

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

АНАЛІЗ РІВНЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО БЕЗПЕКИ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ВАКУУМНИХ ШУНТУЮЧИХ СТРУМООБМЕЖУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ

(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 маг. курсу, групи ДЕА-ЕБ23мг-1
Спеціальності: 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____/Дмитро ШАХРАЙ
(підпис) (ім'я та прізвище)

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

Рецензент _____/Світлана АРТЮХ
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

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

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

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

Харків – 2024 рік

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

Навчально – науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Енергетична безпека

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

К.Т.Н., доцент Артем ЧЕРНЮК
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

« ____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти
здобувачу вищої освіти Дмитру ШАХРАЮ

1. Тема «Аналіз рівня енергетичного безпеки при застосуванні вакуумних шунтуючих струмообмежуючих пристроїв»
затверджена наказом по університету № 4801-5/3345 від «12» жовтня 2024 р.

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

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Технічні характеристики ВШСП, Принцип дії вакуумних шунтуючих пристроїв та їх ефективність у різних умовах, Характеристики навантаження та режимів роботи електричних мереж.

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):
ВСТУП; РОЗДІЛ 1. СПОСОБИ ТА ЗАСОБИ ОБМЕЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КОМУТАЦІЙНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ; РОЗДІЛ 2. ПІДГОТОВКА МОДЕЛЮЮЧОГО КОМПЛЕКСУ ТА ПРОГРАМА ДОСЛІДЖЕНЬ ОБМЕЖЕННЯ СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В ЕС ДБЖ; РОЗДІЛ 3. ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВАКУУМНИХ СТРУМООБМЕЖУВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ШУНТУЮЧОГО ТИПУ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ РІЗНОГО РІВНЯ НАПРУГИ; ВИСНОВКИ

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

6. Консультант:

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

7. Дата видачі завдання «12» жовтня 2024 р.

Керівник

(підпис)

Юлія ОЛІЙНИК

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Дмитро ШАХРАЙ

(ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної дипломної роботи

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження	12.10.24 – 15.10.24	
2	Проведення аналізу наукової літератури	16.10.24 – 23.10.24	
3	Виконання першого розділу дипломної роботи	24.10.24 – 01.11.24	
4	Виконання другого та третього розділу дипломної роботи	02.11.24 – 26.11.24	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.24 – 07.12.24	

Студент (ка)

(підпис)

Дмитро ШАХРАЙ

(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль

(підпис)

Юлія ОЛІЙНИК

(ім'я, прізвище)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. СПОСОБИ ТА ЗАСОБИ ОБМЕЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КОМУТАЦІЙНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

1.1. Загальна характеристика комутаційних перехідних процесів

1.2. Напрями досліджень з розробки ефективних засобів обмеження параметрів комутаційних перехідних процесів в електричних мережах

1.3. Можливість застосування вакуумних комутаційних апаратів як СОП

1.4. Процеси при роботі вакуумних комутаційних апаратів. Сучасні тенденції застосування вимикачів у розподільних мережах 6 (10) кВ

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

РОЗДІЛ 2. ПІДГОТОВКА МОДЕЛЮЮЧОГО КОМПЛЕКСУ ТА ПРОГРАМА ДОСЛІДЖЕНЬ ОБМЕЖЕННЯ СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В ЕС

2.1. Модель фрагмента електричної мережі для проведення дослідження

2.2. Моделі елементів електричної мережі у форматі моделюючого комплексу

2.3. Програма досліджень обмеження струмів короткого замикання та апробація моделі

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

РОЗДІЛ 3. ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВАКУУМНИХ СТРУМООБМЕЖУВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ШУНТУЮЧОГО ТИПУ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ РІЗНОГО РІВНЯ НАПРУГИ

3.1. Процеси аварійного вимкнення елементів електричної мережі

3.2. Перспективи застосування вакуумних струмообмежувальних пристроїв

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЕЕ – електрична енергія

ЛЕП – лінії електропередавання

ПЛЕП - -повітряні лінії електропередавання

Т – силовий трансформатор

ТС – трансформатор струму

ТН – трансформатор напруги

КЗ – коротке замикання

СОП – струмообмежуючий пристрій

ШСОП - шунтуючі струмообмежуючі пристрої

СМ - синхронні машини

РЕФЕРАТ

до магістерської роботи на тему

«Аналіз рівня енергетичної безпеки при застосуванні вакуумних шунтуючих струмообмежуючих пристроїв»

