроводжуються перехідними процесами. Кількісні показники роботи систем (потужність, напруга, струм, опори та інші) пов'язані між собою та залежать від режимів роботи мереж, які можуть бути усталеними та перехідними (нестационарними). Режим роботи електричних систем суттєво залежить від поведінки окремих її складових.

Основним завданням на шляху підтримки працездатності енергетичних систем електропостачання є підтримка значень параметрів, що забезпечуються стабільність забезпечення визначеного режиму роботи – стійкість (статичну і динамічну). Порушити стійкість систем електропостачання можуть різноманітні перехідні процеси, що спричинені різними факторами – вони є результатом змін, викликаних умовами експлуатації, порушеннями ізоляції струмоведучих частин, несправністю обладнання, зовнішніми впливами та іншого. Перехідні процеси, які викликані перемиканням елементів системи, випробуваннями та керуванням, відносять до стандартних умов експлуатації. А ті, що викликані виникненням аварійних ситуацій (короткі замикання, обриви фаз, «ізоляція» коротких замикань та інші), відносять до позаштатних режимів роботи.

Оцінка перехідних процесів забезпечує можливість передбачати та керувати ними на основі особливостей роботи того чи іншого обладнання та якісно і кількісно оцінювати відповідні зміни у роботі систем електропостачання. Для цього необхідно вміти ідентифікувати та розраховувати параметри перехідних процесів, робити прогноз кількісних змін у роботі системи, доцільно використовувати дані про зміну конкретних параметрів і здійснювати пошук шляхів для ефективного

керування для можливості впливу на перехідні процеси спеціальними пристроями.

Різноманітні методи моделювання та експериментальних досліджень реальних систем електропостачання дають широкі можливості для дослідження та розрахунку перехідних процесів.

Безперебійна робота сучасних електричних мереж залежить від надійності та ефективності різних компонентів, причому силові вимикачі є ключовими в цій структурі. Ці вимикачі, важливі для керування та захисту електричних ланцюгів, можуть викликати перехідні процеси в мережі, коли вони працюють в умовах збоїв.

Мета роботи – аналіз та розуміння перехідних процесів в електричних мережах, що виникають внаслідок збоїв при роботі силових вимикачів.

Завдання роботи:

- здійснити огляд типів силових вимикачів та їх застосування,
- визначити роль перехідних процесів для надійності роботи мережі та вплив роботи вимикачів на перехідні процеси,
- оглянути технології удосконалення конструкцій вимикачів,
- здійснити розрахунок і вибір силових вимикачів,
- здійснити моделювання перехідних процесів, викликаних несправностями силових вимикачів.

Об'єкт досліджень – поведінка електричної мережі на перехідні процеси, що у ній виникають.

Предмет досліджень – перехідні процеси, що виникають в електричній мережі при збоях у роботі силових вимикачів.

1 ОГЛЯД ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ І РОЛІ АВТОМАТИЧНИХ ВИМИКАЧІВ У ЇХНІЙ РОБОТІ

1.1 Структура та компоненти сучасних електричних мереж

Сучасні електричні мережі є основним способом розподілу електричної енергії в усьому світі, маючи у своєму складі різноманітні компоненти та характеризуються різноманітністю структур та призначення, ефективністю та надійністю передачі та розподілу електричної енергії. Зазначені мережі відіграють ключову роль для живлення об'єктів промисловості та різноманітної інфраструктури [1].

Основу електричних мереж складають об'єкти виробництва електричної енергії – традиційні (вугільні, газові та інші) та альтернативні (вітряні, сонячні та інші). Установки цих генеруючих ємностей виробляють електричну енергію, що передається на значні відстані по високовольтним лініям електропередач. Зазначені лінії повинні бути розроблені таким чином, щоб мінімізувати втрати потужності, які виникають під час передачі електроенергії [1].

Підстанції також виступають важливими компонентами електричних мереж – вони слугують вузловими точками, в яких існує можливість досягнення необхідного рівня напруги за рахунок трансформації. Підстанції оснащують трансформаторами, розподільчими пристроями та різноманітним контрольним обладнанням, що забезпечує передачу електроенергії з відповідним рівнем напруги до кінцевих споживачів.

Розподільні мережі, що відгалужуються від підстанцій, передають електричну енергію кінцевим споживачам – ці мережі складаються з розподільних ліній, трансформаторів і розподільних щитів та розробляються таким чином, щоб мати змогу задовольнити наявний та майбутній попит.

Особливістю сучасних електричних мереж є їх високий ступінь взаємопов'язаності та автоматизації, що призвело до появи та впровадженню такої технології, як «Smart Grid». Контролюючі та керуючі пристрої інтегруються до мереж та дозволяють здійснювати моніторинг/контроль роботи різних компонентів мережі в реальному часі. Це дозволяє забезпечити більш ефективний розподіл електричної енергії, зменшує втрати енергії та підвищує надійність роботи мереж. Зазначений тип мереж дозволяє ефективніше інтегрувати відновлювані джерела енергії та швидко реагувати на попит [2].

Силові вимикачі є невід'ємними компонентами електричних мереж і відіграють вирішальну роль у забезпеченні безпеки та надійності електропостачання. Вони розподіляються по мережі в різних її точках і забезпечують захист від протікання аварійних струмів й струмів коротких замикань. Шляхом переривання зазначених струмів ці пристрої запобігають пошкодженню обладнання та підтримують стабільність роботи мережі. В першу чергу автоматичні вимикачі виконують роль захисних пристроїв – вони сконструйовані для автоматичного виявлення та переривання струмів замикання, тим самим запобігаючи потенційному пошкодженню електричної мережі, спонукає для зменшення ризику електричних пожеж, збоїв обладнання та інших небезпечних ситуацій, які можуть виникнути внаслідок неконтрольованих струмових потоків [3].

Ефективність роботи електричних мереж значною мірою залежить від правильного функціонування автоматичних вимикачів. Виконуючи функцію ізоляції несправних ділянок мережі, вони мінімізують вплив збоїв, що виникли, та забезпечують безперебійне електропостачання окремих інших ділянок. Отримана таким чином вибіркова ізоляція у мережах може дозволити вирішити питання по запобіганню масовим відключенням споживачів та забезпечення безперебійного електроживлення критичної інфраструктури. Автоматичні вимикачі також відіграють не останню роль в змісті управління мережею та її

обслуговування. Зазначені пристрої дозволяють безпечно та контрольовано відключати окремі сегменти мережі для поточного обслуговування, модернізації та аварійного ремонту. Усі ці чинники дозволяють підтримати загальну працездатність, ефективність та довговічність електричної мережі [4].

Розвиток технологій конструювання та виготовлення автоматичних вимикачів призвів до розробки моделей, здатних витримувати високі рівні напруги та струму, працювати з більш високим ступенем точності та більшою швидкістю. Сучасні автоматичні вимикачі все частіше оснащують цифровими системами моніторингу та управління, що дозволяє здійснювати їх дистанційне керування та діагностику в реальному часі. Це, крім іншого, дозволяє здійснити інтеграцію інтелектуальних технологій, підвищує передбачувальну здатність у запобіганні несправностей, ще більше підвищуючи надійність роботи мережі [3].

Таким чином, силові вимикачі є незамінними компонентами сучасних електричних мережах. Їх провідна роль у захисті мережі від аварійних струмів та струмів коротких замикань визначає їх фундаментальну важливість для безпечного та надійного розподілу електричної енергії.

1.2 Типи силових вимикачів та їх застосування

Автоматичні вимикачі, призначені для керування та захисту електричних мереж, виготовлюються досить широкою номенклатурою і різноманітних типів, для різного призначення та для задоволення конкретних операційних потреб і типів застосувань. Розуміння конструктивних особливостей різних типів вимикачів має вирішальне значення для їх вибору для визначеної ділянки електричної мережі у залежності від принципів її функціонування [5].

Низьковольтні автоматичні вимикачі зазвичай використовуються при передачі незначних потужностей. Вони призначені для використання в мережах низької напруги (до 1000 В). Такі вимикачі призначені для захисту від перевантажень та коротких замикань у малопотужних електричних системах. Автоматичні вимикачі середньої напруги мають застосування в промисловості та комунальному господарстві. Ці вимикачі працюють в діапазоні напруг від 1000 В і є важливими елементами розподільних систем на промислових підприємствах. За конструкцією вони часто виготовлюються вакуумованими або елегазовими – такі конструкції характеризуються низькими витратами на технічне обслуговування та високу надійність та чудовими властивостями гасіння дуги. Автоматичні вимикачі високої напруги є критично-важливими елементами високовольтних мереж. Вони відіграють вирішальну роль для захисту високовольтних ліній електропередач та підстанцій. Їх конструктивне виконання може бути різноманітним, у них для гасіння дуги використовують або високошвидкісний потік повітря або газ (шестифтористу сірку). Вибір того чи іншого типу залежить від різних факторів: рівня напруги та величини струму, який необхідно перервати. Спеціальні автоматичні вимикачі, які призначено для вирішення специфічних проблем, як-от необхідність переривання електричних дуг постійної напруги/струму, у таких застосуваннях, як альтернативна енергетика, лінії електропередач постійного струму та розмикання ланцюгів витоку «на землю» [5].

Не залежно від призначення, кожен тип автоматичного вимикача мають спеціальні функції, що забезпечують найкращі показники продуктивності, ефективності та безпеки: можуть бути поєднані теплові та магнітні механізми, забезпечується точність захисту з можливістю регулювання параметрів відключення з одночасним моніторингом у реальному часі. У разі інтеграції передових технологій в конструкції автоматичних вимикачів дозволить здійснити дистанційний моніторинг та

здійснити дистанційне керування, визначати дані для здійснення прогнозного обслуговування та оптимізації станів.

Отже, доступність різноманітних силових вимикачів може задовольнити практично усі потреби електричних мереж і дають можливість забезпечити безпеку та ефективність розподілу електричної енергії. Постійний прогрес у технологіях конструювання автоматичних вимикачів дозволить підвищити їх продуктивність, швидкодію та широкі можливості по інтеграції до будь яких мереж.

Автоматичні вимикачі є досить важливими компонентами електричних мереж і відіграють ключову роль в управлінні несправностями та захисті систем. Їх основна функція полягає у перериванні струму в разі виникнення несправності, тим самим захищаючи мережу від пошкоджень і забезпечуючи параметри безпеки як всієї системи, так і окремих споживачів у системі.

Автоматичні вимикачі мають змогу виявити ряд несправностей (струмові перевантаження, міжфазні короткі замикання та замикання на землю й інші) – при виявленні цих явищ, вони здатні швидко переривати протікання струму. У даному змісті швидка реакція автоматичних вимикачів має вирішальне значення для запобігання негативного впливу збоїв, які можуть призвести до пошкодження обладнання, пожеж і системних порушень. Швидкість і надійність спрацювання автоматичного вимикача мають першочергове значення в мережах високої напруги, де струми пошкодження можуть бути надзвичайно руйнівними [6].

Після виявлення несправності та переривання струму, автоматичні вимикачі дозволяють ізолювати «уражений» сегмент мережі. Зазначена ізоляція може запобігти впливу несправності на інші частини мережі та дозволяє здійснювати обслуговування та ремонт «ураженої» частини. Після усунення виявлених несправностей автоматичні вимикачі дозволяють відновити роботи мережі (або вручну або автоматично),

забезпечуючи мінімальний ступінь переривання електропостачання. Автоматичні вимикачі працюють у поєднанні з іншими захисними пристроями (різноманітні реле, запобіжники та пристрої захисту від перенапруг) – дана координація є необхідною для забезпечення повного захисту в електричній мережі. Зазначені захисні пристрої призначені для виявлення певних «аномалій» у мережі та сигналізують про режим спрацювання вимикача, що має вирішальне значення для досягнення ефективного керування несправностями та підвищення загальної надійності електричної мережі [6].

Сучасні електричні мережі є динамічними «утвореннями», а умови навантаження схильні до постійної зміни. Вимикачі мереж повинні постійно адаптуватися до цих змін, забезпечуючи постійний та надійний захист. Зазначеної адаптації можна досягти за допомогою відповідного регулювання та налаштувань, які дозволяють вимикачам належним чином реагувати на різні сценарії роботи і поведінки мережі. За всіх рівних умов, удосконалення технології автоматичних вимикачів можливо завдяки технологічному прогресу і призводить до розробки «розумніших» та «ефективніших» автоматичних вимикачів. Головною відмінністю сучасних вимикачів є їх оснащення цифровими системами моніторингу, які надають різноманітні дані про поточний стан мережі в реальному часі. Отримана інформація має вирішальне значення для прогнозного технічного обслуговування, дозволяючи виокремлювати потенційні проблеми до того, як вони призведуть до виникнення реальної несправності. Більш того, інтелектуалізовані вимикачі можуть бути інтегровані до автоматизованих систем керування, що призводить до покращення якості управління мережею. Попередній вибір і територіальне розміщення автоматичних вимикачів суттєво впливає на улаштування та ефективну роботу електричних мереж. На місцезорозташування вимикачів можуть впливати як розгалуженість мережі, розподіл навантаження між окремими гілками та потенційний вплив можливих збоїв у мережі [7].

1.3 Роль перехідних процесів для надійності роботи мережі

Перехідні явища у електричних мережах являють собою швидкі, тимчасові зміни напруги, струму та частоти в системі, які можуть бути викликані раптовими порушеннями або перемиканнями у мережі. Ідентифікація та розуміння цих явищ має вирішальне значення для підтримки стабільної роботи енергосистем [8].

Усі перехідні процеси в електричних мережах можна розділити на два типи:

- ті, що викликані перемиканням,
- ті, що викликані несправністю.

Перехідні процеси перемикання виникають через нормальну роботу автоматичних вимикачів, трансформаторів та вимикачів навантаження. Ці події характеризуються наявністю пускових струмів при підключенні двигунів, трансформаторів, компенсуючих пристроїв, зарядних станцій та інших потужних споживачів. Перехідні процеси, що викликані наявністю або появою несправності, виникають через різноманітні несправності у мережі – міжфазні короткі замикання, замикання на землю та інші. Вони характеризуються різкими змінами рівнів напруг та струмів, перенапругами, електромагнітними збуреннями та іншими явищами [8].

Серед основних причин виникнення перехідних процесів в електричних мережах є природні явища (наприклад, удари блискавки) та збої в системах живлення, перемикання, приєднання та вимкнення споживачів, різке знеструмлення окремих компонентів мережі та інше. Тимчасові, перехідні явища мають різний вплив на компоненти електричної мережі, можуть призвести до руйнування ізоляції, термічне та механічне навантаження на провідники та обладнання, заважати нормальній роботі захисних пристроїв і систем керування та до інших негативних явищ.

Зазначені перехідні явища і процеси передбачають здійснення аналізу їх амплітуд, тривалості, частоти та форми сигналів. Сучасні методи вимірювання, які використовують високошвидкісні системи збору даних і цифрову обробку сигналів дозволяють зробити це для виокремлення та аналізу перехідних подій – зазначені вимірювання мають вирішальне значення для оцінки впливу перехідних процесів на мережу та для розробки стратегій поведінки. Додатковий аналіз може бути здійснений шляхом моделювання перехідних явищ, прогнозування поведінки мережі та впливу на її компоненти. Для цього можуть бути використані різноманітні математичні та обчислювальні моделі, що враховують топологію мережі та характеристику окремих компонентів й експлуатаційних умов. Створені моделі допомагають зрозуміти динаміку перехідних процесів та розробити заходи для протистояння їх негативного впливу. Наявність перехідних процесів може суттєво вплинути на якість електричної енергії, викликаючи різноманітні проблеми: падіння напруги, зростання струму, гармонічні спотворення та мерехтіння. Зазначені проблеми якості електричної енергії можуть вивести з ладу чутливе електронне та електричне обладнання, викликати порушення протікання промислових процесів та неефективного використання енергії [8].

Для пом'якшення несприятливих наслідків перехідних явищ рекомендується використання різних методів: встановлення пристроїв захисту від перенапруг, грозорозрядників та демпферів. Не останню роль відіграють належне заземлення та екранування, що мають суттєвий вплив на виникнення перехідних процесів. Ідентифікація перехідних процесів в електричних мережах є одним з важливих аспектів для аналізу енергосистем. Розуміння типів, причин, наслідків і стратегій зменшення впливу цих явищ має вирішальне значення для забезпечення стабільності, надійності та якості електричної енергії в електричних мережах.

Аналіз характеристик перехідних напруг і струмів є досить важливим для розуміння їх впливу на електричні мережі. Ці процеси, як правило, є

досить короткими та раптовими подіями коливання напруги та/або струму та можуть бути викликані різними подіями. Ключовими параметрами при аналізі перехідних напруг і струмів є: максимальне значення амплітуди, час наростання, тривалість і енергетичні характеристики. Високі значення перехідних напруг можуть викликати значні негативні явища, зокрема спричинити вихід з ладу ізоляції, викликати термічні та механічні напруги, впливати на чутливі електронні компоненти, викликати несправності та різноманітні пошкодження. Крім того, перехідні процеси часто містять високочастотні компоненти, які можна проаналізувати за допомогою гармонічного аналізу, що передбачає розкладання спектру перехідного процесу на окремі частотні компоненти. Аналіз отриманої картини гармонік дозволяє здійснити оцінку впливу перехідних процесів на якість електричної енергії та роботу мережі [8].

Для вимірювання величин перехідних напруг і струмів необхідно застосування спеціального обладнання, здатного фіксувати швидкі змінні. Зазначені пристрої повинні мати високу частоту дискретизації та достатню пропускну здатність для точної ідентифікації та реєстрації перехідних явищ. Математичні, обчислювальні та комп'ютерні моделі можуть бути досить важливими інструментами для здійснення аналізу перехідних напруг і струмів шляхом моделювання поведінки систем під час перехідних процесів.

Отже, аналіз перехідних характеристик напруг та струмів заслуговує підвищеної уваги з метою якісного управління електричною мережею. Розуміння цих характеристик допомагає оцінити потенційні ризики та розробити відповідні механізми захисту, що можна зробити за допомогою точних вимірювань, моделювання та досконалого аналізу перехідних процесів. Завдяки існуючим технологіям можна значно зменшити несприятливі наслідки перехідних процесів, тим самим підвищуючи загальну стабільність і ефективність роботи електричних мереж.

1.4 Вплив роботи вимикачів на перехідні процеси в мережі

Режими спрацювання вимикачів є досить потужним джерелом перехідних явищ в електричних мережах. Під час виконання дій по розмиканню та замиканню вимикачів можуть бути згенеровані перехідні напруги та струми.

При спрацьовуванні вимикача переривається потік струму в електричному ланцюзі – це переривання створює перехідні процеси. Раптове розмикання створює сплеск потенціалу напруги на контактах вимикача, що призводить до утворення електричної дуги. Процес гасіння дуги та подальше відновлення діелектричного проміжку викликають перехідні перенапруги. Подібним же чином при замиканні вимикача може бути викликаний перехідний струм, що пояснюється раптовою активацією компонентів схеми [9].

Перехідні процеси, спричинені спрацюванням вимикача, можна поділити на перехідні процеси перемикання та перехідні процеси повторного включення або повторного запалювання електричної дуги. Перехідні процеси перемикання виникають через наявність індуктивних та ємнісних елементів у мережі, властивості яких проявляються при спрацюванні вимикачів. Перехідні процеси при повторному запалюванні електричної дуги відбуваються тоді, коли дуга відновлюється через контакти вимикача після початкового переривання, що призводить до виклику високочастотних перехідних явищ.

Визначення та вимірювання параметрів перехідних процесів є складним завданням через їх короткотривалість та високу частоту. Аналіз вимірних параметрів перехідних процесів передбачає детальне вивчення форм хвиль і здійснення спектрального аналізу, що допомагає визначити природу та джерело перехідних процесів. Для забезпечення комплексного підходу до вивчення перехідних процесів досить корисним може бути

інтеграція моделювання та натурних вимірювань, що може підвищити точність досліджень та вивчення природи перехідних явищ. Однією з основних проблем для дослідження перехідних процесів є наявність широкого діапазону частот і амплітуд, які необхідно враховувати. Перехідні процеси кожного разу можуть значно відрізнятися за своїми характеристиками, вимагаючи гнучких і адаптованих методів вимірювання та моделювання. Ще більша складність може бути викликана розгалуженістю електричних мереж, численністю електричних компонентів та ускладненими взаємозв'язками між ними.

Розуміння перехідних процесів, що виникають при роботі вимикачів, можуть надати інформацію для [9]:

- визначення найдоцільніших місць розташування вимикачів і захисних пристроїв,
- вибору систем ізоляції,
- розробки стратегій управління самими мережами,
- забезпечення стабільності роботи мереж,
- мінімізації ризику пошкодження обладнання,
- підвищення загальної надійності системи.

Вивчення та розуміння електричних перехідних процесів, що характеризуються швидкими короткочасними змінами напруг та/або струмів, завдають суттєвих проблем стабільності та надійності роботи електричних мереж. Так історично склалося, що розуміння електричних перехідних процесів було обмежено доступністю технологій вимірювання та аналізу. Ранні дослідження були зосереджені на спостереженні лише результируючих ефектів від наявності перехідних процесів – збоїв у роботі обладнання та електричної мережі, а розвиток технологій дало можливість вимірювати та аналізувати перехідні процеси, дало розуміння їх причин та наслідків. Високошвидкісні системи збору даних і цифрові пристрої дають змогу детально фіксувати й аналізувати перехідні процеси. Висока точність досягається завдяки високій роздільній здатності, що дозволяє

більш глибоко зрозуміти природу перехідних явищ, генерування, поширення та згасання в електричних мережах [10].