ШАХРАЯ ДМИТРА

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

Сучасні енергетичні системи стикаються з численними викликами, серед яких значне місце займає проблема забезпечення енергетичної безпеки. Одним із ключових аспектів цієї проблеми є надійність і стабільність роботи електромереж у умовах зростаючого навантаження та можливих аварійних ситуацій. Вакуумні шунтуючі струмообмежуючі пристрої (ШСОП) є інноваційними рішеннями, що дозволяють суттєво підвищити рівень енергетичної безпеки, запобігаючи пошкодженням електроустаткування та знижуючи ризик аварій.

Метою даної магістерської роботи є аналіз рівня енергетичної безпеки при застосуванні вакуумних шунтуючих струмообмежуючих пристроїв у сучасних електромережах. В рамках роботи розглядаються методи і засоби підвищення енергетичної безпеки, аналізуються технічні характеристики і ефективність ШСОП, а також проводиться оцінка їхнього впливу на стабільність роботи електромережі.

Дослідження проводилось із використанням методів математичного моделювання, аналітичних розрахунків та експериментальних досліджень. У роботі застосовувалися сучасні програмні комплекси для моделювання електричних мереж та аналізу електромагнітних процесів.

Проведений аналіз сучасного стану проблеми енергетичної безпеки показав, що використання вакуумних шунтуючих струмообмежуючих

пристроїв є перспективним напрямом для підвищення надійності електромереж.

Досліджені принципи роботи ШСОП показали їх високу ефективність у запобіганні коротким замиканням та перевантаженням у електромережах.

Оцінка ефективності застосування ШСОП підтвердила їх здатність підвищувати стабільність та надійність роботи електромережі, знижуючи ризик аварійних ситуацій.

ЕНЕРГЕТИЧНА БЕЗПЕКА, СТРУМООБМЕЖУЮЧІ РЕАКТОРИ,
ШУНТУЮЧІ РЕАКТОРИ, ВАКУУМНІ ШУНТУЮЧІ РЕАКТОРИ

ABSTRACT

to a master's thesis on

«Analysis of the level of energy safety when using vacuum shunt current limiting devices»

SHAKHRAI DMYTRO

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

Modern energy systems face numerous challenges, among which the problem of ensuring energy security occupies a significant place. One of the key aspects of this problem is the reliability and stability of power grids in the face of increasing load and possible emergencies. Vacuum shunt current limiting devices (shunt current-limiting devices) are innovative solutions that can significantly increase the level of energy security, preventing damage to electrical equipment and reducing the risk of accidents.

The purpose of this master's work is to analyze the level of energy safety when using vacuum shunt current limiting devices in modern power grids. Within the framework of the work, methods and means of improving energy security are considered, the technical characteristics and efficiency of shunt current-limiting devices are analyzed, and their impact on the stability of the power grid is assessed.

The study was conducted using methods of mathematical modeling, analytical calculations and experimental research. The work used modern software systems for modeling electrical networks and analyzing electromagnetic processes.

The analysis of the current state of the problem of energy security showed that the use of vacuum shunt current limiting devices is a promising direction for improving the reliability of power grids.

The investigated principles of operation of shunt current-limiting devices showed their high efficiency in preventing short circuits and overloads in power grids.

Evaluation of the efficiency of the use of shunt current-limiting devices confirmed their ability to increase the stability and reliability of the power grid, reducing the risk of accidents.

ENERGY SAFETY, CURRENT LIMITING REACTORS, SHUNT REACTORS,
VACUUM SHUNT REACTORS

ВСТУП

Актуальність.

Сучасні енергетичні системи стикаються з постійним зростанням навантаження та зростаючими вимогами до надійності та стабільності постачання електроенергії. Однією з ключових проблем є забезпечення енергетичної безпеки, яка включає запобігання аварійним ситуаціям, стабільну роботу електромережі та мінімізацію негативного впливу на обладнання. В умовах збільшення навантаження на електричні мережі, важливим завданням є зниження ризиків, пов'язаних із короткими замиканнями та перевантаженнями.

Вакуумні шунтуючі струмообмежуючі пристрої (ШСОП) представляють собою перспективну технологію для підвищення рівня енергетичної безпеки. Вони здатні ефективно обмежувати струми короткого замикання, запобігати перевантаженням і захищати електроустаткування від пошкоджень. Це особливо актуально для сучасних промислових і комерційних підприємств, де від надійності електропостачання залежить безперервність виробничих процесів і економічна ефективність.

Актуальність даної магістерської роботи визначається необхідністю детального аналізу впливу вакуумних шунтуючих струмообмежуючих пристроїв на рівень енергетичної безпеки. Це дозволить сформулювати практичні рекомендації щодо їх застосування в реальних умовах експлуатації, сприяти підвищенню надійності і стабільності роботи електричних мереж та забезпеченню безпеки енергопостачання. Проведення такого аналізу є важливим кроком на шляху до вдосконалення сучасних енергетичних систем та підвищення їхньої стійкості до аварійних ситуацій.

Надійне та ефективне функціонування електроенергетики, безперебійне постачання споживачів – основа поступального розвитку економіки країни. Сучасні потужні енергооб'єднання представляють собою найскладніші великі енергосистеми з великою кількістю малих енергосистем. Управління розвитком та функціонуванням енергооб'єднання – важлива науково-технічна

та економічна проблема. Завдання управління великими енергооб'єднаннями на сучасному етапі розвитку електроенергетики набувають найважливішого значення.

Збільшуються генеровані потужності, відбувається посилення зв'язків із сусідніми енергосистемами, створюються великі об'єднані системи, що охоплюють як території окремих країн, а й цілі континенти. Що, у свою чергу, призводить до зростання струмів КЗ. Вимоги до електричних апаратів та обладнання визначаються максимальним рівнем струмів короткого замикання. Тому струми КЗ стають критичним параметром, що перешкоджає розвитку електричних систем.

Тому необхідне вдосконалення ізоляції трансформаторів, заміна встановлених вимикачів на вимикачі з більш високою здатністю, що відключає, які володіють великими вагогабаритними показниками. Також можуть бути вжиті інші технічні заходи щодо захисту мережі від КЗ, що призводять до подорожчання та ускладнення обладнання.

Також проблема може бути вирішена за допомогою спеціальних струмообмежувальних пристроїв. Таких як: резистори, що включаються, демпфуючі реактори, тиристорні струмообмежуючі пристрої (СОП) шунтуючого типу. Таким чином, величину максимального рівня струму КЗ можна вважати техніко-економічним параметром, що визначає доцільність заміни обладнання на нове, з більшою термічною та динамічною стійкістю або використання струмообмежувальних пристроїв. Враховуючи, що заміна обладнання – досить високовитратний шлях, на сьогоднішній день активно досліджуються та розробляються струмообмежувальні пристрої (СОП) та заходи, націлені на обмеження рівнів струмів КЗ.

Зростаючий інтерес до цього питання пов'язаний із актуальністю проблеми та розвитком електротехніки, що сприяє створенню нових типів пристроїв струмообмеження.

Використання в електричних мережах СОП нового типу має вирішувати такі проблеми:

- можливість продовжити використання існуючого на станціях та підстанціях комутаційного обладнання при введенні додаткових потужностей або введенні нових ліній;
- можливість зниження витрат на комутаційне обладнання на нових проєктованих об'єктах;
- підвищення надійності роботи системи за рахунок відмови від секціонування електричних мереж 110 - 500 кВ;
- можливість підвищення надійності живлення промислових підприємств;
- зниження теплових та електродинамічних впливів за допомогою обмеження ударних та встановлених струмів КЗ, що сприяє підвищенню надійності та зменшенню зносу наявного електрообладнання;
- можливість розподілу електричної енергії з шин генераторної напруги;
- зменшення втрат електроенергії та напруги за рахунок заміни традиційних струмообмежувальних реакторів.

Одним з варіантів вирішення проблеми обмеження струмів КЗ може бути використання вакуумного вимикача як струмообмежувального пристрою шунтуючого типу. Такий пристрій необхідно встановити на підстанції на шинах низької напруги паралельно групі приєднань, що захищаються. Принцип роботи полягає у створенні штучного короткого замикання (шунтуванні), яке перерозподіляє аварійний струм КЗ між ланцюгом ушкодженого фідера і ланцюгом вакуумного СОП шунтуючого типу, що тягне зниження струму в гілки, що захищається і дозволяє зробити відключення аварійного струму КЗ при найбільш благо менше значення протікаючого струму КЗ, відсутність перехідної напруги, що відновлюється (ПНВ) в момент відключення), після чого необхідно відключити струм КЗ вакуумним СОП шунтуючого типу.