Глибоке розуміння електричних перехідних процесів сприяє ефективній і простішій розробці та експлуатації електричних мереж. Ці питання включають вибір відповідних параметрів обладнання, ступеня ізоляції та розміщення захисних пристроїв, допомагають розробляти структуру мереж, що є більш стійкими до тимчасових збурень від перехідних явищ. Обмежувачі напруги і струму, системи і пристрої захисту від блискавок, пристрої визначення пошкоджень можуть бути розроблені на основі розуміння характеристик перехідних процесів і мають вирішальне значення для захисту компонентів мережі від їх шкідливого впливу. Знання про перехідні процеси дозволяють операторам мереж визначити стратегії вирішення надзвичайних ситуацій, долати збої та перевантаження, що часто супроводжуються перехідними процесами. Це також дозволяє здійснити розробку більш ефективних схем розвантаження та процедур усунення несправностей. Це можна ефективно здійснювати завдяки використанню передових інструментів моделювання та технологій моніторингу [10].

Перехідні процеси мають також суттєве значення для розробки конструкцій вимикачів. Одним з основних проблемних питань у роботі вимикачів, які достатньо сильно впливають на наявність перехідних процесів, є електричні дуги. Розуміння динаміки утворення та згасання електричної дуги у вимикачах під час перехідних процесів має вирішальне значення. Ці знання дозволять створювати вимикачі з більш ефективними та швидшими можливостями гасіння електричної дуги, мінімізуючи її тривалість та знизивши вплив перехідних процесів. Інтеграція цифрових технологій у вимикачі шляхом використання спеціальних датчиків та мікропроцесорів дозволить більш ефективно та швидко здійснювати моніторинг і аналіз електричних параметрів. Це також дозволяє «розумним» вимикачам «спілкуватися» з іншими компонентами

електричної мережі, сприяючи розширенню можливостей по автоматизованому контролю та досягненні принципів оптимізації роботи енергосистем.

Новітні дослідження електричних перехідних процесів відкривають шлях до розробки «твердотільних» вимикачів. На відміну від традиційних механічних вимикачів, такі вимикачі мають у своїй конструкції напівпровідникові пристрої, що дозволяють переривати потоки струмів. Такі вимикачі мають менший час відгуку, більшу надійність і підвищення параметрів контролю власне процесу переривання електричного ланцюга. Майбутні технології конструювання вимикачів зосереджуються на покращенні можливостей обмеження струмів коротких замикань. З огляду на те, що електричні мережі стають все більш складними та взаємопов'язаними, потенціали струмів коротких замикань, з якими мають поратися вимикачі, зростають. Теоретичні та практичні дослідження перехідних процесів допомагає розробляти вимикачі, що здатні ефективно обмежувати зазначені струми, тим самим захищаючи інші компоненти електричних мереж та підтримуючи стабільність їх роботи. Майбутні технології вимикачів повинні бути більш повно налаштованими для конкретних застосувань [10].

Отже, глибокого розуміння електричних перехідних процесів для конструкцій вимикачів є обов'язковими – вони охоплюють удосконалення механізмів гасіння дуги, інтеграцію з цифровими та інтелектуальними технологіями, розробку твердотільних вимикачів і пришвидшення їх роботи.

1.5 Огляд літературних джерел з питання, що досліджується

У дослідженні [11] автори зосередились на розробці інтелектуального діагностичного модуля для високовольтних автоматичних вимикачів з використанням системи керування з подвійним мікроконтролером. У статті підкреслюється важливість автоматичних вимикачів високої напруги в енергосистемах, підкреслюється їх роль в управлінні та захисті електричного обладнання. Обговорюються обмеження традиційних систем періодичного технічного обслуговування автоматичних вимикачів, що можуть бути досить дорогими, неефективними та створювати нові ризики несправностей. Для вирішення визначених проблем автори пропонують застосування інтелектуальної діагностики несправностей, яка використовує методи штучного інтелекту для запровадження автоматичного аналізу та навчання. Центром сконструйованої системи є система з подвійним мікроконтролером, яка поєднує процесор цифрових сигналів і центральний процесор, що дозволяє покращити діагностику несправностей та забезпечити швидкість реагування. Система розроблена таким чином, щоб бути економічно-ефективною, мати низьке енергоспоживання та високу здатність обробки даних. Конструкція апаратного забезпечення включає різні модулі, які можуть збирати та обробляти дані, здійснювати діагностичний контроль і передавати сигнали за допомогою модулів зв'язку. Використане програмного забезпечення базується на модифікованому алгоритмі нейронної мережі для здійснення діагностики, який визначає нові типи підтверджених несправностей до існуючої бази знань, підвищуючи можливості навчання та адаптації системи. Автори підкреслюють можливість потенційного застосування розробленої системи для інтелектуальної діагностики несправностей вимикачів високої напруги.

У дослідженні [12] увага була зосереджена на діагностиці несправностей високовольтного електричного кола з вимикачами з акцентом на механічних несправностях. Дослідження мало на меті підвищити безпеку та надійність енергосистем. У роботі описується триетапний процес діагностики: отримання сигналу, виділення ознак та ідентифікація несправностей із застосуванням методу декомпозиції «Ensemble Empirical Mode Decomposition» (EEMD) для виділення ознак і використання нейронної мережі для діагностики несправностей. Стаття підкреслює значення в енергосистемах автоматичних вимикачів високої напруги та необхідність діагностики механічних несправностей для зменшення економічних втрат через електричні порушення. У документі наведено детальний опис і визначена теоретична основа методу і нейронних мереж, визначається покроковий процес вилучення ознак. Дослідження містять експериментальний аналіз і результати, що демонструють процес діагностики несправностей у вимикачах високої напруги. Зазначене включає збір вібраційних сигналів у різних станах, обробку цих сигналів за допомогою обраного методу для отримання характерного стану та наступне використання нейронної мережі для класифікації несправностей. Дослідження показує, що різноманітні механічні несправності створюють чіткі вібраційні сигнали, які можна ефективно діагностувати за допомогою наведеної методології.

У дослідженні [13] вивчається вплив заземлених екранів на ізоляційні характеристики твердої ізоляції вакуумних вимикачів. Автори зосередились на розрахунку розподілу електричного поля у вимикачі за допомогою програмного забезпечення методом аналізу кінцевих елементів. Вони прагнули зрозуміти – яким чином заземлений екран впливає на вразливі частини вимикача. Результати показали, що заземлені екрани можуть посилювати електричне поле всередині вбудованого полюса, а також впливати на електричне поле у вакуумному вимикачі. Вакуумні вимикачі, що зазвичай покриті твердими діелектриками, такими

як епоксидна смола, і які значною мірою впливають на термін їх експлуатації та фізичне старіння через напруженість електричного поля. У дослідженні проводиться детальний аналіз розподілу електричного поля, який базується на принципах розрахунку та теоретичного рівняння електростатичного поля, для чого була використана тривимірна модель. Було доведено, що заземлений екран може посилити напруженість електричного поля в певних областях, але все ще відповідає вимогам до ізоляції. Результати моделювання надають цінну інформацію для оптимізації ізоляційних конструкцій вимикачів.

У дослідженні [14] основна увага зосереджена на здійсненні моделювання підключення батареї конденсаторів з метою оцінки додаткового навантаження на вимикачі. Було надано рекомендації щодо впровадження певного типу вимикачів силового ланцюга в електричній мережі з урахуванням електричного навантаження від пускового струму під час замикання та перехідної напруги відновлення та швидкості зростання напруги відновлення під час розмикання. Обговорюється важливість силових автоматичних вимикачів, наголошується на їх впливі на сильні електричні навантаження та на необхідності проходження типових і приймальних випробувань цих вимикачів. У статті запропоновано методи моделювання для визначення електричної напруги силових вимикачів, які використовуються для комутації батарей конденсаторів на підстанції. Розроблено теоретичні аспекти комутаційних перехідних процесів, їх причини та вплив на високовольтне обладнання. У дослідженні наводиться порівняння змодельованих результатів електричного навантаження на силові вимикачі в базовому варіанті (ідеальне джерело напруги) з практичними даними. У роботі підкреслюється важливість врахування високочастотного пускового струму та перехідної напруги відновлення при виборі автоматичних вимикачів, що дозволить уникнути їх потенційних пошкоджень.

У дослідженні [15] представлено новий підхід до діагностики несправностей у високовольтних вимикачах за допомогою штучної нейронної мережі (RBF). Стаття визначає складності точного діагностування механічних несправностей через різноманітність і складну структуру вимикачів. Автори пропонують використовувати штучну нейронну мережу (ШНМ) для ефективної діагностики несправностей, наголошуючи на можливостях ШНМ щодо розпізнавання образів у цьому контексті. У статті представлено концепцію нейронної мережі RBF, типу локальної апроксимаційної нейронної мережі, як найбільш ефективної альтернативи традиційній моделі зворотного поширення, що використовується в енергетичних системах. Автори надали модифікований алгоритм для розпізнавання станів, що містить концепцію рівня довіри для підвищення точності діагностики несправностей, особливо для нових типів станів, які відсутні в навчальній вибірці. Надається детальне пояснення того, як повинен застосовуватися розроблений модифікований алгоритм для розпізнавання стану високовольтних вимикачів. У документі були також визначені обмеження застосування ШНМ у діагностиці та моніторингу несправностей обладнання, що підкреслює необхідність постійних досліджень і розробки нових алгоритмів і мережевих архітектур для покращення діагностики несправностей обладнання в складних системах.

У дослідженні [16] представлено новий підхід до прогнозування місячної кількості спрацьовування автоматичних вимикачів у розподільчій електричній мережі, що характеризується випадковістю та залежить від різноманітних факторів (вплив зовнішнього середовища, силове навантаження, наявне обладнання та споживча обізнаність). Автори пропонують метод прогнозування на основі зваженого ланцюга Маркова – такий підхід передбачає перетворення рядів історичних даних у форму, придатну для аналізу. Модель класифікації середньої дисперсії використовується для визначення простору станів спостережуваних рядів,

а власні коефіцієнти цих рядів обчислюються та нормалізуються, щоб служити ваговими значеннями. Результати показали, що цей підхід є здійсненним і має практичну цінність. У статті детально описано методологію та математичні моделі, що були використані.

У дослідженні [17] обговорюється важливість перевірки розривної здатності автоматичних вимикачів у промислових електричних мережах. У статті висвітлено проблеми, пов'язані зі зростанням навантажень, збільшенням власного електроспоживання та зовнішніх систем у промисловості. Зазначені фактори сприяють підвищенню рівня струму короткого замикання, що є основною проблемою для стабільної роботи електроенергетичних систем під час їх експлуатації. Автори наводять метод розрахунку струму короткого замикання, що протікає через автоматичні вимикачі. Цей розрахунок дозволяє з більшою точністю здійснити перевірку розривної здатності автоматичних вимикачів для того, щоб переконатися, що вони здатні переривати струми, не виходячи з ладу та не завдаючи шкоди електричній системі. У статті описано структури досліджуваних промислових електромереж, які пояснюють необхідність правильного вибору для найбільшого струму короткого замикання, який протікає через автоматичні вимикачі. Для здійснення аналізу автори використовують пакет програмного забезпечення, який допоміг виконати різноманітні розрахунки – обчислення струмів короткого замикання та перевірку відключаючої здатності автоматичних вимикачів.

У дослідженні [18] розглядається те, як режими відмов автоматичних вимикачів впливають на рівень надійності промислових енергосистем, та здійснено аналіз варіацій частоти та тривалості переривань живлення у точці навантаження через зміну режимів відмови автоматичного вимикача. У статті представлено кілька прикладів з різним відсотком режимів розриву та короткого замикання вимикачів і запобіжників, що продемонструвало те, як різні режими відмов впливають на показники надійності мережі. Для аналізу автори використали методологію зонно-

гілкової надійності. Серед ключових моментів можна відзначити висновки про: важливість врахування режимів розриву та короткого замикання в моделях надійності промислових енергосистем; значний вплив цих видів відмов на показники надійності системи; детальне представлення частоти переривань у точці навантаження для різного відсотка відмов вимикача. У статті наголошується, що багато моделей надійності не враховують взаємозалежні відмови захисного обладнання, які можуть істотно вплинути на кінцеві результати. Неможливість включити режими відмов автоматичного вимикача в комп'ютеризовану або ручну методологію аналізу надійності може призвести до невірних кінцевих результатів.

У дослідженні [19] основна робота була зосереджена на розробці та впровадженні інтелектуального вакуумного вимикача на базі контролера з вбудованими функціями керування мережею. Такі вимикачі мають захист від короткого замикання, перенапруг, зниження напруги, перевантаження та струмів витоку. При цьому забезпечується зв'язок у реальному часі за допомогою мережі Ethernet з терміналами (комп'ютерами), що дозволяє відобразити інформацію про величину струмів і напруг, і дозволяє переглядати та друкувати «історичні» дані. Було детально описано принципи роботи та дизайн інтелектуального контролера вимикача з підкресленням важливості вбудованої системи керування для досягнення ефективної багатозадачності в режимі реального часу. Стаття містить експериментальні дослідження та аналіз для підтвердження функцій інтелектуального вимикача для перевірки його можливостей – розроблений вимикач успішно забезпечує захист і зв'язок у режимі реального часу.

У дослідженні [20] була здійснена інтелектуальна діагностика механічних несправностей у високовольних автоматичних вимикачах з огляду на широке впровадження Інтернету речей (IoT), коли значні обсяги даних про несправності в енергетичних системах, які зберігаються в «хмарних сховищах». У статті пропонується інноваційний підхід із

використанням нейронної мережі з навчанням для інтелектуальної діагностики механічних несправностей вимикача. Наведений спосіб зменшує витрати часу на обчислення та зберігання даних, маючи при цьому високу точність розпізнавання, необхідну для швидкої та точної обробки сигналів про несправності в режимі реального часу. Супутнє навчання використовується для забезпечення максимальної точності діагностики несправностей у контексті обмежених зразків несправностей – було показано, що запропонований метод забезпечує точність діагностики понад 99%. Дослідження підкреслює складність механізмів несправностей вимикачів і нелінійний зв'язок між характеристиками та типами несправностей. У статті підкреслюється потенціал використання передових методів штучного інтелекту для підвищення точності діагностики несправностей в енергетичних системах.

У дослідженні [21] основна увага зосереджена на методі оцінки стану автоматичних вимикачів високої напруги (їх дугових контактів) за допомогою вимірювання динамічного опору, як ключового індикатора працездатності автоматичного вимикача. Основною концепцією роботи є розробка сучасних високовольтних елегазових вимикачів, що включає в себе два паралельних набори контактів: головний і дуговий. У статті обговорюється, як електрична дуга починається та гаситься під час розмикання та замикання цих контактів. Підкреслюється, що під час роботи дугові контакти піддаються деградації матеріалу через високі температури, що призводить до зміни їх форми та стану. Це погіршення можна виміряти та проаналізувати за допомогою величини динамічного опору. У роботі розглядається специфіка вимірювання динамічного опору та його значення для оцінки стану дугогасильних контактів. Було представлено алгоритм, який використовується для аналізу величини динамічного опору, зосереджуючись на визначенні ключових точок у формі сигналу опору, які вказують на стан дугогасних контактів. Для підтвердження було наведено практичне дослідження, яке демонструє

застосування запропонованого методу для різних типів автоматичних вимикачів. Результати випробувань показали ефективність запропонованого методу.

У дослідженні [22] запропоновано використання нейронних мереж для моделювання гасіння електричної дуги у високовольтних автоматичних вимикачах напруги. У статті підкреслюється складність аналітичного моделювання гасіння електричної дуги у вимикачах високої напруги, що визначає потребу в застосуванні більш точних інструментів моделювання, які якнайкраще відображають реальні властивості вимикача. Автори пропонують використовувати для цієї мети нейронні мережі, враховуючи їх здатність моделювати нелінійні фізичні явища та забезпечувати математичне представлення на основі співвідношення між вхідними та вихідними функціями. У роботі була розроблена нова 3D-модель гасіння дуги на основі теплової моделі, що враховує теплове випромінювання від електричної дуги під час її запалювання та згасання. Вхідні та вихідні дані нейронної мережі визначались на основі значень часу та напруги дуги. У статті наводиться порівняльний огляд різних алгоритмів навчання з визначенням найкращого для здійснення прогнозування гасіння дуги в автоматичних вимикачах високої напруги.

У дослідженні [23] автори сфокусувалися на застосуванні нечіткої логіки нейронної мережі для діагностики несправностей у високовольтних вимикачах. У документі підкреслення важливість онлайн-діагностики несправностей високовольтних автоматичних вимикачів, зазначаючи, що традиційні методи важко діагностують несправності безпосередньо за оригінальними сигналами моніторингу. Автори пропонують метод об'єднання даних на рівні функцій із використанням нечіткої логіки нейронної мережі, який є досить ефективним у обробці невизначених знань і неоднозначних даних, тим самим підвищуючи точність діагностування несправностей. Нечітка нейронна мережа показала себе як ефективний інструмент для діагностики несправностей, здатний до

адаптивного навчання та відмовостійкості. У статті обговорюються вхідні та вихідні дані моделі, деталізується процес фазифікації та нормалізації. Були також проведені експерименти з метою перевірки моделі діагностики нечіткої нейронної мережі – результати продемонстрували ефективність моделі та її здатність точно визначати різноманітні несправності та стійкість вимикачів. Автори припускають, що розроблений метод може бути застосований до систем діагностики несправностей, що характеризуються значним ступенем інерції, затримки та нелінійності, та при складних взаємозв'язках між несправністю та її симптомами.

У дослідженні [24] розглянуто вплив роботи електричних автоматичних вимикачів на якість електричної енергії при наявності гармонійних коливань. Автори зазначають, що сучасне обладнання та окремі технологічні процеси дуже чутливі до відхилень якості електричної енергії. Основним напрямком дослідження було визначення впливу роботи електричного вимикача у режимі короткого замикання на якість електроенергії, спостереження за старінням матеріалу з часом, обчислення гармонійного спотворення та ступеня гармонійних збурень в електричній системі. Дослідження представило дані про зміну отриманої напруги та струму гармонійного спотворення протягом періоду досліджень, визначаючи аномалії в певних областях. Результати показують, що протягом перших кількох місяців поточне значення гармонійного спотворення коливається перед його стабілізацією. Подібним чином, гармонійного спотворення напруги демонструє незначне збільшення протягом шести місяців, що свідчить про те, що воно не впливає суттєво на якість електричної енергії чи на інші електричні компоненти. У статті зроблено висновок, що отримані значення гармонійного спотворення не впливають негативно на якість електроенергії, оскільки вони знаходяться в припустимих межах. Авторами пропонується розробка системи дистанційного попередження про збої в системі або дефекти в системі збору.

2 ОГЛЯД ПРИНЦИПІВ РОБОТИ ВИМИКАЧІВ З МЕТОЮ ПОЛІПШЕННЯ ЇХ РОБОТИ

2.1 Загальні принципи використання вимикачів у трифазних мережах

Автоматичні вимикачі є ключовими компонентами трифазних електричних мереж. Їх основна роль полягає в автоматичному перериванні потоку електричної енергії в електричних ланцюгах, коли вони виявляють несправності або перевантаження. Автоматичні вимикачі використовуються для з'єднання та розриву електричних ланцюгів за нормальних умов навантаження та для розриву ланцюгів за умов несправності. Регулярне технічне обслуговування автоматичних вимикачів дозволяє гарантувати, що вимикачі спрацюють в необхідний момент. Технічне обслуговування вимикача зазвичай містить різноманітні електричні випробування і тестування [25].

Трифазні електричні системи є основою сучасних промислових підприємств. Такі мережі забезпечують більшу ефективність передачі електроенергії та здатні витримувати високі навантаження. У таких системах вимикачі виконують подвійну функцію [26]:

- забезпечують захист шляхом виявлення будь-яких ненормальних умов (коротке замикання або перевантаження по струму). Це досягається за допомогою теплових або магнітних засобів сприйняття. Після виявлення цих аномалій вимикачі негайно переривають подачу струму, тим самим запобігаючи потенційному пошкодженню обладнання,

- полегшують технічне обслуговування та ремонт електричних мереж і електричного обладнання – вимикачі забезпечують безпечну ізоляцію окремих сегментів мережі. Ця здатність вимикачів має вирішальне значення у великомасштабних промислових середовищах і мережах, де будь-яке тривале відключення може призвести до значних збоїв у роботі.

За останні роки прогрес у технології вимикачів дозволив підвищити їх надійність та функціональність. Запровадження інновацій не тільки збільшують термін служби та ефективність цих пристроїв, але й підвищують загальну безпеку та надійність трифазних електричних мереж. Здатність вимикачів швидко виявляти та припиняти розвиток несправностей має важливе значення для захисту електричного обладнання та забезпечення безпеки мереж.

Надійність означає ймовірність того, що пристрій буде виконувати свою призначену функцію без збоїв протягом визначеного періоду за встановлених умов. Для вимикачів це означає здатність послідовно і точно виявляти та переривати струми пошкодження, забезпечуючи захист електричної системи та підключеного обладнання. Надійність цих пристроїв є не тільки показником ефективності їх роботи, але і вирішальним фактором у підтримці безпеки та цілісності електричних мереж.

Визначення надійності вимикачів охоплює кілька напрямів [27]:

- експлуатаційна надійність, яка стосується здатності вимикача правильно функціонувати кожного разу, коли він спрацьовує. Надійний автоматичний вимикач повинен надійно переривати потік струму в умовах його перевищення понад встановлений рівень або короткого замикання,

- довговічність – фізична витривалість, що забезпечується надійністю роботи окремих компонентів всередині вимикача (контакти, пружні елементи, приводи та інше), які повинні витримувати механічні та термічні навантаження, пов'язані з перериванням потужних потоків струму протягом усього терміну служби вимикача,

- стійкість при роботі у різних умовах навколишнього середовища – вимикачі повинні надійними за різних умов зміни стану навколишнього середовища – коливання температури, підвищення вологості, наявність пилу та абразивних часток та іншого, що можуть потенційно вплинути на їх роботу,

- здатність до скоординованої роботи у системах з кількома вимикачами – надійність забезпечення здатності вимикача координувати роботу кількох вимикачів у мережі, що гарантує спрацьовування лише відповідних вимикачів, мінімізуючи кількість збоїв системи,

- передбачуваність – надійні в роботі вимикачі повинні мати передбачувану реакцію на різні стани системи – це може бути забезпечено встановленням та дотриманням характеристик відключення (так званих кривих відключення), які повинні бути послідовними та повторюваними, що дозволить точно проектувати енергетичні системи та визначати наявність несправностей,

- простота обслуговування – надійність може бути підвищена легкістю обслуговування та перевірки для їх надійної роботи протягом усього терміну їх служби.

Надійність вимикачів можна оцінити кількісно за допомогою таких показників, як середній час напрацювання на відмову і частота відмов. Виробники та спеціальні обслуговуючі організації здійснюють ретельне тестування вимикачів щодо їх відповідності визначеним критеріям надійності. Зазначені випробування містять випробування на механічну міцність, підвищення температури, випробування опору діелектриків та здатність до переривання коротких замикань. Надійність вимикачів, таким чином, охоплює ефективність їх роботи, довговічність, стійкість до зміни параметрів навколишнього середовища, координацію з іншими вимикачами, передбачуваність роботи та простоту обслуговування [27].

У трифазних електричних системах силові вимикачі відіграють ключову роль у забезпеченні безпеки та безперервності їх роботи. Однак, як і всі електромеханічні пристрої, вони є досить чутливими до різноманітних проблем з надійністю. Серед найпоширеніших проблем з надійністю силових вимикачів в трифазних системах можна виділити [27]:

- механічне зношення – з часом механічні компоненти вимикачів (пружинні елементи, підшипники, важелі, силові ланки та інше) можуть

зношуватися. Такі порушення може призвести до неможливості відключення у разі виникнення потреби або, навпаки, викликати ненавмисне спрацювання. У трифазних мережах механічні несправності в одній з фаз може призвести до небалансу та додаткового навантаження на систему,

- контактна ерозія – контакти у вимикачах працюють в екстремальних умовах під час розриву потужних струмів, що призводить до їх ерозії. Зазначене порушення може впливати на здатність контакту переносити нормальний струм навантаження і потенційно призводити до його перегріву та виходу з ладу,

- несправності, викликані електричними дугами – дугові замикання можуть виникнути в разі розрив у контактах під час розмикання та замикання, що може призвести до утворення електричної дуги, яка може пошкодити контакти вимикача та оточуючу ізоляцію, знижуючи надійність роботи вимикача в майбутньому,

- діелектричні пробої – ізоляційні матеріали всередині вимикачів можуть з часом втратити свої властивості через високі термічні та електричні навантаження. Ці погіршення можуть призвести до діелектричного пробою, що порушує здатність вимикача ефективно спрацювати у разі виникнення несправності,

- несправність механізму відключення – даний механізм, який відповідає за активацію вимикача в умовах несправності, може проявити ненадійність через наявність механічних та/або електричних несправностей,

- фізичне та моральне старіння – з часом окремі компоненти вимикачів можуть фізично та морально старіти, викликаючи необхідність проведення частішого технічного обслуговування та ремонту. Такі вимикачі можуть працювати не досить ефективно, як нові, що призводить до проблем з надійністю роботи електричних систем,

- використання невідповідного типорозміру вимикача або порушення умов експлуатації – коли вимикач обрано у невідповідності до параметрів

мережі або порушується частота технічного обслуговування – може призвести до порушення режимів відключення або неспрацювання,

– наявність електромагнітних перешкод – вимикачі можуть бути досить чутливими до наявності електромагнітних перешкод від роботи іншого електричного обладнання. Зазначене може спричинити помилкове відключення або неналежний ступінь відключення, особливо у мережах, де присутні гармоніки та інші перехідні явища.

Вирішення зазначених проблем надійності вимагає комплексного підходу, який повинен включати регулярне технічне обслуговування, якісну установку та координацію роботи, своєчасну заміну та контроль спрацювання.

2.2 Огляд типів вимикачів та принципів визначення їх надійності

У трифазних електричних системах використовуються різні типи вимикачів, здатних забезпечити визначені нормативи безпеки та ефективності роботи мережі. Вимикачі здатні здійснювати управління та захист електричних ланцюгів і можуть бути класифіковані за принципом робочого середовища (повітря, вакуум, елегаз, олива) [28].

Повітряні вимикачі використовують повітря у якості розриваючого середовища. При виявленні несправності контакти всередині вимикача розмикаються, і між ними утворюється дуга, яка згасає в повітрі. Такі вимикачі в основному використовуються в системах низької напруги та відомі простотою їх обслуговування. Серед переваг таких вимикачів можна відзначити їх нетоксичність та мінімальні вимоги до обслуговування. Однак їх перериваюча здатність є значно нижчою, ніж у інших типах, що робить їх менш придатними для систем з високою напругою живлення (рис. 2.1) [28].

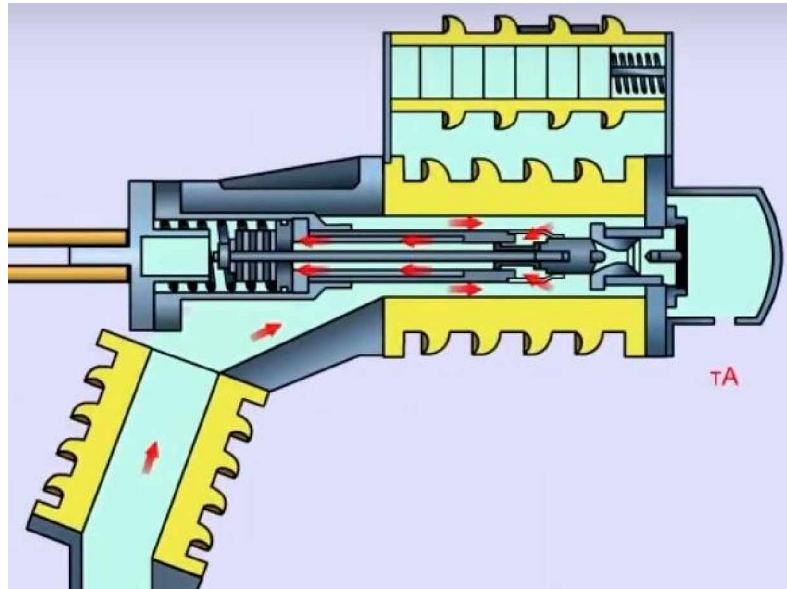


Рисунок 2.1 – Частина внутрішнього устрою повітряного вимикача

Вакуумні вимикачі у якості середовище для гасіння дуги використовують вакуум – перериваючі контакти поміщені у простір, у якому міститься вакуум, що дозволяє ефективно гасити електричну дугу. Ці вимикачі відомі своєю високою пропускну здатністю та тривалим терміном служби. Вони в основному використовуються в системах середньої напруги і досить поширені в промислових енергосистемах. Ключовими перевагами вакуумних вимикачів є необхідність мінімального обслуговування, швидка робота та відсутність ризику пожеж та/або вибухів. Їх недолік – виска вартість (рис. 2.2) [29].

Елегазові вимикачі використовують спеціальний газ – гексафторид сірки – у якості середовища для ефективного гасіння електричної дуги. Цей газ має відмінні діелектричні властивості, що дозволяє цим вимикачам ефективно гасити електричні дуги в системах високої напруги. Такі вимикачі відомі своєю надійністю, довговічністю та чудовою ефективністю розривання ланцюгів. Перевагами элегазових вимикачів є компактна конструкція та високий рівень ефективності відключення потужних струмів. Недолік полягає у тому, що элегаз є парниковим газом з вимогами відповідного поводження (рис. 2.3) [9].

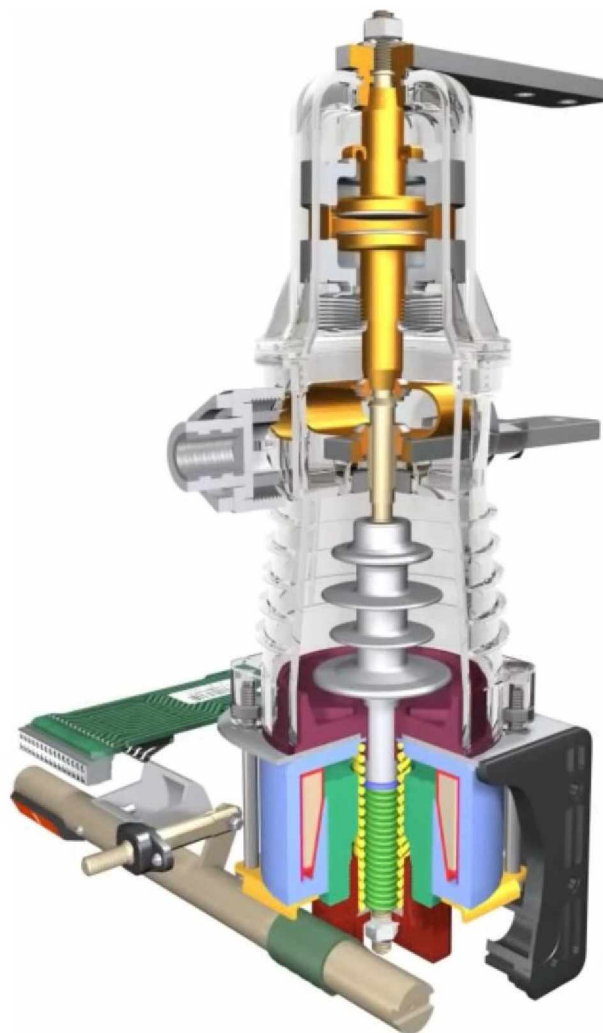


Рисунок 2.2 – Внутрішній устрій вакуумного вимикача

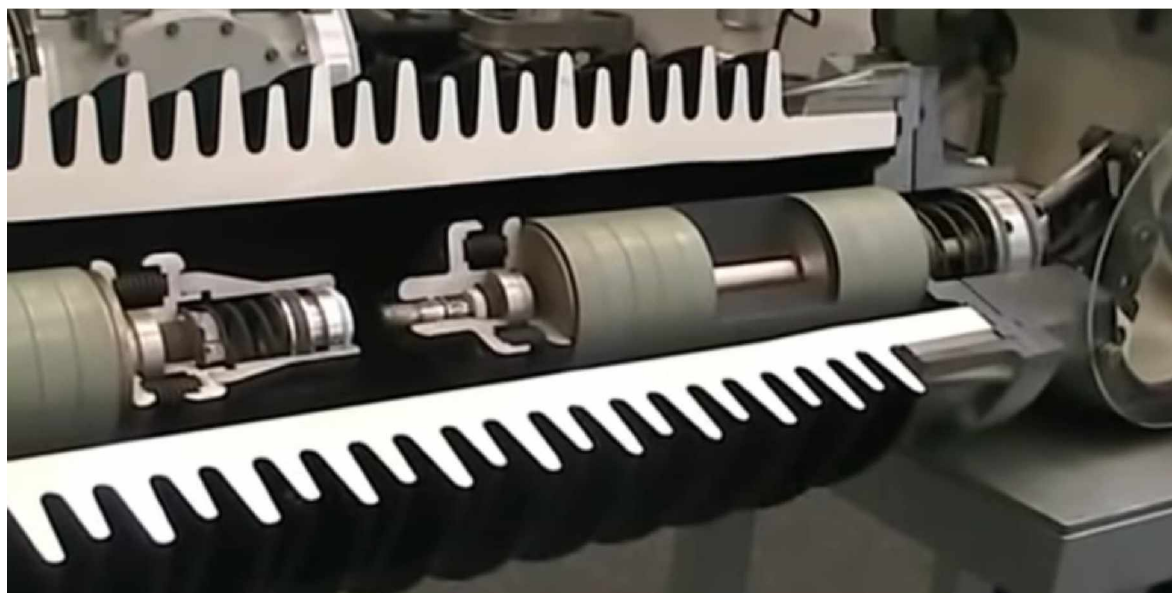


Рисунок 2.3 – Внутрішній устрій елегазового вимикача

Масляні вимикачі заповнені оливою (зазвичай одним з різновидів мінерального масла), у якій і відбувається гасіння дуги з супутнім утворенням і відведенням продуктів горіння. Контакти перериваючих елементів занурені в масло, яке охолоджує і гасить дугу при їх розмиканні. Масляні вимикачі є «найстаршими» серед усіх вимикачів і використовуються в мережах середньої і високої напруги. Серед переваг таких вимикачів можна відзначити їх здатність витримувати високі струми та термічна стабільність роботи. Однак вони потребують регулярного технічного обслуговування й існує ризик виникнення пожежі та витоків масла (рис. 2.4) [9].

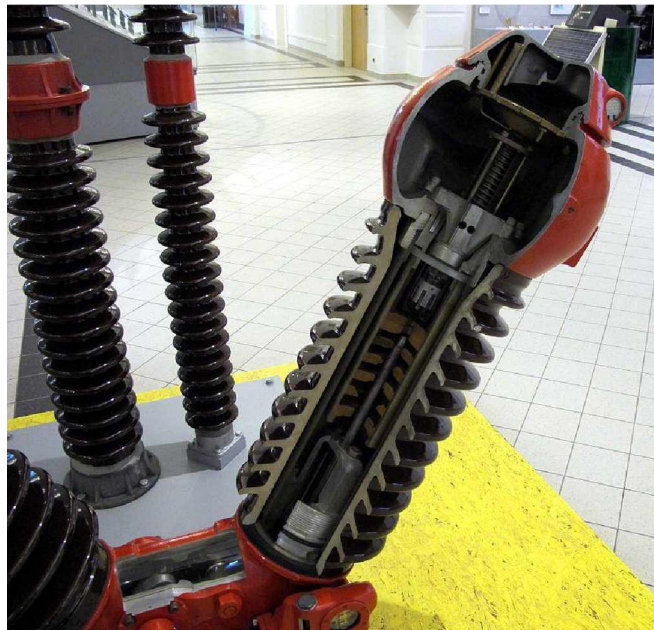


Рисунок 2.4 – Внутрішній устрій масляного вимикача

Маломасляні вимикачі сконструйовані завдяки прогресу технологій масляних вимикачів, для нівелювання їх недоліків. Маломасляні вимикачі містять меншу кількість масла у порівнянні з традиційними масляними вимикачами. Масло у цих вимикачах виконує дві основні функції: воно діє як середовище для гасіння дуги та забезпечує ізоляцію між контактами та іншими частинами вимикача. У даних вимикачах зменшення об'єму масла досягається завдяки використанню спеціального виду діелектричного

масла, що мінімізує ризик загоряння масла та зменшує необхідність у частому технічному обслуговуванні. Пристрій керування електричною дугою зазвичай містить декілька розгалужувачів/ребер, які розділяють та подовжують шлях електричної дуги в маслі. Збільшення довжини дуги в поєднанні з охолоджуючим ефектом масла призводить до ефективного гасіння електричної дуги. Перевагами цих вимикачів є зменшення ризику виникнення пожеж, знижені вимоги до технічного обслуговування, компактна конструкція. Недоліком таких вимикачів є складність механізму контролю дуги та здорожчання конструкції при виробництві та обслуговуванні (рис. 2.6) [9].

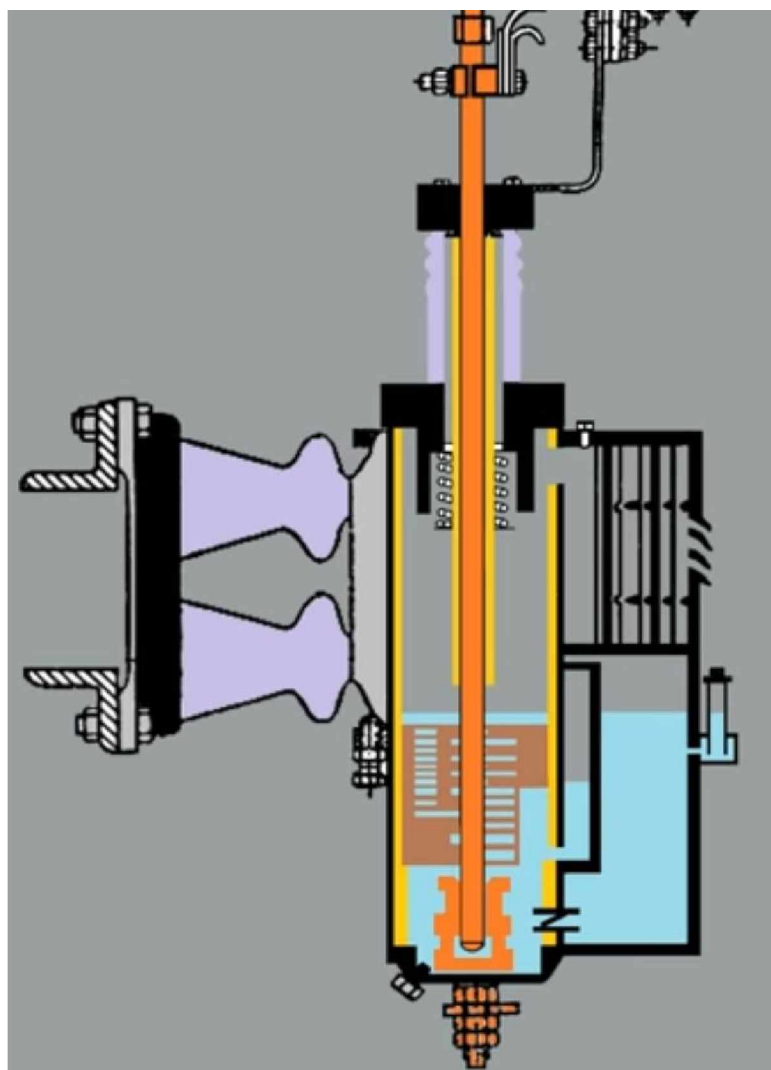


Рисунок 2.6 – Внутрішній устрій маломасляного вимикача

Електромагнітні автоматичні вимикачі побудовано на електромагнітних принципах виявлення та відключення струмів пошкодження. У цих вимикачах сила магнітного поля, що створюється електромагнітом, пропорційна силі струму, що протікає в колі котушки – при нормальних умовах роботи магнітне поле є недостатнім для того, щоб привести в дію механізм вимикача. Дані вимикачі є достатньо компактними та надійними та здатними реагувати на виклики. Простота їх конструкції визначає менші вимоги по обслуговуванню та більш тривалий термін служби. Після спрацювання контактів всередині електромагнітного вимикача утворюється електрична дуга, яка завдяки конструкції вимикача призводить до її швидкого гасіння з використанням повітря, вакууму чи інших засобів, залежно від конкретного застосування та номінальної напруги. Переваги цих вимикачів – швидка реакція, простота та надійність, можливість регулювання параметрів спрацювання. Недоліками є неможливість забезпечення належного захисту від надструмів низької напруги, що не можуть створити достатньо сильного магнітного поля для відключення; неможливість роботи в середовищах із сильними електромагнітними полями, що може призвести до хибних відключень або уповільнення реакції спрацювання (рис. 2.7) [9].

Кожен тип вимикача має відмінні особливості, які роблять його придатним для певних застосувань у електричних системах. Вибір того чи іншого типу вимикача залежить від різних факторів: рівень напруги, номінальний струм та перериваюча здатність. Повітряні та вакуумні вимикачі зазвичай використовуються в системах середньої напруги завдяки їх властивостям та вимогам по технічному обслуговуванню, тоді як елегазові та масляні вимикачі є кращими до застосування в системах високої напруги через їх чудові можливості по відключенню. Усі наведені типи вимикачів відіграють провідну роль в управлінні та захисті в трифазних електричних систем.

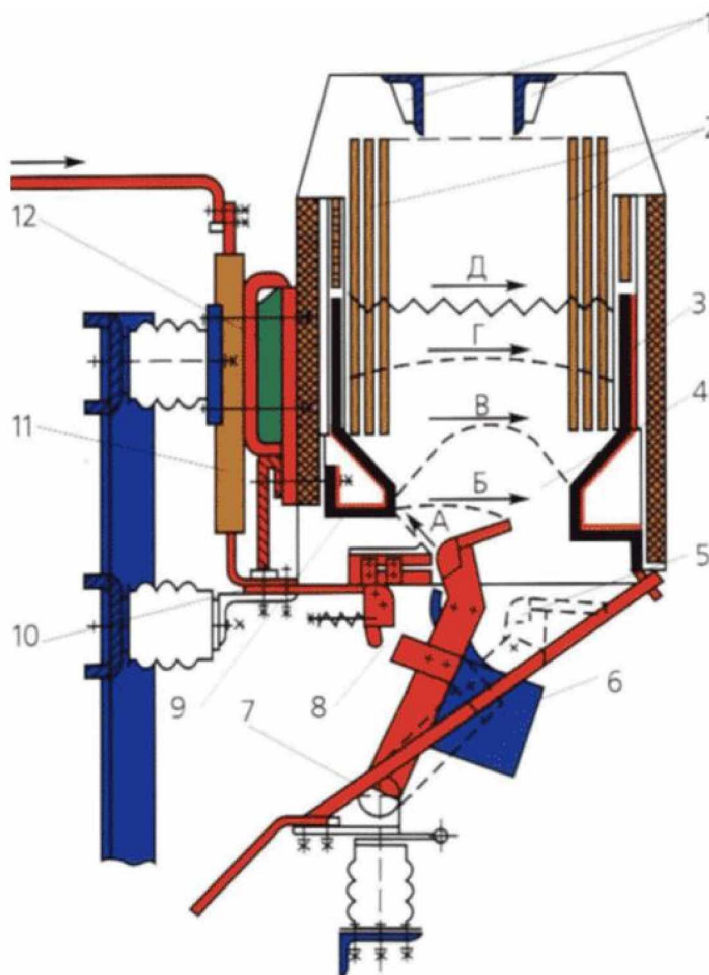


Рисунок 2.7 – Внутрішній устрій електромагнітного вимикача

Надійність автоматичних вимикачів має ключове значення для забезпечення стабільності та безпеки роботи електричних систем. Однак поточне технологічне та робоче середовище створює певні проблем, які можуть знижувати надійність цих елементів.