Метою даної магістерської роботи є аналіз рівня енергетичної безпеки при застосуванні вакуумних шунтуючих струмообмежувальних пристроїв у сучасних електромережах. Визначити ефективність таких пристроїв в умовах зростаючого навантаження та можливих аварійних ситуацій, а також

сформулювати рекомендації щодо їх впровадження для покращення надійності та стабільності роботи електроустаткування.

Об'єктом дослідження є енергетичні системи промислових та комерційних підприємств, зокрема електричні мережі, які використовують вакуумні шунтуючі струмообмежуючі пристрої для підвищення надійності та безпеки електропостачання.

Предметом дослідження є вплив вакуумних шунтуючих струмообмежуючих пристроїв на рівень енергетичної безпеки, а також їх технічні характеристики та ефективність в умовах різного навантаження на електромережу.

Для досягнення мети роботи необхідно вирішити наступні **завдання**:

- Вивчити сучасний стан проблеми енергетичної безпеки в електромережах.
- Проаналізувати принципи роботи вакуумних шунтуючих струмообмежуючих пристроїв.
- Провести техніко-економічний аналіз використання ШСОП в умовах зростаючого навантаження на електромережу.
- Оцінити ефективність застосування ШСОП для підвищення надійності та стабільності роботи електроустаткування.
- Розробити рекомендації щодо впровадження ШСОП у промислові та комерційні електромережі.

Магістерська кваліфікаційна робота на тему «Аналіз рівня енергетичного безпеки при застосуванні вакуумних шунтуючих струмообмежуючих пристроїв» складається з таких частин: перелік умовних позначень, вступ, три розділи, висновки й рекомендації, список посилань.

РОЗДІЛ 1. СПОСОБИ ТА ЗАСОБИ ОБМЕЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КОМУТАЦІЙНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

1.1. Загальна характеристика комутаційних перехідних процесів

При будь-яких змінах в електричній мережі (увімкненні, вимкненні, короткому замиканні, обриві, стрибкоподібному зміні будь-якого параметра мережі або амплітуди, частоти або фази напруги джерела тощо), званих комутаціями, у ній виникають перехідні процеси.

Перехідний (динамічний, нестаціонарний) процес – процес, що виникає в електричній мережі при переході від одного стану роботи мережі до іншого.

Перехідні процеси, що супроводжуються зміною електричного стану елементів системи, можуть бути зумовлені природними причинами чи роботою пристроїв автоматики.

Виділяється три види перехідних процесів:

1. Хвильові
2. Електромагнітні
3. Електромеханічні

Хвильові перехідні процеси – процеси, у яких відбувається місцеве зміна електричного стану системи, що супроводжується різким збільшенням електричного розряду в ЛЕП із підвищенням напруги, викликаного атмосферними впливами.

Швидкість перебігу хвильових перехідних процесів лежить у діапазоні від 10^3 - до 10^8 Гц (швидкодіючі). При хвильових перехідних процесах виникають перенапруги, які мають згубний вплив на ізоляцію елементів електричної системи та можуть призвести до її пошкодження/

Електромеханічні перехідні процеси – процеси у яких відбувається зміна електричних і механічних параметрів режиму.

Вони є низькочастотними процесами: швидкість зміни параметрів від 10-1 до 50 Гц.

Електромагнітні перехідні процеси – процеси, за яких змінюється електромагнітний стан елементів електричної системи. У цьому механічні параметри режиму залишаються незмінними. Такі перехідні процеси тривають від 0.0066 до 0.02 с, що відповідає швидкості перебігу від 50 – до 150 Гц.

Електромагнітні перехідні процеси можуть бути викликані:

- включенням та відключенням рухових та інших агрегатів;
- короткими замиканнями (КЗ) та простими замиканнями;
- місцевою несиметрією;
- форсуванням збудження, регуляторами збудження, автоматами гасіння поля тощо;
- включенням синхронних машин (СМ) на несинхронну роботу.