Серед основних проблем забезпечення надійності вимикачів в електричних мережах можна відзначити [27]:

- застарілу інфраструктуру – переважна більшість електричних систем працюють із застарілою інфраструктурою і велика кількість вимикачів перевищили нормований термін служби. Такі вимикачі більш схильні до виходу з ладу через зношення механічних компонентів і погіршення якості ізоляційних матеріалів. Вирішення даної проблеми полягає у пошуку балансу між потребою в модернізації, вартістю та

логістичними складнощами, пов'язаними із заміною «старих» вимикачів, особливо у великих та розгалужених мережах,

- підвищені електричні навантаження, що пояснюється значним зростанням енергоозброєності підприємств, створюючи додаткове навантаження на вимикачі. Більшість існуючих систем були розроблені під інші умови навантаження, що призводить до частих невиправданих відключень та виникнення потенційних несправностей вимикачів та викликає необхідності впровадження адаптаційних заходів,

- мінливість умов навколишнього середовища – у деяких галузях промисловості вимикачі піддаються впливу суворих умов навколишнього середовища – екстремальні перепади температур, вологість, пил та корозійні властивості атмосфери. Зазначені умови можуть прискорити зношення важливих компонентів вимикачів, погіршуючи їх функціональність і надійність. Це вимагає здійснення розробки та конструювання вимикачів, здатних працювати у таких середовищах, з одночасним збереженням ефективності роботи,

- складність топологій електричних мереж – сучасні електричні мережі стають все більш складними, містять різноманітні джерела генерації та різноманітні типи споживачів. Зазначена складність може створювати проблеми по координації роботи вимикачів, особливо з точки зору вибіркового відключення та ізоляції несправностей певних сегментів електричної мережі. Підтримка надійності роботи вимикачів у таких складних умовах вимагає впровадження передових стратегій по координації роботи окремих елементів та необхідності здійснення постійного моніторингу,

- складність своєчасності здійснення технічного обслуговування та перевірок – регулярність проведення технічного обслуговування та планових перевірок обов'язкові для забезпечення надійної роботи вимикачів. У розгалужених електричних мережах проведення ретельних і своєчасних перевірок може бути досить складним завданням через

обмеженість наявних у підприємства ресурсів. Запровадження ефективних стратегій технічного обслуговування, які можна ефективно виконувати без порушення роботи системи, є одним з головних завдань забезпечення надійної роботи вимикачів,

– необхідність забезпечення вимог стандартів і норм – вимикачі повинні відповідати різноманітним національним і міжнародним стандартам і нормам. Ця відповідність повинна постійно переглядатися, змінюватися з одночасним вирішенням поточних проблем і досягненням балансу між необхідністю виконання цих правил та експлуатаційними і економічними міркуваннями.

Отже, виклики забезпечення надійності роботи вимикачів в електричних системах є досить вибагливими та різноорієнтованими, що пояснюється охопленням проблем, пов'язаних зі старінням інфраструктури, збільшенням електричних навантажень, зміною стану навколишнього середовища, умовами здійснення технологічних процесів, складністю та розгалуженістю мереж, необхідністю постійного обслуговування та дотриманням нормативних вимог. Вирішення цих проблем вимагає складного підходу, що може включати технологічні рішення, стратегічне планування та активне управління.

2.3 Технології удосконалення конструкцій вимикачів

У контексті підвищення надійності, ефективності та безпеки роботи вимикачів ключову роль може відігравати технологічний прогрес. Серед таких технологічних удосконалень, що інтегруються в конструкцію та підвищують функціональність вимикачів можна виділити [27]:

– розробка заходів з покращення та удосконалення процесу гасіння електричної дуги – це може значно покращити відключаючу здатність

вимикачів. Цього можна досягти шляхом розробки спеціальних вакуумних переривачів та шляхом використання певних типів газів та газових сумішей, що дозволяють швидше та ефективніше гасити електричну дугу та зменшити навантаження на розмикаючу систему вимикача (рис. 2.8) [30],

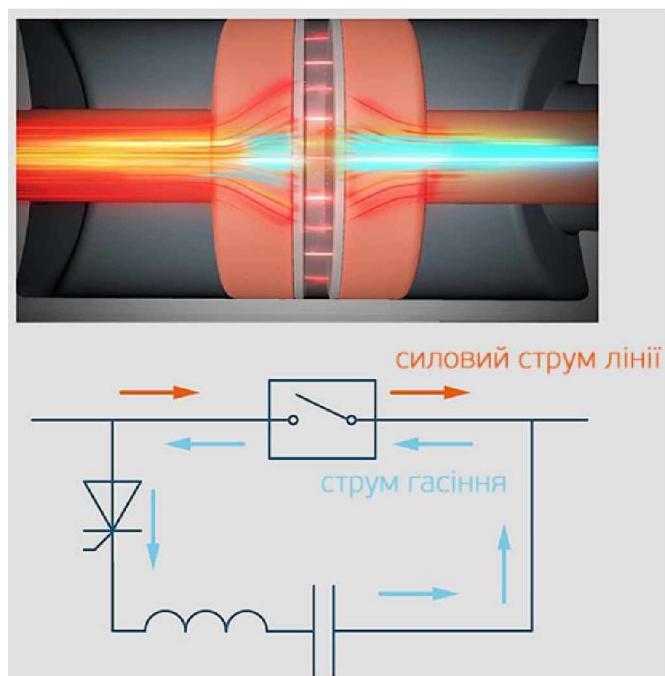


Рисунок 2.8 – Інноваційне рішення компанії «Плутон» для розподілення постійного струму у бездуговому вимикачі АФВ надшвидкої дії [30]

– використання відповідних до умов роботи матеріалів та удосконалення конструкції – зазначене реалізується шляхом використання поліпшених ізоляційних матеріалів і надміцних механічних компонентів, що істотно позначається на довговічності і терміні служби вимикачів. Сучасні вимикачі розробляють з використанням композитних матеріалів, які забезпечують чудові термічні та механічні властивості, зменшують ймовірність виходу вимикачів з ладу в екстремальних умовах роботи (рис.2.9) [31],

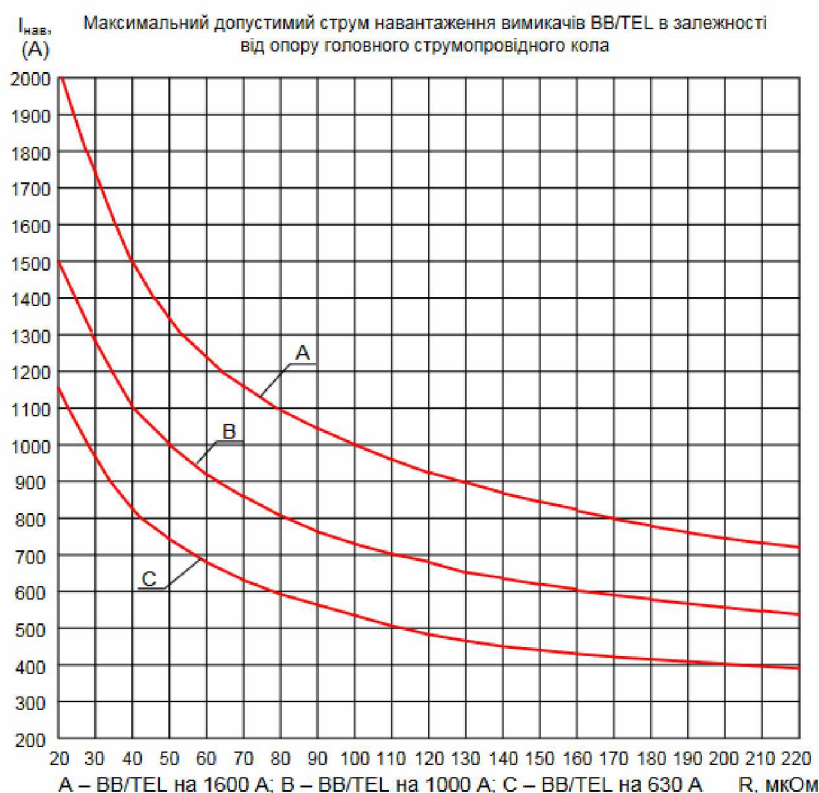


Рисунок 2.9 – Зміна перехідного опору головних контактів вимикачів серії ВВ/TEL [31]

– впровадження принципів керування та захисту з використанням мікропроцесорної техніки – інтеграція мікропроцесорних систем керування до вимикачів визначило значний стрибок їх функціональності. Розроблені і впроваджені системи дали змогу забезпечити точний контроль над роботою вимикача, дозволяючи здійснювати налаштування параметрів відключення та моніторинг стану в реальному часі та впровадити розширені алгоритми захисту. Це не тільки покращило точність виявлення несправностей, але й дозволило налаштовувати вимикачі відповідно до вимог їх конкретного застосування (рис. 2.10) [31],

– покращення параметрів енергетичної ефективності – знижене споживання енергії в режимах очікування, нормальної та аварійної роботи разом з оптимізацією процесу переривання струмів сприяють зниженню загального споживання енергії в електричних системах,

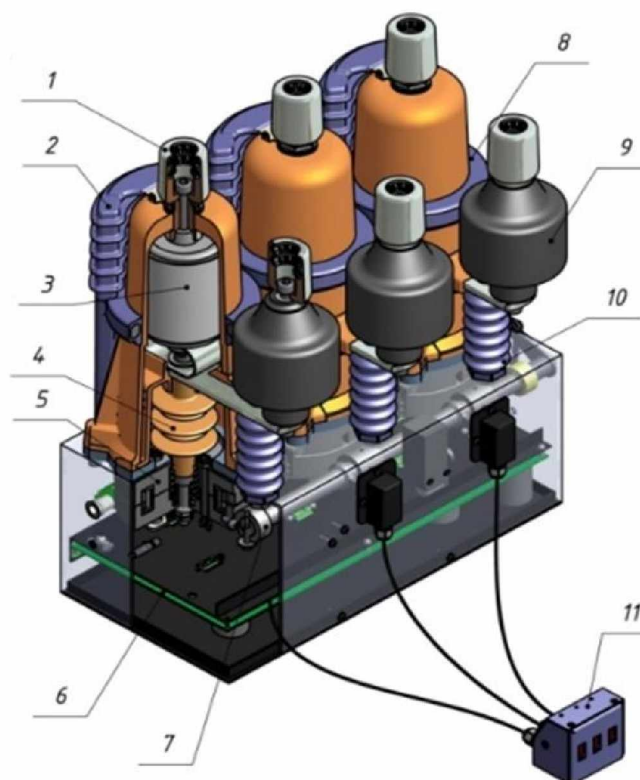


Рисунок 2.10 – Керований вакуумний вимикач [31]

– впровадження цифрової діагностики та моніторингу стає можливим завдяки інтеграції цифрових діагностичних засобів у вимикачі, що дозволяє постійно контролювати їх справність і робочі параметри. Це означає можливість відстеження зношення механічних компонентів, моніторинг електричних параметрів та виявлення аномальних станів. Така діагностика допомагає вчасно проводити технічне обслуговування та знижує ризик несподіваних виходів з ладу вимикача (рис. 2.11) [31],

– застосування модульності та компактності – при конструюванні вимикачів необхідно прагнути досягнення найкращого параметру компактності з одночасним використанням взаємозамінних модулів, що полегшує експлуатацію та ремонт вимикачів, дозволяє краще налаштовувати та масштабувати електричні системи для задоволення різноманітних вимог попиту.

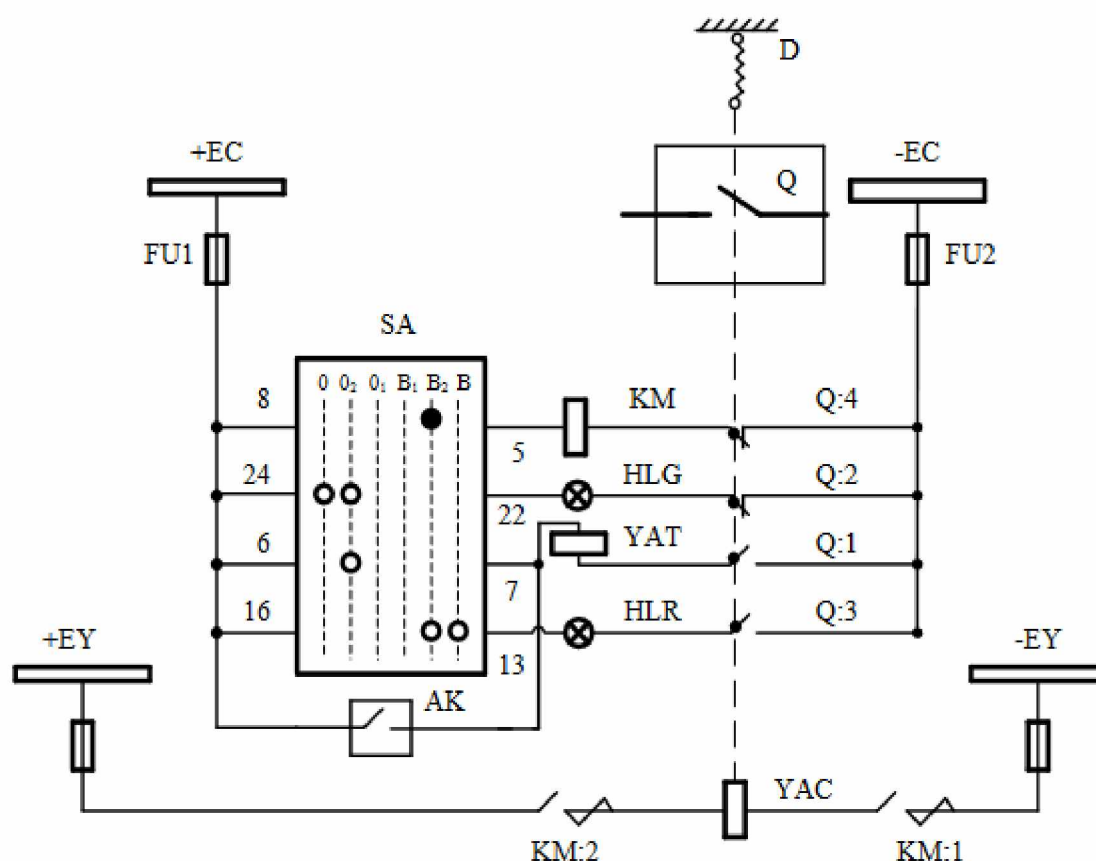


Рисунок 2.11 – Принципова спрощена схема дистанційного керування вимикачем з електромагнітним приводом [31]

Отже, технології удосконалення конструкцій вимикачів повинні охоплювати широкий спектр можливостей – починаючи від передових методів гасіння дуги, використання провідних матеріалів і закінчуючи інтеграцією розумних технологій і впровадженні цифрової діагностики. Ці заходи здатні не лише підвищити продуктивність і надійність роботи вимикачів, але й сприяють створенню більш безпечних, ефективних і стійких електричних систем.

2.4 Застосування різноманітних стратегії технічного обслуговування вимикачів

Технічне обслуговування вимикачів має вирішальне значення для забезпечення надійності та безпеки їх роботи у електричних системах. При цьому існують та можуть бути використані різні стратегії цього технічного обслуговування, що можуть у різний спосіб забезпечити збереження цілісності та функціональності вимикачів:

1. Профілактичне технічне обслуговування, що передбачає здійснення регулярних перевірок та обслуговування вимикачів для запобігання виникненню можливих несправностей до безпосереднього моменту їх виникнення. Ця стратегія передбачає складання плану технічного обслуговування, який містить графік регулярності перевірок, очищення, змащування механічних частин і випробування електричних компонентів. Частота та об'єм робіт з профілактичного обслуговування залежать від типу автоматичного вимикача, режиму його використання, умов навколишнього середовища та рекомендацій виробника. Такий підхід допомагає визначати стан вимикача з огляду на його зношення, зменшити ризики несподіваних виходів з ладу та подовжити їх термін служби (рис. 2.12) [32].

2. Прогнозне технічне обслуговування базується на використанні передових діагностичних засобів та методів моніторингу стану вимикачів у режимі реального часу. Такий підхід передбачає збирання і аналіз даних від датчиків та систем моніторингу, що дозволяє передбачати потенційні збої до моменту їх виникнення. Для виявлення неприпустимих значень окремих параметрів використовуються різноманітні діагностичні методи: тепловізійний, вібраційний, розрядний та інші. Прогнозне обслуговування дозволяє своєчасно втручатися в роботу вимикачів, зменшуючи тим самим час простою та витрати на технічне обслуговування (рис. 2.13) [32].

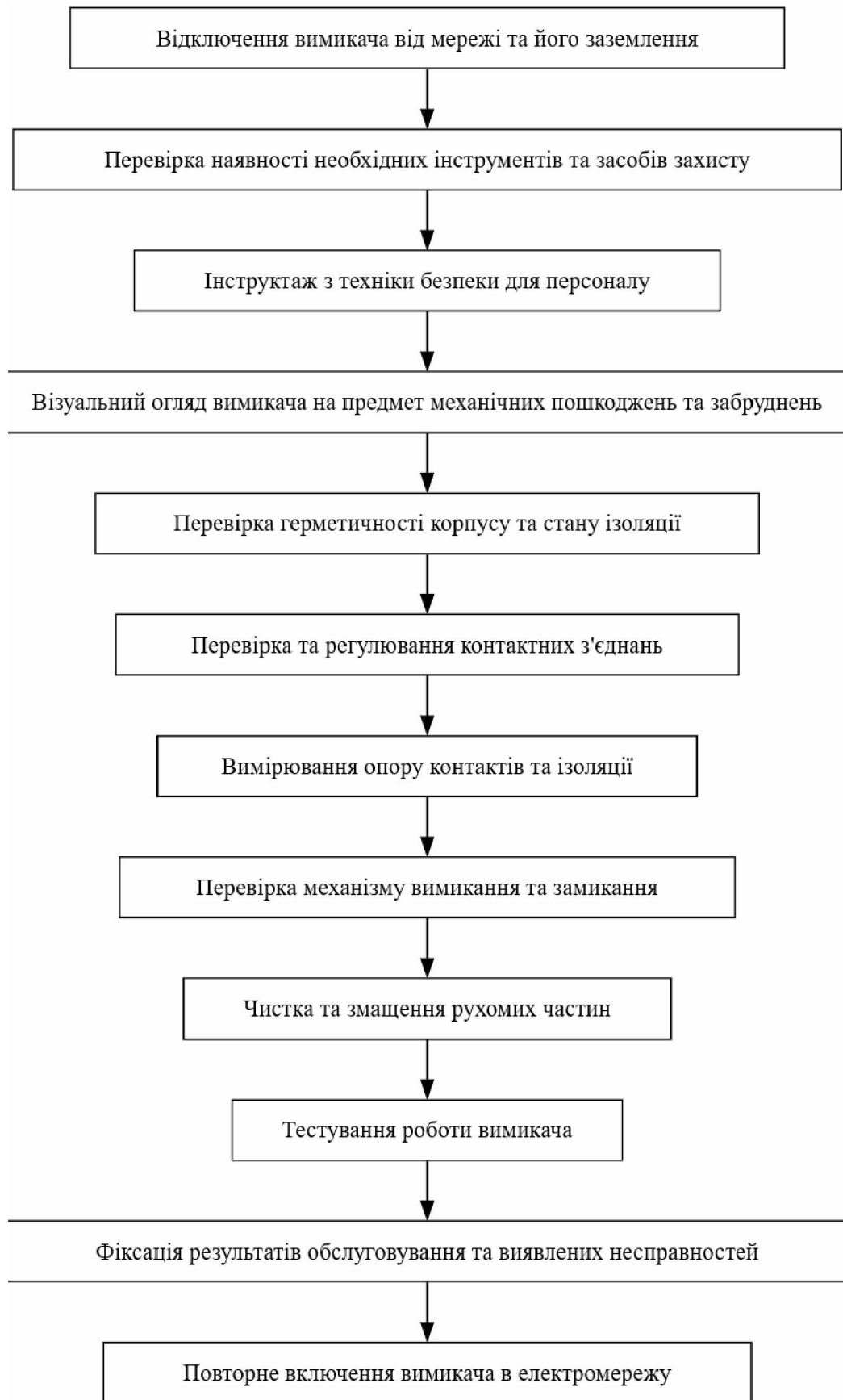


Рисунок 2.12 – Послідовність профілактичного технічного обслуговування силового вимикача



Рисунок 2.13 – Послідовність прогностного технічного обслуговування силового вимикача

3. Технічне обслуговування за поточним станом – дана стратегія передбачає здійснення моніторингу фактичного стану вимикачів і здійснення технічного обслуговування лише у випадках, коли визначені індикатори демонструють ознаки зниження продуктивності або прогнозується загроза виникнення несправності. Застосовність даного методу значною мірою залежить від постійності здійснення моніторингу ключових параметрів роботи вимикача: знос контактів, кількість

спрацювань, час відключення та інше. Зазначене дозволяє зробити технічне обслуговування більш цілеспрямованим та ефективним, оскільки воно виконується лише в разі необхідності у залежності від стану обладнання (рис. 2.14) [32].

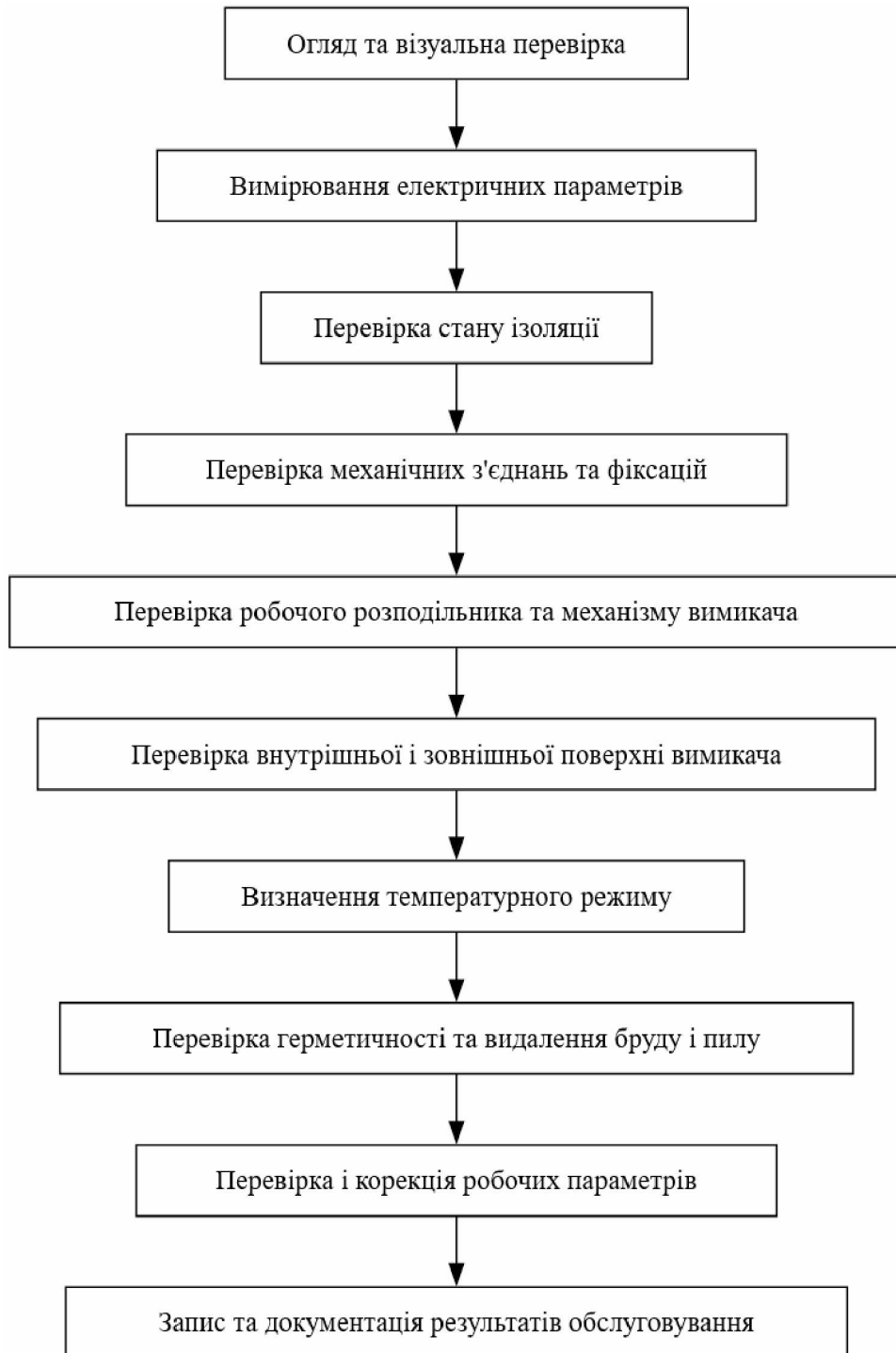


Рисунок 2.14 – Послідовність технічне обслуговування силового вимикача за поточним станом

4. Корируюче технічне обслуговування проводять лише після того, як у вимикачі виникла несправність або збій, і передбачає здійснення відновлюваного ремонту, що полягає у заміні несправних компонентів для відновлення належного функціонального стану вимикача. Такий підхід не є досить розповсюдженим, адже може призвести до незапланованих та тривалих простоїв. Даний підхід може бути виправданий лише для подолання неочікуваних проблем, які не були виявлені або не могли бути передбачені за допомогою інших способів (рис. 2.15) [32].

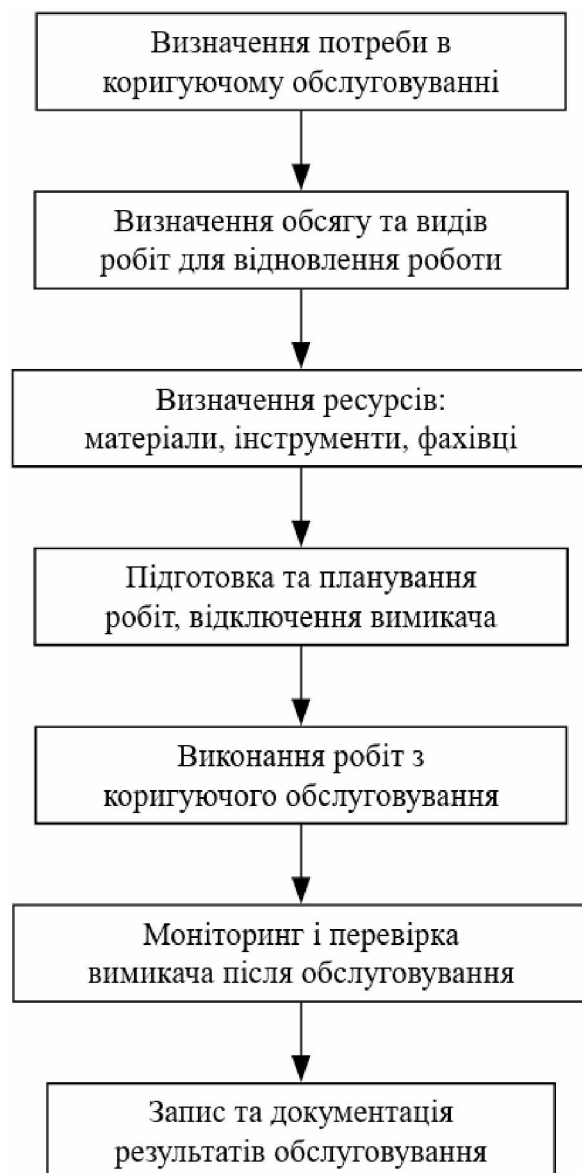


Рисунок 2.15 – Послідовність коригуючого технічного обслуговування силового вимикача

5. Технічне обслуговування, орієнтоване на забезпечення надійності, – цей підхід поєднує в собі стратегії профілактичного, прогнозного та технічного обслуговування на основі умов роботи обладнання. Його реалізація зосереджена на підтримці визначених параметрів надійності вимикачів шляхом виявлення та вирішення найбільш критичних проблем і потреб у технічному обслуговуванні. Даний підхід вимагає глибокого розуміння режимів відмов вимикачів і впливу цих відмов на загальну електричну систему. Ця форма технічного обслуговування вимагає визначення пріоритетності технічного обслуговування на основі шкоди від настання ризиків та наслідків відмов, тим самим забезпечуючи оптимальний розподіл ресурсів за умовою забезпечення надійності роботи обладнання та системи живлення [32].

6. Віддалений моніторинг з можливістю здійснення технічного обслуговування – розвиток цифрових технологій дозволив поступово переходити до здійснення дистанційного моніторингу та обслуговування окремих частин вимикачів. Це передбачає використання пристроїв контролю за умови їх підключення до загальної мережі та використанні програмних засобів, що дозволяє здійснювати віддалений моніторинг роботи вимикачів зі зміною поточних параметрів їх роботи. Віддалений моніторинг дозволяє своєчасно виявляти проблеми, зменшує потребу в здійсненні перевірок на місцях та підвищує здатність швидкого реагування на потенційні та наявні проблеми в роботі цих пристроїв. Додатковою вимогою застосування цього методу може бути забезпечення додаткового навчання обслуговуючого персоналу з найновішими методами та технологіями обслуговування. Регулярне навчання та обмін знаннями є важливою умовою створення груп технічного обслуговування, які мають знання в змісті останніх технологій та найкращих практик технічного обслуговування вимикачів [32].

Впровадження тієї чи іншої стратегії технічного обслуговування вимикачів є досить важливим вибором та передбачає знання про ступінь

необхідного прогнозного визначення стану. Визначення певної стратегії або поєднання кількох стратегій залежить від конкретних вимог і принципів функціонування електричних систем. Здійснення ефективного та своєчасного технічного обслуговування забезпечує високий ступінь надійності, безпеки та довговічності роботи вимикачів, що зрештою сприяє стабільній та ефективній роботі всієї електричної мережі.

Серед майбутніх тенденцій та напрямків досліджень у сфері силових вимикачів, що обіцяють підвищити ефективність і надійність роботи електричних систем і дозволять подолати нові виклики і технологічні вимоги можна відзначити:

- інтеграція штучного інтелекту та машинного навчання у засоби моніторингу і керування вимикачами, які зможуть аналізувати значні обсяги даних роботи з метою передбачення збоїв і автоматизації процесу прийняття рішень,

- впровадження досягнень в матеріалознавстві – розробка нових матеріалів з покращеними електричними, тепловими та механічними властивостями, що дозволить їм працювати навіть у екстремальних умовах,

- розробка енергозберігаючих та автономних вимикачів – дані пристрої потенційно можуть зберігати енергію, необхідну для їх роботи, збираючи її з навколишнього середовища,

- покращення методів виявлення несправностей з одночасним підвищенням швидкості та точності цього процесу з супутнім зменшенням впливу збоїв на електричну мережу,

- удосконалення технологій ідентифікації та методів гасіння електричної дуги з метою забезпечення швидшого та надійнішого переривання струмів,

- ширше впровадження модульних конструкцій у відповідь на мінливі вимоги до зміни навантаження і забезпечення гнучкості.

Отже, майбутнє технологій силових вимикачів і безпеки електричних систем можна забезпечити шляхом впровадження різноманітних інноваційних тенденцій та напрямків досліджень. Серед них можна відзначити: інтеграцію штучного інтелекту та машинного навчання, досягнень у матеріалознавстві, розробка пристроїв для збору енергії та автономного живлення, застосування удосконалених методів виявлення несправностей, модульність та екологічна стійкість.

3 РОЗРАХУНОК І ВИБІР СИЛОВИХ ВИМИКАЧІВ

3.1 Характеристика підстанції та навантажень

Схема електричної мережі, для якої буде здійснено розрахунок і вибір силових вимикачів та апаратів захисту наведена на рис. 3.1.

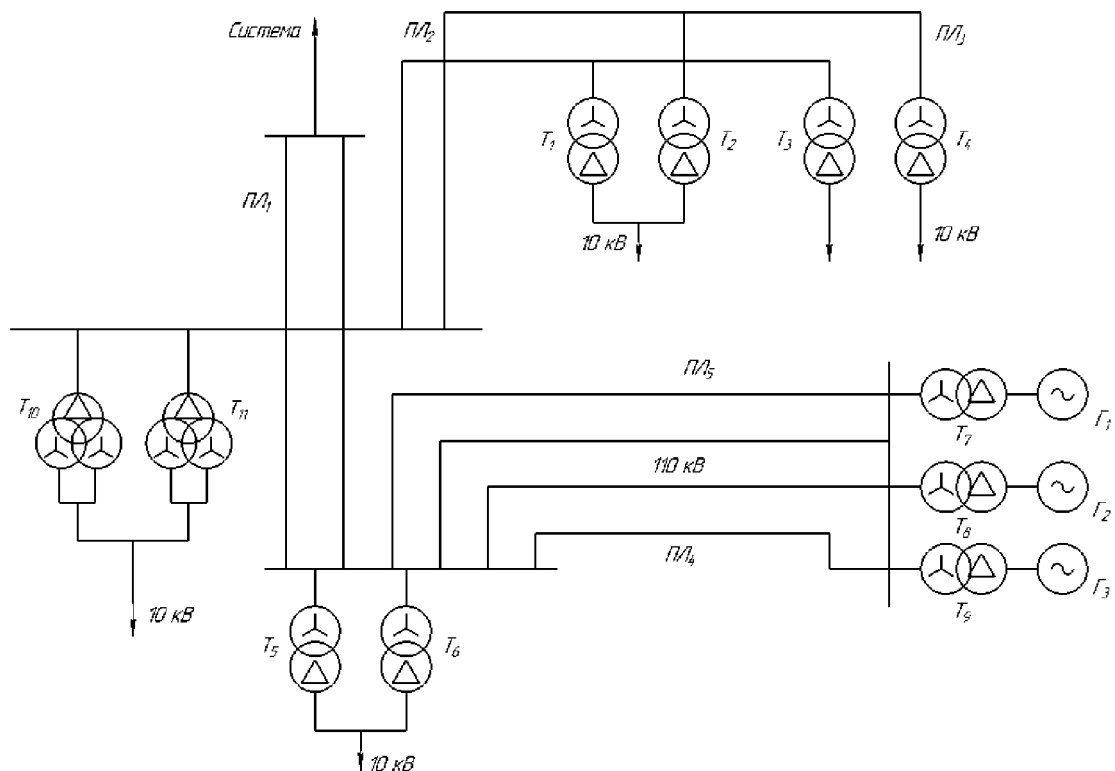


Рисунок 3.1 – Схема електричної мережі

Параметри електричних агрегатів і повітряних ліній електричної мережі наведено у табл. 3.1, 3.2.

Таблиця 3.1 – Параметри електричних агрегатів електричної мережі

Потужність КЗ мережі, $S_{кз}$, МВА	Генератори, МВт		Трансформатори, МВА			
	$Г1, Г2$	$Г3$	$Т1, Т2$	$Т3, Т4$	$Т5 - Т8$	$Т9$
3200	30	92	25	16	40	63

Таблиця 3.2 – Параметри повітряних ліній електричної мережі

Лінія	ПЛ1	ПЛ2	ПЛ3	ПЛ4	ПЛ5
Довжина лінії, км	10	12	16	15	20
Питомий опір лінії, $X_{\text{пит.}}, \text{Ом/км}$	0,40	0,39	0,41	0,38	0,41

Підстанція, що розглядається, за способом приєднання до енергосистеми має характеристики вузлової, за призначенням підстанція має ознаки мережевої, а за напрямком потоку потужності – знижувальною.

Максимальне значення споживаної активної потужності – $P_{\text{max}} = 45$ МВт. Максимальне значення коефіцієнта потужності – $\cos \varphi_{\text{max}} = 0,85$.

Максимальне значення повної потужності [33]:

$$S_{\text{max}} = \frac{P_{\text{max}}}{\cos \varphi_{\text{max}}} = \frac{45}{0,85} = 52,94 \text{ МВт.} \quad (3.1)$$

Максимальне значення реактивної потужності [33]:

$$Q_{\text{max}} = \sqrt{S_{\text{max}}^2 - P_{\text{max}}^2} = \sqrt{52,94^2 - 45^2} = 27,89 \text{ Мвар.} \quad (3.2)$$

На проєктованій підстанції встановлюються два силові трансформатори, оскільки від неї живляться споживачі 1 та 2 категорії. Потужність кожного трансформатора приймаємо такою, щоб при відключенні одного трансформатора, той, що залишився в роботі, забезпечував живлення споживачів підстанції.

Розрахункова потужність трансформатора [33]:

$$S_{розр.} \geq (0,65 - 0,7) \cdot S_{max} =$$

$$= (0,65 - 0,7) \cdot 52,94 = 34,41 - 37,05 \text{ МВА.} \quad (3.3)$$

Виходячи з цього приймаємо трансформатори типу ТРДН-40000/110, параметри якого наведено у табл. 3.3 [34].

Таблиця 3.3 – Параметри трансформатора ТРДН-40000/220 [34]

Параметр	Значення
Номінальна потужність, $S_{ном}$, МВА	40
Напруга, кВ	
ВН ($U_{ВН}$)	220
НН ($U_{НН}$)	6,6–11
Напруга КЗ, U_k , %	12
Потужність КЗ, P_k , кВт	170
Струм ХХ, I_x , %	0,9
Активна потужність ХХ, P_x , кВт	50
Реактивна потужність ХХ, Q_x , квар	360
Активний опір трансформатора, R_T , Ом	5,6
Реактивний опір трансформатора, X_T , Ом	158,7

3.2 Визначення параметрів струмів короткого замикання

На рис. 3.2 наведено точки виникнення струмів короткого замикання.

Струми короткого замикання за вихідними даними було розраховано за допомогою програми [35].

Отримані в результаті застосування даної програми значення струмів короткого замикання наведено у табл. 3.4.

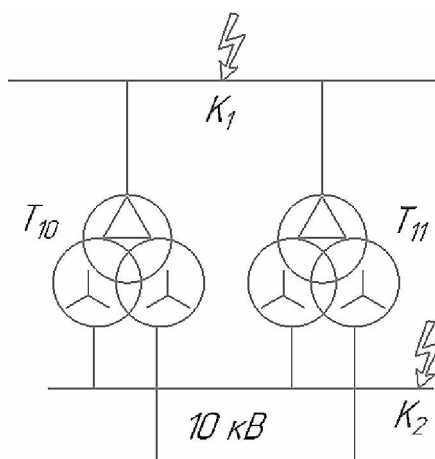


Рисунок 3.2 – Точки виникнення струмів короткого замикання

Таблиця 3.4 – Значення струмів короткого замикання

Місце КЗ	Точка КЗ	Початкове значення періодичної складової струмів короткого замикання, $I_{КЗ}$, кА		Ударний струм $i_{уд.}$, кА	
		Трифазний	Однофазний	Трифазний	Однофазний
Шини ВН (220 кВ)	K_1	14,52	10,22	38,22	29,18
Шини НН (6 кВ)	K_2	19,31	—	51,16	—

3.3 Огляд схеми розподільчих пристроїв вищої і нижчої напруги підстанції та засобів захисту

На боці вищої напруги (ВН) приймаємо схему з однією секціонованою системою збірних шин (рис. 3.3).

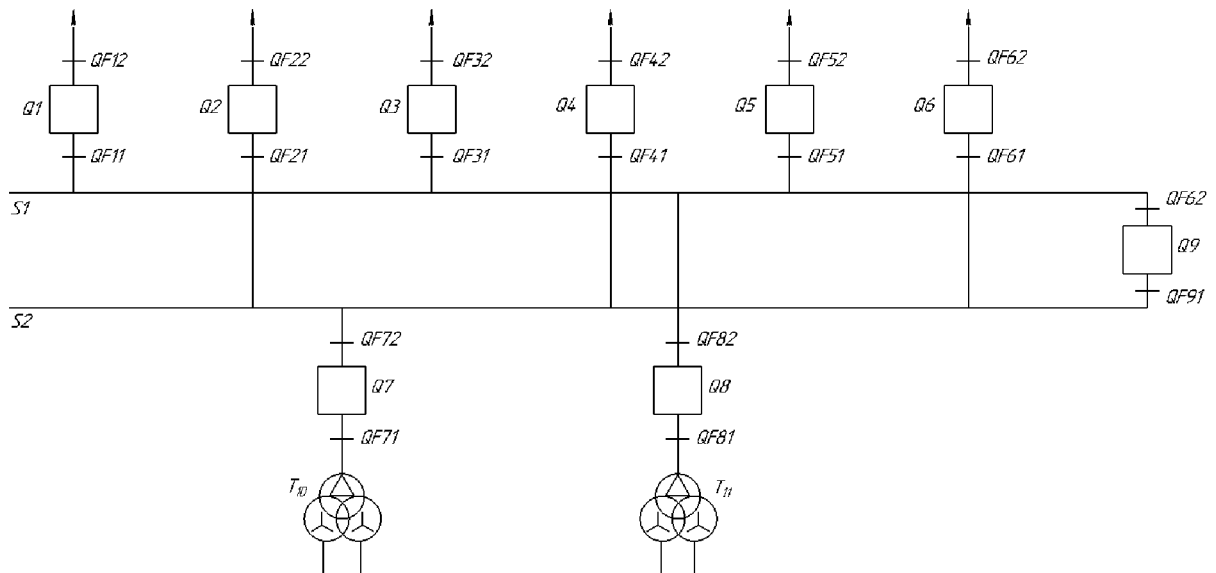


Рисунок 3.3 – Розподільчий пристрій ВН, виконаний за схемою з однією секціонованою системою збірних шин

На стороні нижчої напруги (НН) застосуємо схему, що складається з двох одиночних, секціонованих вимикачами системи шин (рис. 3.4).

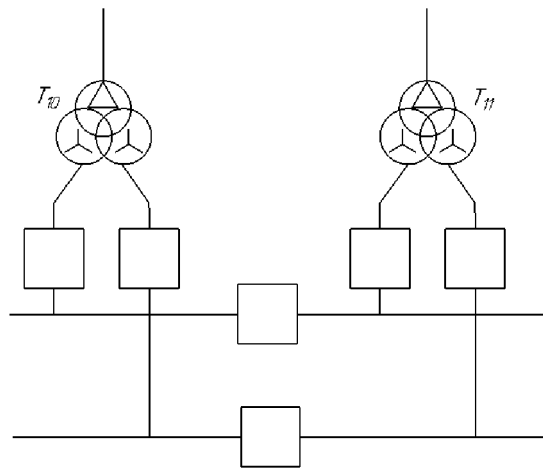


Рисунок 3.4 – Розподільчий пристрій НН, що складається з двох одиночних, секціонованих вимикачами системи шин

Тип релейного захисту на підстанції здійснюємо з огляду захисту силових трансформаторів та захисту на стороні НН.

Для захисту силового трансформатора використаємо наступні види захистів [36]:

- газовий захист від внутрішніх пошкоджень у трансформаторі та від зниження рівня масла в трансформаторі (час спрацювання $t_{pz} = 0,1$ с),
- поздовжній диференційний захист від коротких замикань трансформатора (час спрацювання $t_{pz} = 0,1$ с),
- максимальний струмовий захист від короткого замикання на стороні ВН (час спрацювання $t_{pz} = 2,5$ с),
- максимальний струмовий захист від короткого замикання на стороні НН (час спрацювання $t_{pz} = 2,1$ с).

На секційному вимикачі встановлюється комплект максимального струмового захисту (час спрацювання $t_{pz} = 1,6$ с).

На кабелях лініях, що живлять споживачі, використовують наступні види захисту:

- максимальний струмовий захист від короткого замикання (час спрацювання $t_{pz} = 1,2$ с),
- струмова відсічка за часом дії максимального струмового захисту (час спрацювання $t_{pz} = 0,1$ с).
- струмовий захист, що сигналізує замикання «на землю».

Контроль ізоляції реалізується шляхом використання комплекту реле напруги, що приєднується до обмотки розімкненого трикутника, та реле часу з реакцією на сигнал. Також передбачається можливість визначення пошкодження фази.

На боці ВН встановлюють швидкодіючий захист (час спрацювання $t_{pz} = 0,1$ с).

Для забезпечення автоматизованої роботи трансформаторів передбачаємо [36]:

- автоматичне включення резерву на секційному вимикачі 6 кВ (АВР) та на автоматі 0,4 кВ трансформатора власних потреб,
- автоматичне повторне включення ліній ВН (АПВ),
- автоматичне увімкнення пристроїв охолодження трансформатора.

3.4 Вибір вимикачів і роз'єднувачів

При виборі вимикача, його паспортні дані порівнюються з даними умов його роботи. Вибір здійснюється для найбільш важкого режиму їх роботи.

Для вибору та перевірки вимикача здійснюємо за наступними ознаками:

1. За тривалим припустимим струмом вимикача [37]:

$$I_{д.пр.} \geq I_{р.мах}, \quad (3.4)$$

де $I_{р.мах}$ – максимальний робочий струм, $I_{р.мах} = 490$ А.

2. За відключенням періодичної складової [37]:

$$I_{КЗ}^{(3)} \geq I_{відкл.}, \quad (3.5)$$

3. За відключенням аперіодичної складової [37]:

$$i_{на} \geq i_{ат}, \quad (3.6)$$

де

$$i_{ат} = \sqrt{2} \cdot I_{КЗ}^{(3)} \cdot e^{-\frac{t_m}{T_s}} \quad (3.7)$$

де t_m – мінімальний час від початку короткого замикання до моменту розмикання контактів вимикача [37]:

$$t_{min} = t_{с.мин} + t_{с.в}, \quad (3.8)$$

де $t_{с.мин}$ – мінімальне час спрацьювання захисту, $t_{с.мин} = 0,01$ с,

$t_{c.в.}$ – час відключення ланцюга даним типом вимикача, приймаємо $t_{c.в.} = 0,04$ с.

$$t_{min} = 0,01 + 0,04 = 0,05 \text{ с.}$$

T_a – постійна часу у точці КЗ, $T_a = 0,05$ с.

$$i_{на} = \sqrt{2} \cdot I_{всмк.} \cdot (1 + \beta_{ном}) \quad (3.9)$$

де $I_{всмк.}$ – номінальний струм відключення, $I_{всмк.} = 40$ кА,

$\beta_{ном}$ – номінальне значення відносного вмісту аперіодичної складової у струмі, що відключається, $\beta_{ном} = 0,3$.

$$i_{ат} = \sqrt{2} \cdot 14520 \cdot e^{\frac{0,05}{0,05}} = 20,53 \text{ А,}$$

$$i_{на} = \sqrt{2} \cdot 40000 \cdot (1 + 0,3) = 70,71 \text{ А.}$$

4. За термічною стійкістю по струму [37]:

$$B_T \leq I_T^2 \cdot t, \quad (3.10)$$

де I_T – струм термічної стійкості, $I_T = 50$ кА,

t_T – час протікання струму термічної стійкості, $t_T = 3$ с,

B_T – тепловий імпульс, $\text{кА}^2 \cdot \text{с}$,

$$B_T \leq 50^2 \cdot 3 = 7500 \text{ кА}^2 \cdot \text{с.}$$

Для ВРП-220кВ обираємо елегазові вимикачі типу ВГТ-220-2500-40, технічні характеристики якого наведено в табл. 3.6 [34].

Таблиця 3.6 – Характеристики вимикача типу ВГТ-220-2500-40 [34]

Параметр	Значення
Номинальна напруга, кВ	220
Максимальний робочий струм, кА	2,5
Ударний струм, кА	102
Номинальний струм відключення, кА	40
Струм термічної стійкості, кА	40
Час термічної стійкості, с	3
Тепловий імпульс, $\text{кА}^2 \cdot \text{с}$	4800
Тип приводу	пружинно-гідравлічний

Основне призначення роз'єднувача – створити видимий розрив та ізолювати частини системи, електроустановки, окремі апарати від суміжних частин, що знаходяться під напругою, для здійснення їх обслуговування і ремонту.

Обираємо роз'єднувач типу РВ-10/1000УХЛ4 технічні характеристики якого наведено в табл. 3.7 [34].

Таблиця 3.7 – Характеристики роз'єднувач типу РВ-10/1000УХЛ4 [34]

Параметр	Значення
Робоча напруга, кВ	10
Максимальний робочий струм, кА	1,0
Ударний струм, кА	51
Тепловий імпульс, $\text{кА}^2 \cdot \text{с}$	1200
Тип приводу	ручний

4 МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ, ВИКЛИКАНИХ НЕСПРАВНОСТЯМИ СИЛОВИХ ВИМИКАЧІВ

Силові вимикачі у електричних мережах при перемиканні, особливо при їх несправностях, можуть викликати перенапруги при комутаціях, які є серйозною проблемою. Часті комутації в системі можуть викликати перехідні перенапруги або збільшені струми, які «навантажують» ізоляційні матеріали у обладнанні, призводять до збоїв у системах захисту, збільшують втрати та призводять до пошкодження обладнання.

Перенапруги викликають нестабільність роботи електричної системи, що вимагає здійснення ретельних досліджень впливу перехідних процесів при комутації вимикачів, особливо при наявності несправності в них. З цією метою було використано програмне забезпечення, що дозволило здійснити моделювання процесу комутації при різних станах вимикача. Операції комутації можуть викликати перенапругу через явища повторного запалювальні електричної дуги, що відбуваються на контактних елементах вимикача. Це часто супроводжується високочастотними і високоамплітудними сплесками перенапруги, що становить загрозу для безпеки роботи обладнання [10].

На рис. 4.1 представлено модель, створена у програмному середовищі Matlab. Ця модель дозволяє досліджувати перехідні процеси в електричній мережі. Схемі містить конкретні елементи і зв'язки між ними: блоки управління та вимірювання, перетворювачі, фільтруючі пристрої, логічні блоки, джерела живлення, дискретні елементи та інше. Створена модель може бути використана для симуляції та аналізу динаміки електричної мережі, включаючи взаємодію між генерацією, передачею та розподілом електричної енергії. Вона дозволяє досліджувати вплив різних параметрів на стабільність та ефективність системи, а також вивчати перехідні процеси при зміні навантаження або виникненні несправностей,

наприклад, незадовільній роботі вимикачів при виникненні аварійних явищ (таких як короткі замикання, затяжні пуски потужних споживачів та інші) [38, 39].

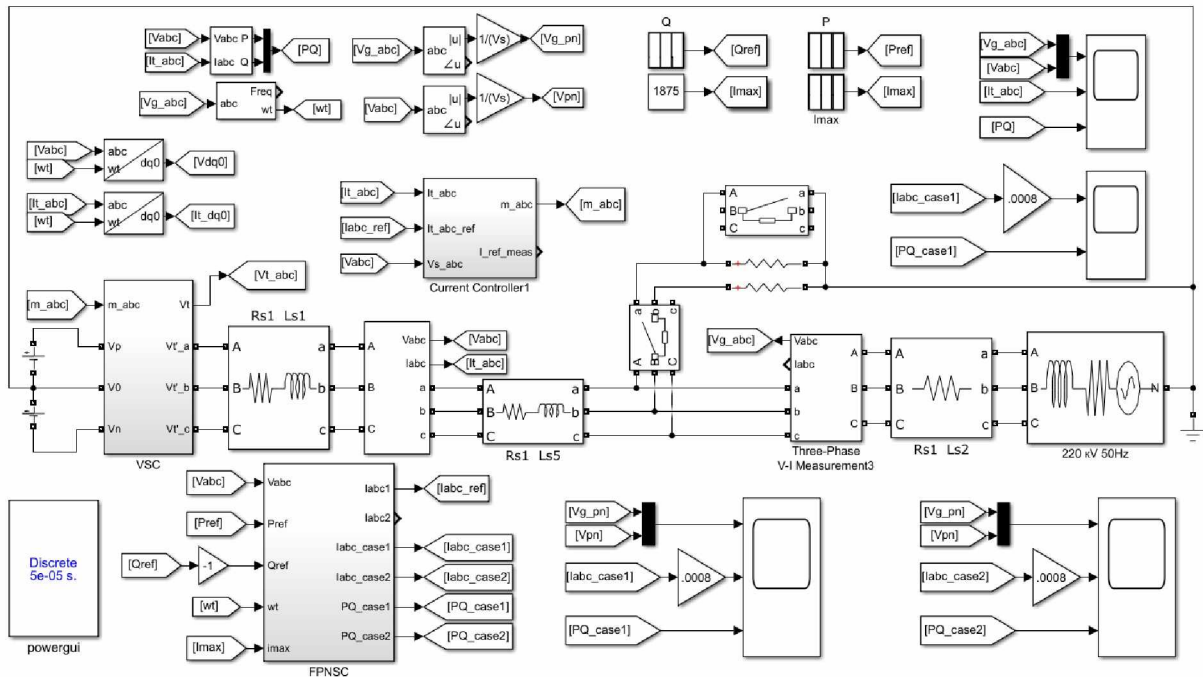


Рисунок 4.1 – Модель для дослідження перехідних процесів у електричній мережі

Склад підсистем для вимірювання струмів і напруг наведено відповідно на рис. 4.2 і 4.3. Підсистема на рис. 4.2 призначена для точного вимірювання струмів у електричній системі. Вона включає в себе джерела сигналів струму (I_{t_abc} , $I_{t_abc_ref}$), блоки підсилення (1st Gain Shaping1, 2, 3) для корекції сигналів струму, суматори для обчислення різниці між виміряним і наявними струмами та блок візуалізації отриманих даних (Score3). Вихід (m_abc) використовується для здійснення подальшого аналізу. Підсистема на рис. 4.3 призначена для вимірювання і аналізу напруг у електричній системі. Вона містить демультиплексор (Demux) для розподілу сигналів, блоки множення для обчислення активної та реактивної потужності (Average_Pa, Average_Na та інші), а також блоки для відображення виміряних значень [39].

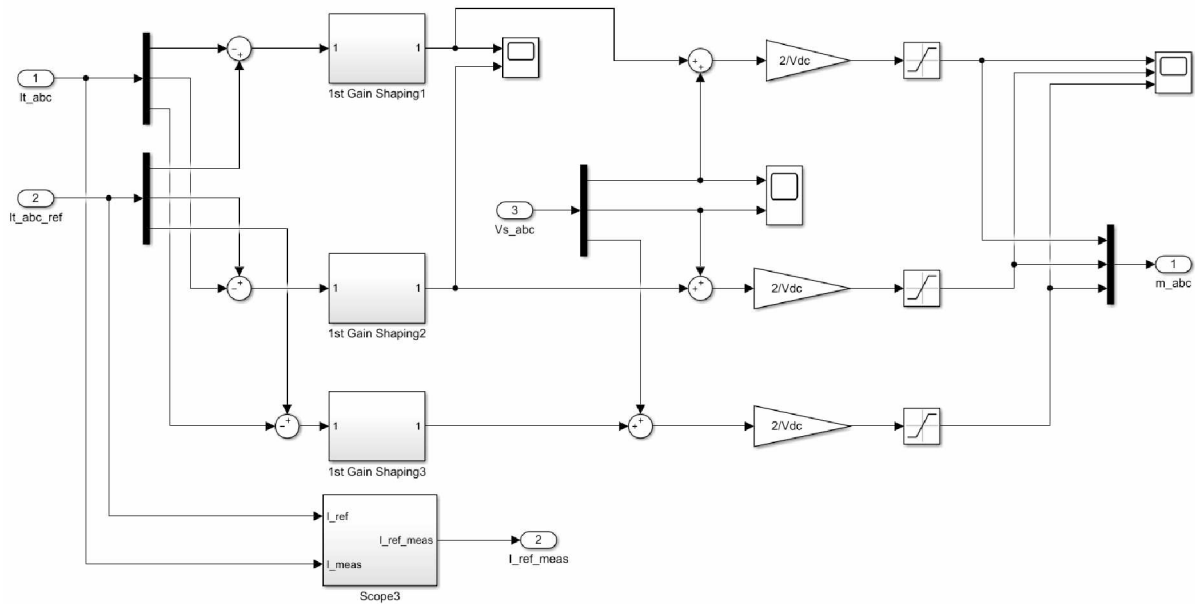


Рисунок 4.2 – Склад підсистеми для вимірювання струмів

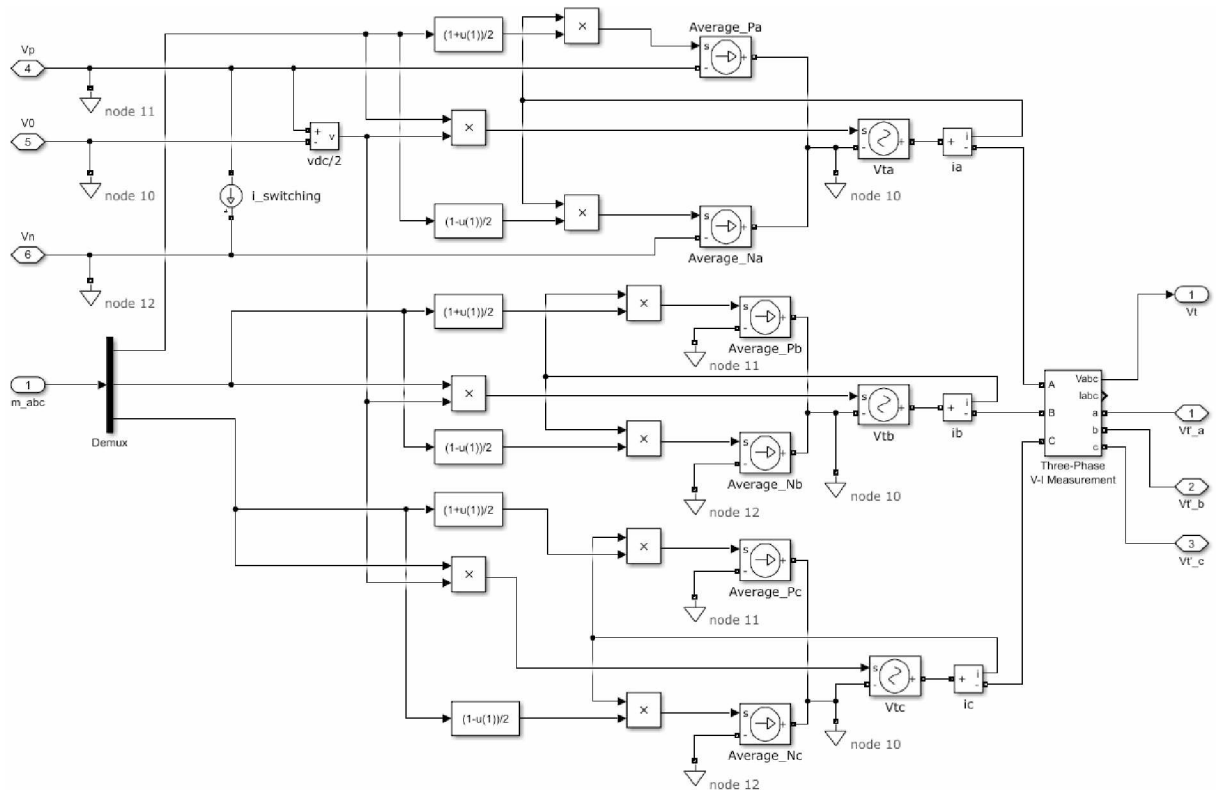


Рисунок 4.3 – Склад підсистеми для вимірювання напруг

Для зменшення перехідних перенапруг при комутаціях у електричних мережах можуть бути застосовані різноманітні заходи та засоби по їх придушенню: розрядники перенапруг, шунтуючі реактори, засоби

комутації у визначених місцях та інше. Зазначені заходи мають обмежений вплив на зниження частотних коливань перенапруги. Боротися з цим явищем можна шляхом від'єднання секторів мереж за допомогою силових вимикачів. Проблеми можуть бути викликані несправністю цих вимикачів або повторним запалюванням електричної дуги на контактах вимикача.

Складена вище модель дозволяє здійснювати дослідження, які враховують явища повторного запалювання електричної дуги під час комутації силового вимикача на основі динамічної кривої відновлення міцності діелектрика між контактами та характеристик гасіння дуги при виникненні високочастотних струмів. Динамічна міцність ізоляції діелектрика під час замикання вимикача у перехідному процесі може бути апроксимована за допомогою кубічної поліноміальної кривої відновлення (рис. 4.4) [40].

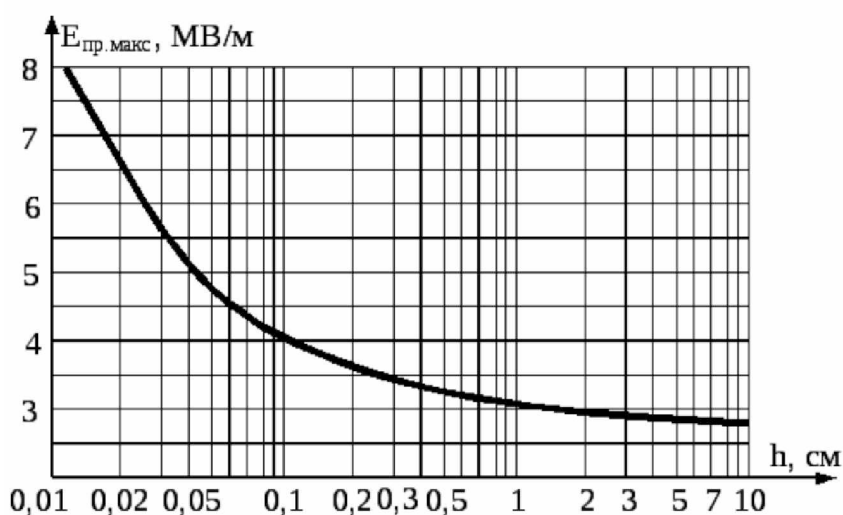


Рисунок 4.4 – Залежність електричної міцності повітря у залежності від відстані між електродами в однорідному полі ($f = 50$ Гц, $t = 20^\circ\text{C}$, $p = 0,1$ МПа) [40]

На рис. 4.5 наведено результати моделювання – зміна параметрів у мережі при порушеннях у роботі вимикача.

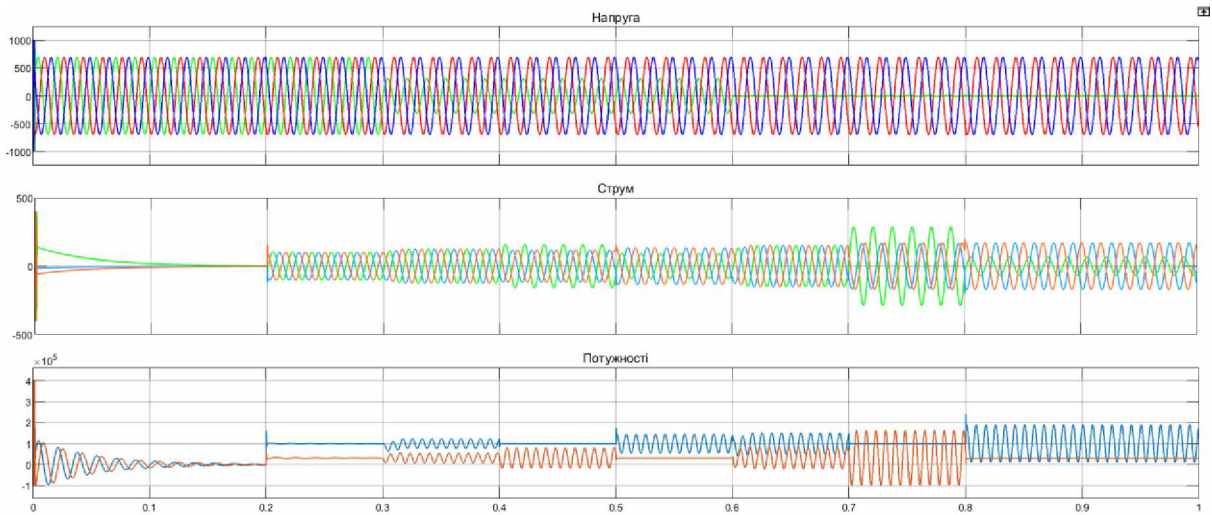


Рисунок 4.5 – Зміна параметрів у мережі при порушеннях у роботі вимикача

Різка зміна наведених параметрів, яку можна спостерігати на графіках, пояснюється нестабільністю роботи вимикача. З рисунку видно, що при виникненні короткого замикання в мережі, вимикач отримує сигнал на розрив ланцюга живлення. Відстань між контактами починає збільшуватися, а динамічна міцність ізоляції діелектрика збільшується, поки не стане вищою за напругу між контактами, стаючи меншою міцності ізоляції повітряного зазору та викликаючи розривання контактів. Під впливом наявних індуктивності та ємності генерується високочастотний струм, який накладається на струм ланцюга. В цей момент відновлюється перехідна напруга між контактами і коли її значення перевищує динамічну міцність ізоляції діелектрика, відбувається замикання повітряного зазору та відбувається повторне запалювання електричної дуги.

Електрична дуга є дуже нестабільною і може генерувати значні перешкоди у вигляді шуму та високочастотних коливань, які впливають на нормальну роботу електричної системи. Коли дуга гасне і знову запалюється, це може створювати різкі стрибки струму, що навантажує елементи системи та може викликати зміну напруги. У свою чергу, різкі зміни струму та напруги можуть пошкодити електричне обладнання, що можуть бути досить чутливими до таких змін. Крім фізичного

пошкодження обладнання, повторне запалювання дуги може викликати проблеми з якістю енергії, зокрема збільшення рівня гармонік в системі, що може негативно впливати на працездатність інших електроприймачів. У цілому, різкі зміни контрольованих параметрів, спричинені несправністю вимикача, можуть свідчити про серйозну проблему в електричній системі, яка вимагає негайного вирішення, оскільки вона може викликати подальші пошкодження або навіть відмови в електропостачанні.

Для усунення наведених негативних явищ необхідно здійснити технічне обслуговування або ремонт вимикача. В такому разі контакти вимикача здатні швидко замикатися та розмикатися – відразу після подачі відповідної команди. Швидкість зростання динамічної міцності ізоляції діелектрика у справному вимикачі більша, ніж швидкість зростання напруги у зазорі. Міцність зазору здатна утримуватися протягом всього процесу спрацювання вимикача та не викликає повторного запалювання електричної дуги.

На рис. 4.6 наведено зміну параметрів у мережі після налагодження роботи вимикача.

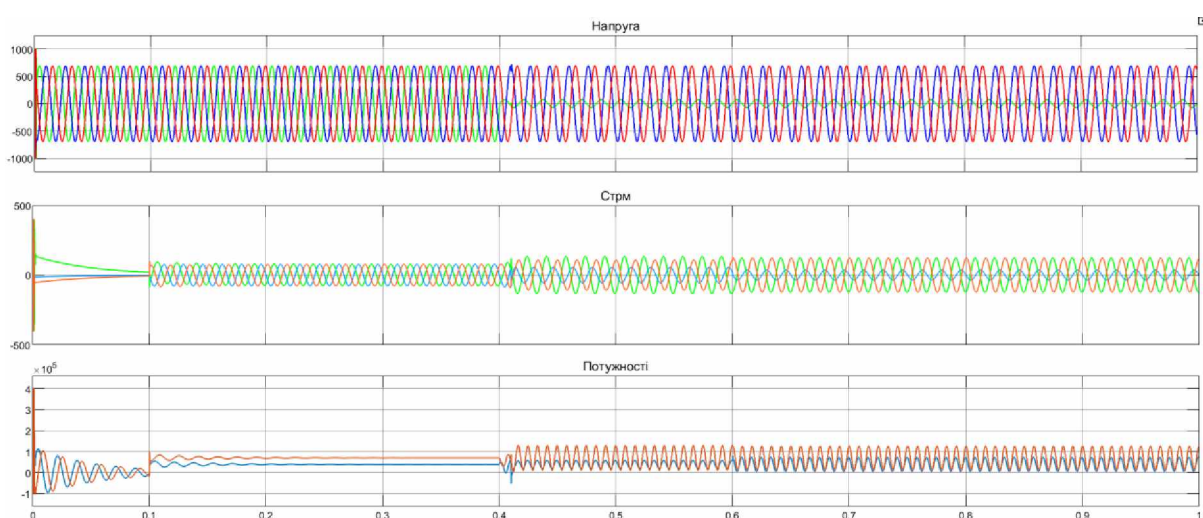


Рисунок 4.6 – Зміна параметрів у мережі після налагодження роботи вимикача

Зміни параметрів на отриманих графіках стали більш синхронізованими та стабільними, без наявності різких сплесків, що були наявні на попередніх графіках (рис. 4.5). Це вказує на те, що вимикач функціонує нормально, не викликаючи повторного запалювання електричної дуги. Графіки зміни потужностей не мають різких змін або коливань, що може свідчити про більшу ефективність без значних втрат, які може викликати наявність електричної дуги.

ВИСНОВКИ

У роботі було використано різнобічний підхід, який поєднав теоретичний аналіз з провідними методами моделювання. Аналіз теоретичних джерел дозволив зрозуміти джерела перехідних явищ при роботі силових вимикачів, а моделювання дало змогу зрозуміти складні взаємодії в мережі під час таких подій.

Результати досліджень сприяють підвищенню надійності роботи електричної мережі, дозволяючи розробляти більш надійні та ефективні вимикачі. Розуміння перехідних процесів допоможе розробити кращі захисні стратегії та методи зменшення їх впливу, що дозволить убезпечити чутливе обладнання та забезпечити безперебійне електропостачання.

Розроблена модель враховує явища виникнення повторного запалювання електричної дуги, яка здатна точно відображати реальні процеси у силових вимикачах.

Було продемонстровано, що перехідні процеси під час комутації вимикачів, відображаються на параметрах роботи електричної мережі. Результати досліджень показали, що явища повторного запалювання під час процесів перемикання є основними причинами виникнення перенапруг. Максимальне значення перенапруги спостерігається у випадках, коли час закриття збігався з піком напруги джерела живлення. Встановлення фільтруючих пристроїв може ефективно придушувати перенапруги, спричинену незадовільною роботою вимикачів.

Складена модель дослідження перехідних процесів при комутації була здійснена теоретично та вимагає експериментального підтвердження точності роботи моделі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сегеда М.С. Електричні мережі та системи: Підручник / М.С. Сегеда. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2007. – 488 с.
2. Пупена О.М., Ельперін І.В., Луцька Н.М., Ладанюк А.П. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах. Навчальний посібник / К.: Ліра-К, 2011. – 552 с.
3. Бардик Є.І. Електрична частина станцій та підстанцій. Основне електрообладнання / Є.І. Бардик, М.П. Лукаш / К.: «Політехніка» НТУУ «КПІ», 2012. – 250 с.
4. Романюк Ю.Ф. Електричні системи та мережі: навч. посібник / Ю.Ф. Романюк. – К.: Знання, 2007. – 292 с.
5. Костишин В.С. Електрична частина станцій та підстанцій: навчальний посібник / В.С. Костишин, М.Й. Федорів, Я.В. Бацала. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2017. – 243 с.
6. Larry Drbal, Kayla Westra, Pat Boston. Power plant engineering. Springer Science & Business Media, 2012. – 880 p.
7. Кігель Г.А. Електричні мережі систем електропостачання: навч. посібник/ Г.А. Кігель, Г.Г. Півняк. – 2-ге вид., перероб. і доп. Д.: Національний гірничий університет, 2011. – 318 с.
8. Півняк Г.Г., Шидловский А.К., Кігель Г.А., Рибалко А.Я., Хованська О.І. Особливі режими електричних мереж. – Дніпропетровськ: НГА України, 2004. – 375 с.
9. Клименко Б.В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: навчальний посібник (видання друге, допрацьоване та доповнене). – Харків : Вид-во «Точка», 2013. – 400 с.

10. Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник для ВНЗ / Г.Г. Півняк, Г.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка, Л.І. Несен, за ред. Г.Г. Півняка; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – 5-те вид., доопрац. та допов. – Дніпро: НГУ, 2016. – 600 с.

11. Zhankai Li, Jingqin Wang, Fumin Zhang, Baoyun Li, Si Li, Jianyang Zhao, Yongcui Sun. Design of intelligent diagnosis module for high voltage circuit breaker based on dual-MCU control. 1st International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology. 2011. doi:10.1109/icepe-st.2011.6122973.

12. Bing L., Mingliang L., Ping Y., Yaowen X., Quanwei P. Machinery fault diagnosis method of HV circuit breaker based on EEMD and RBF neural network. 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC). 2017. doi:10.1109/ccdc.2017.7978865.

13. Guan S., Han S., Yin H., Bai X., Wang T., Yan J. Effect of grounded shield on electric field distribution for solid insulation vacuum circuit breaker. 27th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). 2016. doi:10.1109/deiv.2016.7764000.

14. Suwanasri T., Suwanasri C., Lipirodjanapong S., Wattanawongpitak S. Analysis of electrical stress on power circuit breaker from capacitor banks switching. 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology. 2013. doi:10.1109/ecticon.2013.6559598.

15. Liu Ai-min, Lin Xin, Liu Xiang-dong. Fault Diagnosis Method of High Voltage Circuit Breaker based on (RBF) Artificial Neural Network. IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific. 2005. doi:10.1109/tdc.2005.1546925.

16. Zhou L., Xie D. Predictions for monthly tripping quantity of circuit breaker in electric distribution network based on weighted Markov chain. International Conference on Electric Information and Control Engineering. 2011. doi:10.1109/iceice.2011.5778287.

17. Xue-song Z., Xuan-zheng Z., You-jie M., Hai-qing G., Xin L., Yi-ran Z., Hai-shan Y. Check Circuit Breaker Rupturing Capacity in Industrial Electric Power Network. WASE International Conference on Information Engineering. 2010. doi:10.1109/icie.2010.173.
18. Dong J., Koval D.O., Zuo M.J. Impact of Circuit Breaker Failure Modes on the Reliability of the Gold Book Standard Network. IEEE Transactions on Industry Applications, 41(5), 2005. doi:10.1109/tia.2005.855050.
19. Cao Y., Li F., Liu X., Hou C. Research on Intelligent Vacuum Circuit Breaker Controller based on Embedded Network Control System. International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. 2006. doi:10.1109/deiv.2006.357346.
20. Yan Jing, Wang Yanxin. High-voltage Circuit Breaker Intelligent Diagnosis Technology for Mechanical Faults under Power Internet of Things Context. 2020. 10.1109/ICHVE49031.2020.9279574.
21. Obarcanin K., Ostojic R., Dzuzdanovic S. Parameters for condition assessment of the high voltage circuit breakers arcing contacts using Dynamic Resistance measurement. 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). 2017. doi:10.23919/mipro.2017.7973578.
22. Ziani A., Moulai H. Application of artificial neural networks for electric arc extinction modeling in high voltage circuit breakers. Melecon 2010 – 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. 2010. doi:10.1109/melcon.2010.5476294.
23. Miao Hongxia, Wang Honghua. Research on fault diagnosis method of high-voltage circuit breaker based on fuzzy neural network data fusion. International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010). 2010. doi:10.1109/iccasm.2010.5623219.

24. Paunescu Mihai, Dragan Florin, Micu Dan. Propagation of harmonic disturbances in electrical network caused by the electrical circuit breaker. 2019. 10.1109/UPEC.2019.8893619.

25. Електричні апарати: навч. посіб. / В.О. Лесько, В.О. Комар, С.В. Кравчук, О.В. Сікорська. – Вінниця: ВНТУ, 2018. – 102 с.

26. Електричні мережі та системи. Режим роботи розімкнених мереж: Навчальний посібник з дисципліни для всіх форм навчання та студентів іноземців напряму підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології»/Уклад. В.В.Кирик. – К.: НТУУ «КПІ». 2014. – 130 с.

27. Журахівський А.В. Надійність електроенергетичних систем і електричних мереж: підручник / А. В. Журахівський, С. В. Казанський, Ю. П. Матеєнко, О. Р. Пастух. – Київ.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. – 456 с.

28. Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М. Куценко, В.Ф. Яковлев та ін. – К.: Аграрна освіта, 2013. – 449 с.

29. Вакуумні вимикачі серії ВВ/TEL-10-31,5/1600(2000). Технічний опис та посібник з експлуатації АРТА.674152.002 Р – 36 с.

30. [Електронний ресурс]. – <https://pluton.ua/articles/innovative-solution-for-dc-current-switching-afb-arc-free-ultra-high-speed-dc-circuit-breaker>

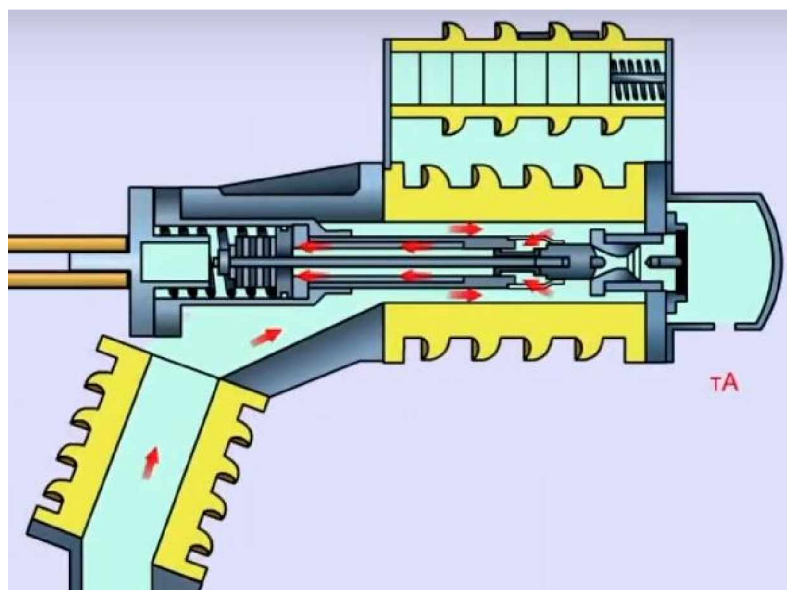
31. Лесько В.О. Електричне обладнання станцій та підстанцій навчальний посібник / Лесько В.О., Нетребський В.В., Малогулко Ю.В. – Вінниця: ВІТУ, 2018. – 121 с.

32. Петренко А.В. Технології обслуговування та ремонту електричних установок. Частина 1 / А.В. Петренко, С.С. Макаревич // К.: ЦП «Компринт», 2017 – 360 с.

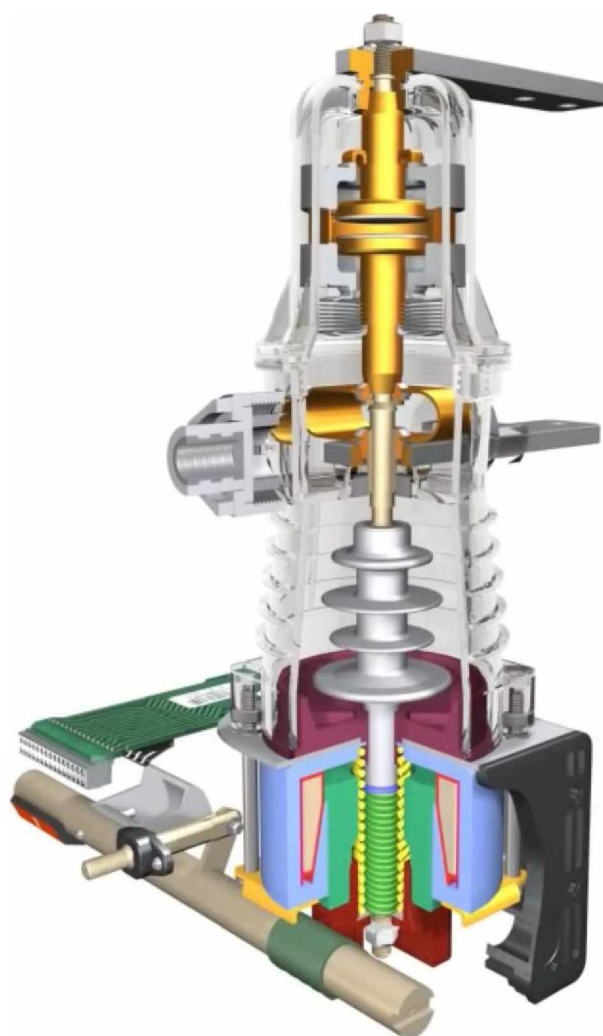
33. Проектування пристрою розподільчого високовольтного змінного та постійного струму: метод. вказівки для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / А.Й. Клещов, О.М. Терентьев, С.В. Кудільчак, Київ: КЕМТ, 2022. – 139 с.

34. Орлович А.Ю., Плешков П.Г., Величко Т.В. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання. Навчальний посібник. – 2009. – 334 с.
35. [Електронний ресурс]. – <https://tools.se.app/faultcalc/FaultCalc.html>
36. Кідиба В.П. Релейний захист електроенергетичних систем: Підручник. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2013. – 533 с.
37. Лук'яненко Ю.В., Остапчук Ж.І., Кулик В.В. Розрахунки електричних мереж при їх проектуванні. – Вінниця: ВДТУ, – 2002.
38. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень: навч. посіб. / Р. Н. Кветний та ін.; Вінниц. нац. техн. ун-т. Вінниця: ВНТУ, 2013.
39. S.J. Chapman. MATLAB Programming for Engineers. Thomson, 2004. – 592 p.
40. Василюк С.В., Василюк К.С. Техніка високих напруг: навчальний посібник [Електронне видання]. – Рівне: НУВГП, 2018. – 187 с.

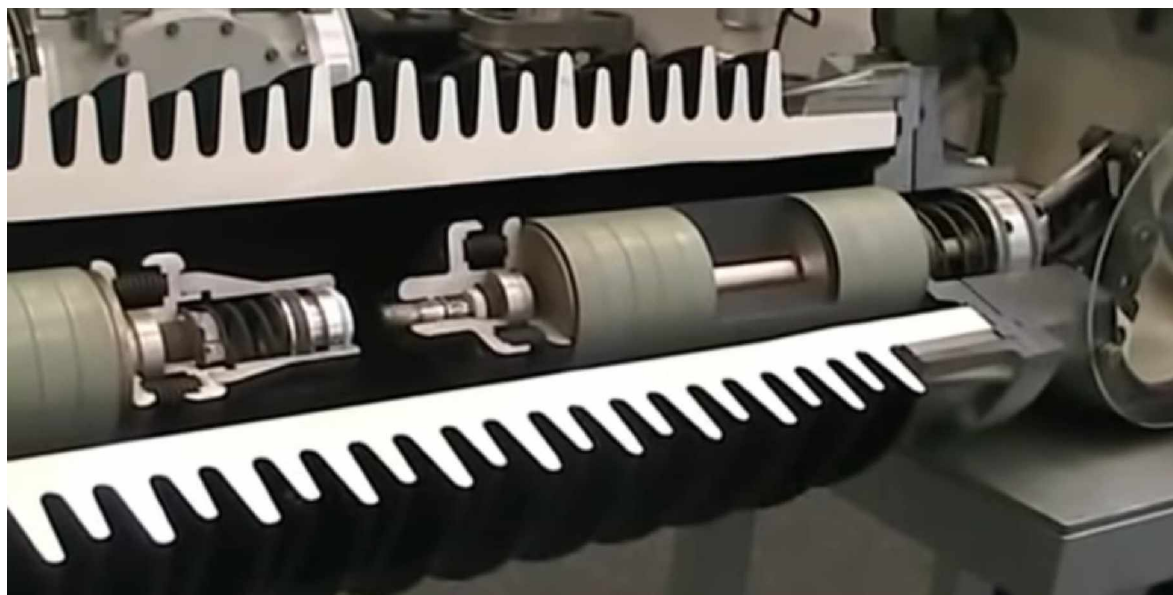
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА



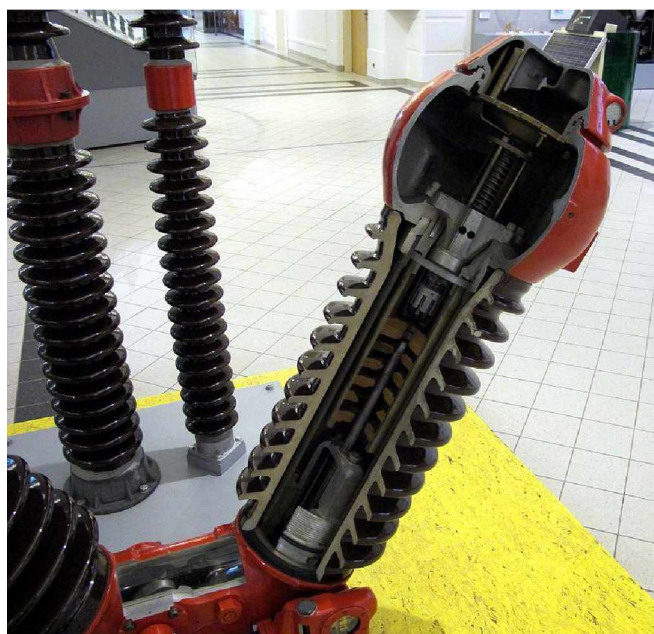
Частина внутрішнього устрою повітряного вимикача



Внутрішній устрій вакуумного вимикача

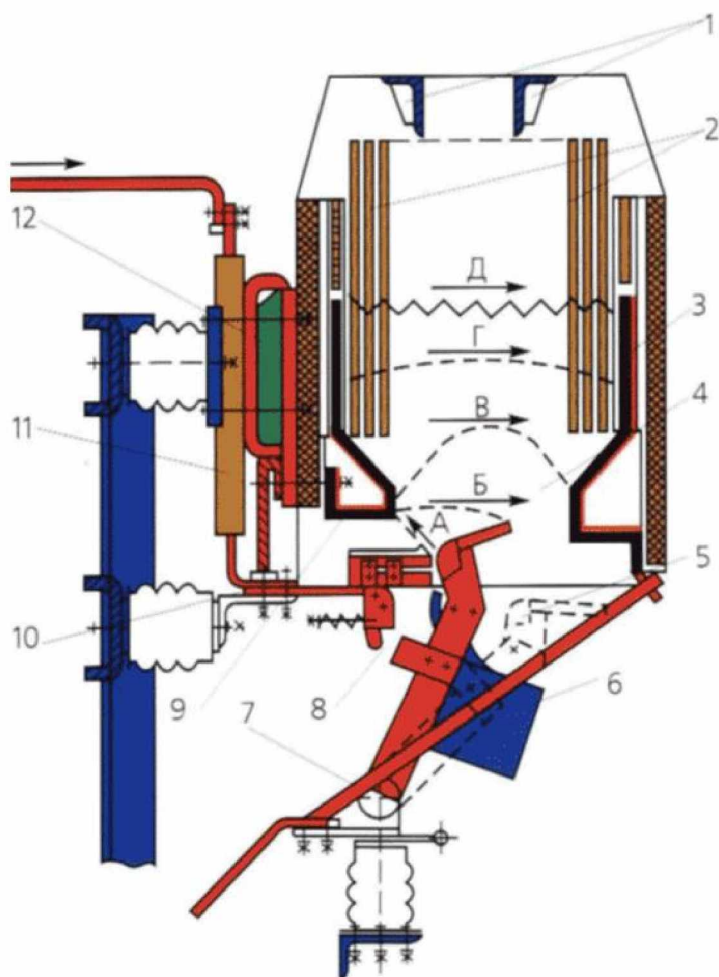


Внутрішній устрій елегазового вимикача

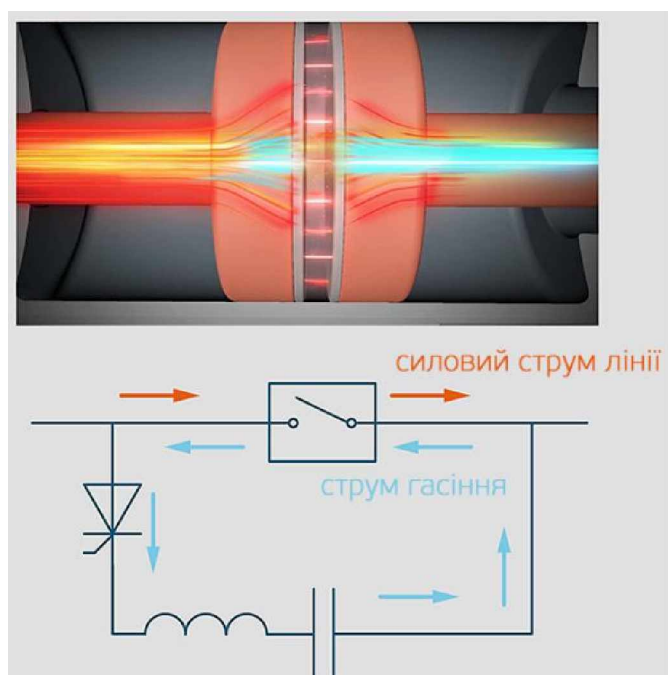


Внутрішній устрій масляного вимикача

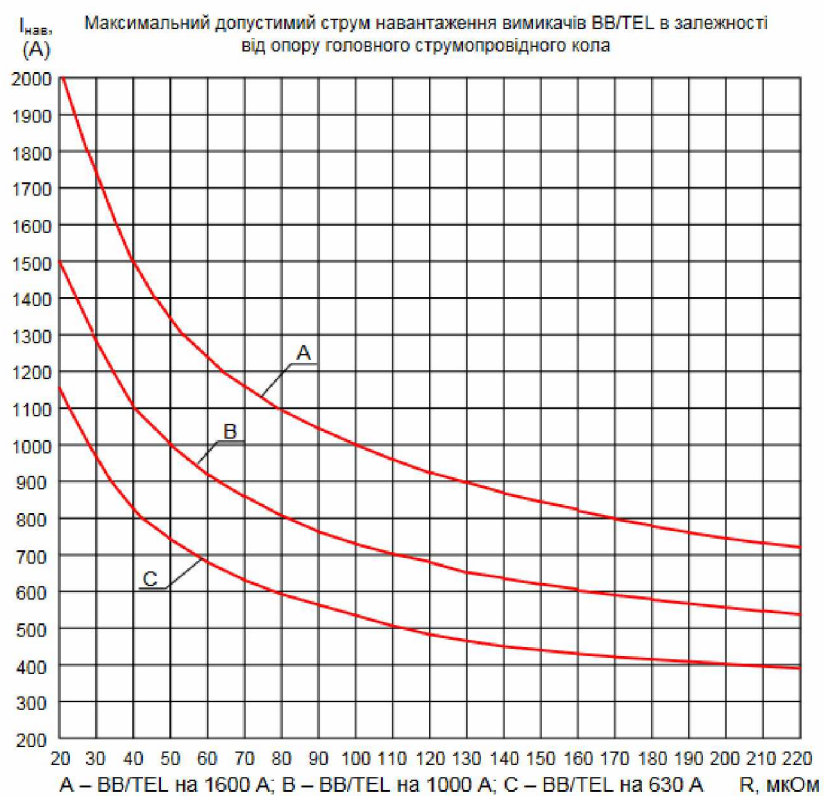
Внутрішній устрій маломасляного вимикача



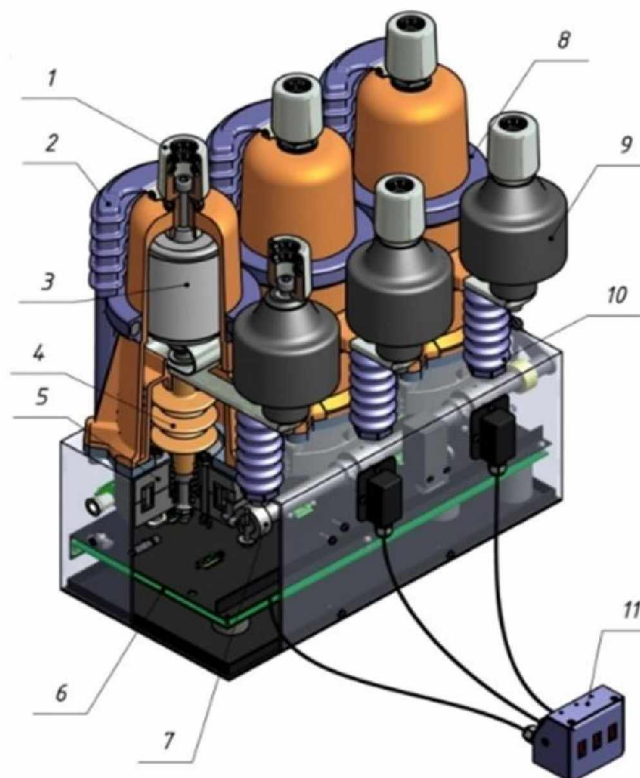
Внутрішній устрій електромагнітного вимикача



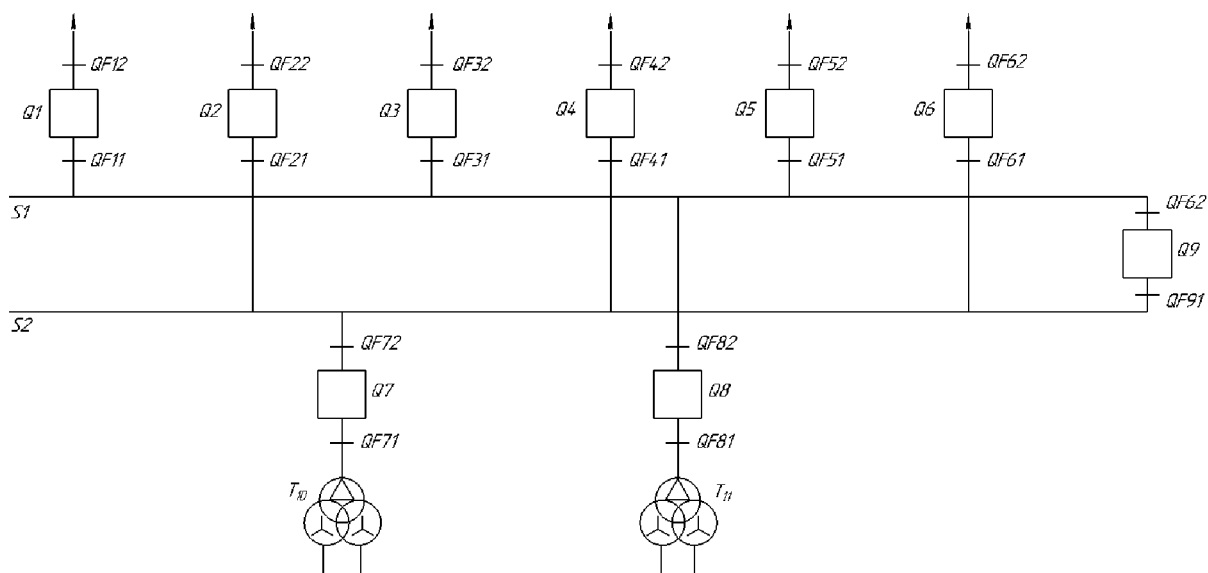
Інноваційне рішення компанії «Плутон» для розподілення постійного струму у бездуговому вимикачі АФВ надшвидкої дії



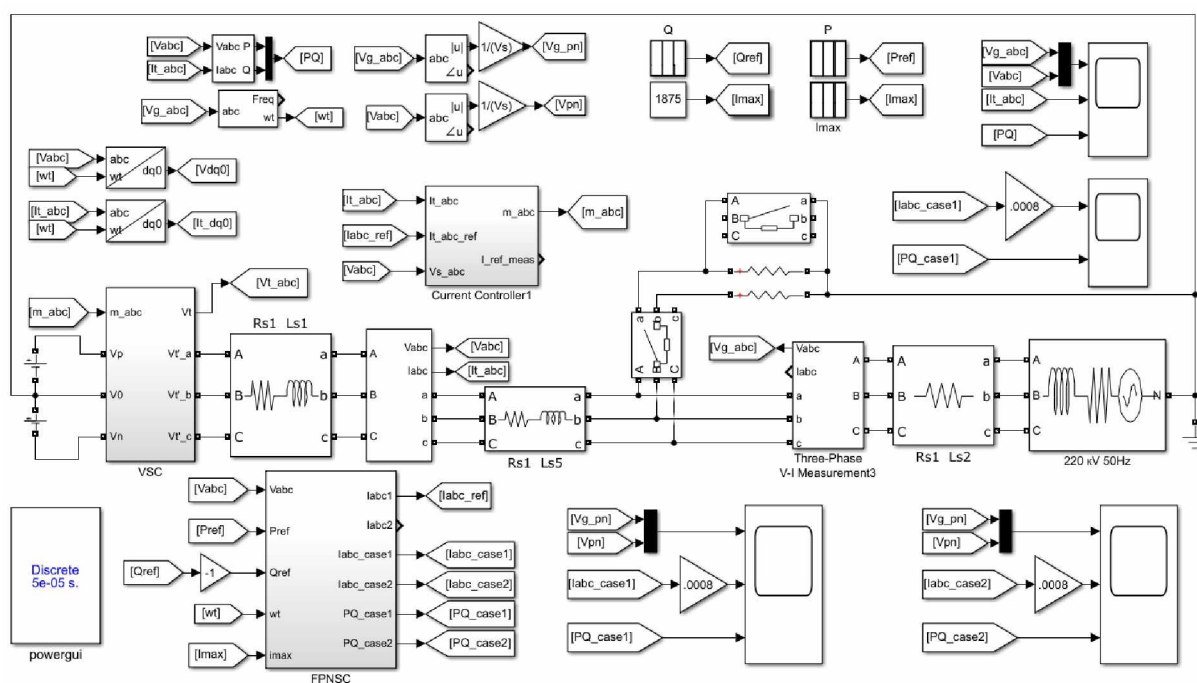
Зміна перехідного опору головних контактів вимикачів серії ВВ/TEL



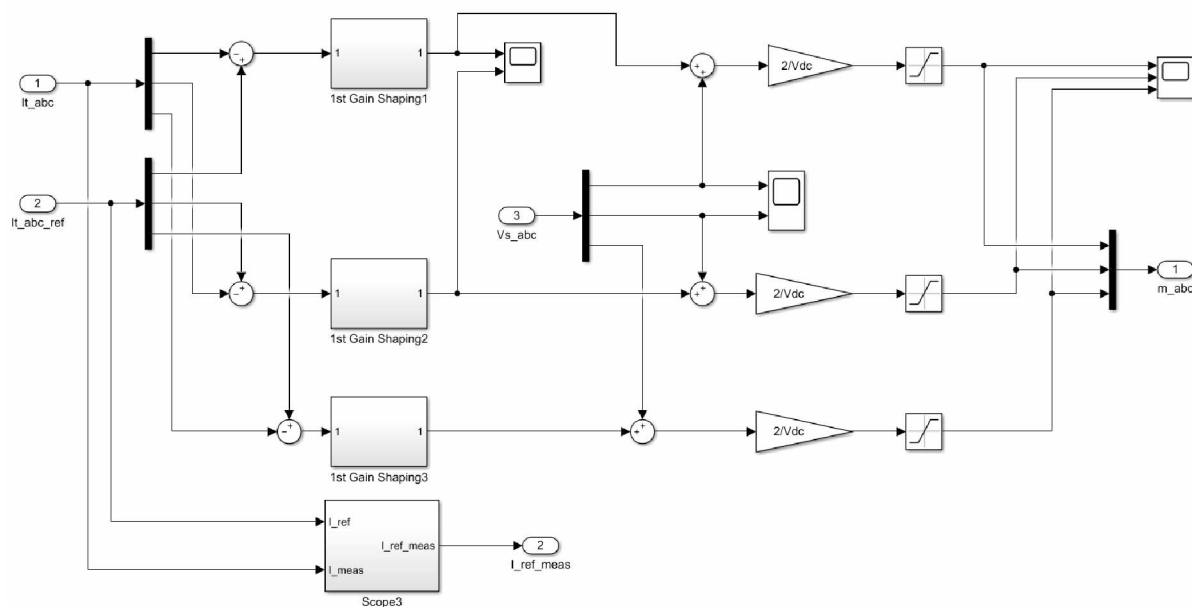
Керований вакуумний вимикач



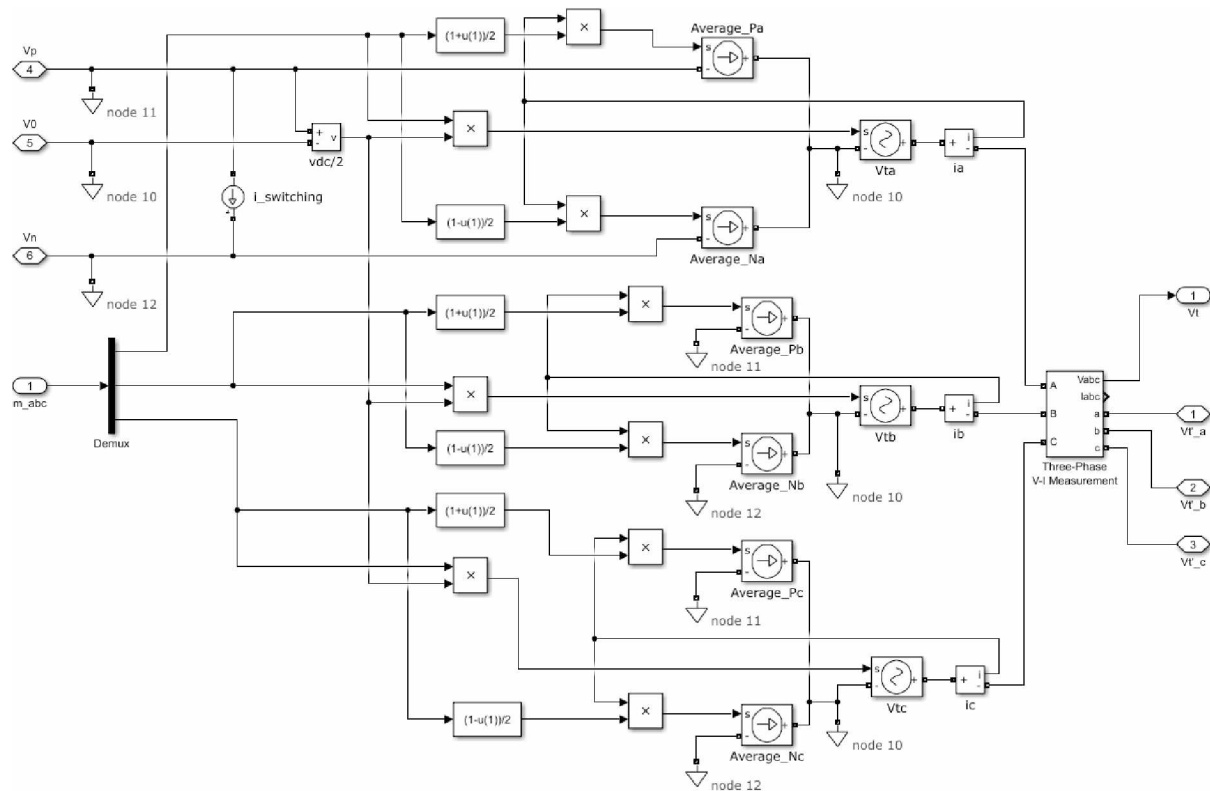
Розподільчий пристрій ВН, виконаний за схемою з однією секціонованою системою збірних шин



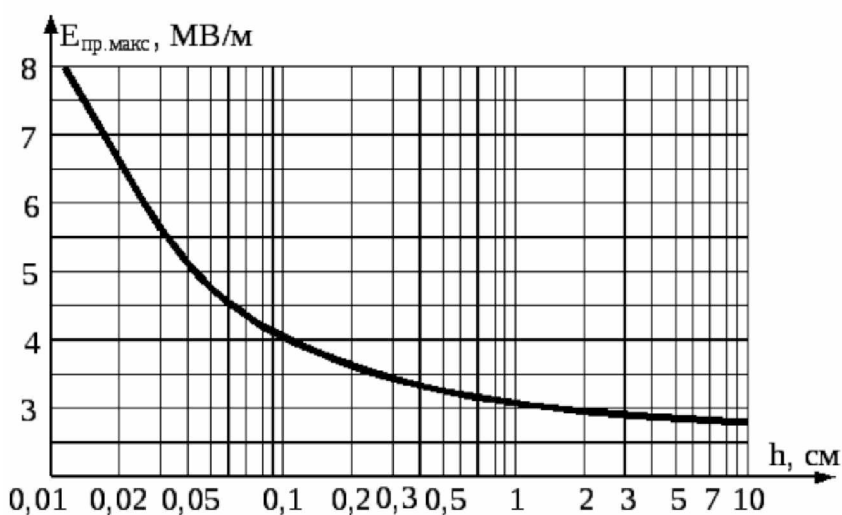
Модель для дослідження перехідних процесів у електричній мережі



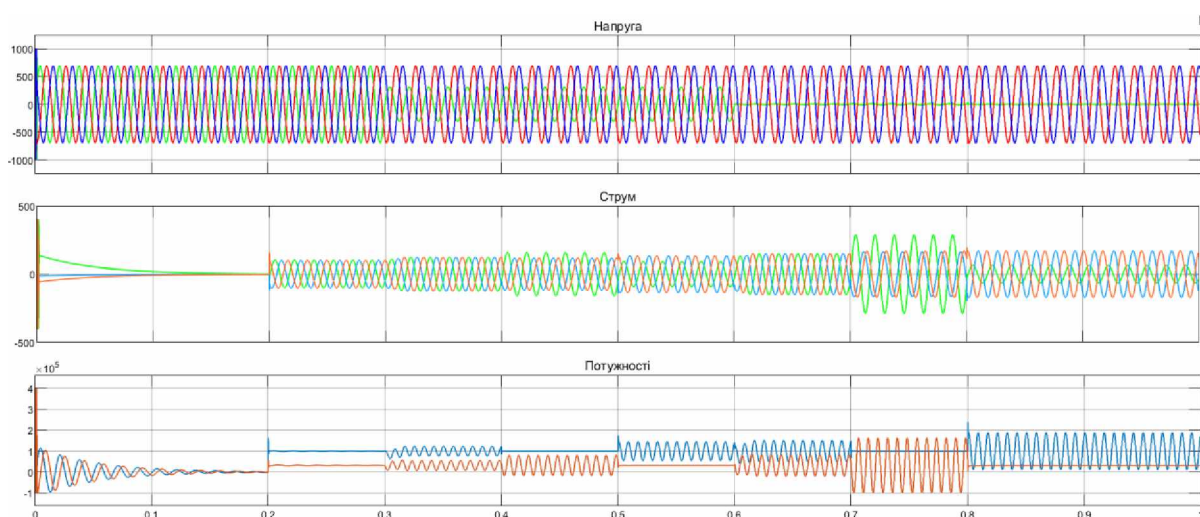
Склад підсистеми для вимірювання струмів



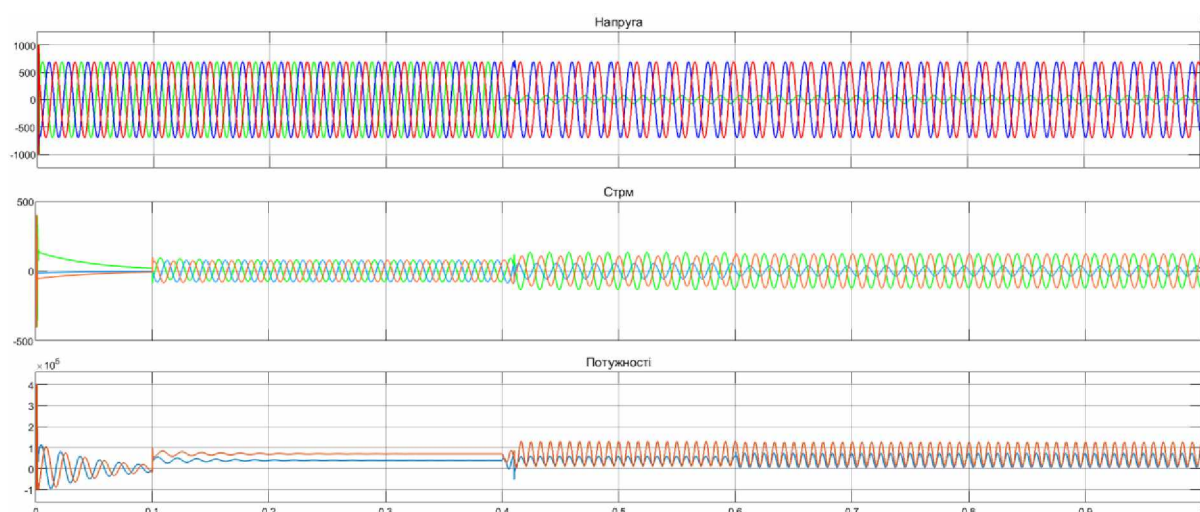
Склад підсистеми для вимірювання напруг



Залежність електричної міцності повітря у залежності від відстані між електродами в однорідному полі ($f = 50$ Гц, $t = 20^\circ\text{C}$, $p = 0,1$ МПа)



Зміна параметрів у мережі при порушенні у роботі вимикача



Зміна параметрів у мережі після налагодження роботи вимикача

ДОДАТОК Б

Перелік зауважень нормоконтролера до дипломної роботи

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____