Найбільш поширеними електромагнітними перехідними процесами є процеси, спричинені короткими замиканнями. Виникнення перехідних процесів у ряді випадків небажане та небезпечно. Перехідні процеси можуть супроводжуватися великими перенапругами, надструмами, електромагнітними коливаннями, які здатні порушити нормальну роботу енергосистеми, виявляючи негативне вплив на електрообладнання, до виходу з ладу.

Елементи електричних мереж, здатні запасати енергію: індуктивність та ємність, є основною причиною виникнення перехідних процесів.

Перехідний режим, за своєю суттю – процес переходу енергетичного стану мережі від комутаційного режиму до після комутаційного.

Кожному стану енергосистеми, що встановився, є реактивні складові, що відповідає деякий запас енергії магнітного та електричного полів. Перехід від одного встановленого режиму до іншого пов'язаний із збільшенням чи зменшенням енергії електричного або магнітного полів і супроводжується перехідним процесом. Коли зміна запасу енергії припиняється, перехідний процес закінчується. Якщо енергетичний стан ланцюга не змінюється при комутації перехідні процеси не виникають.

В нормальному режимі параметри електричної системи близькі до номінальним. Для цього режиму характерне плавне регулювання роботи електростанцій, мінімальні втрати електричної енергії в мережах, зручність здійснення оперативних перемикачів. Надійне енергопостачання споживачів без перебоїв, із достатнім рівнем напруга забезпечується за нормального режиму електричної мережі.

За нормальних умов можливі такі комутації, які супроводжуються перехідними процесами:

- ✓ увімкнення/вимкнення конденсаторів;
- ✓ увімкнення/вимкнення шунтуючих реакторів;
- ✓ увімкнення/відключення трансформаторів;
- ✓ зміна навантаження.

Деякі з них можуть спричинити аварійні ситуації. Наприклад, включення шунтуючих конденсаторів або шунтуючих реакторів, а також потужних трансформаторів може супроводжуватися посадкою напруги, великими кидками струмів чи великими перенапругами. Відключення шунтуючих реакторів може спричинити повторні запалювання, які можуть призвести до виникнення хвиль напруги.

Придушення перехідних процесів під час комутації

В ряді випадків, включення-вимкнення або відключення ланцюгів вимикачами в похідні моменти можуть призводити до появи великої перехідної напруги або струму. Ці перехідні процеси протікають у головних ланцюгах, але при цьому можуть наводитися також перехідні процеси в ланцюгах управління та допоміжних ланцюгах, а також у сусідніх низьковольтних системах. Перехідні процеси супроводжуються електричними та механічними навантаженнями на високовольтне обладнання та здатні викликати його поступові чи миттєві ушкодження. Наведені перехідні процеси можуть викликати велику кількість різних перешкод, наприклад, у системах

керування та захисту підстанції, комп'ютерах та процесорах, або у системах зв'язку.

Включення шунтуючих конденсаторів, шунтуючих реакторів і потужних трансформаторів може супроводжуватися великими перенапругами, посадкою напруги або великими кидками струмів. Відключення реакторів, що шунтують, може стати причиною повторних запалювань, що призводять до виникнення хвиль напруги. Амплітуда перехідних процесів залежить від точки на кривих струмів або напруг, у яких відбувається розмикання та замикання контактів вимикачів. У неконтрольованій ситуації комутація раніше чи пізніше трапляється у найгіршій для цього точці кривої.

Навіть якщо сучасний вимикач матиме дуже низьку ймовірність повторних пробойів при включенні ємнісних навантажень або фільтрів придушення гармонік, за статистикою, при великій кількості комутаційних операцій можуть виникнути кілька повторних випадкових пробойів. Цей ризик випадкових пробойів можна знизити за допомогою керованих операцій відключення.

Для обмеження амплітуди перехідних процесів при комутації, після того як вони відбулися, приймають такі традиційні контрзаходи, як резистори, що включають, демпфуючі реактори або резистори, або розрядники. Крім того, можна посилити ізоляцію системи та обладнання для витримування навантажень. Зазначені рішення можуть виявитися неефективними, ненадійними чи дорогими і не вирішують проблему кардинально.

Принцип керованої комутації

Керована комутація є спосіб усунення шкідливих перехідних процесів за допомогою керованих за часом операцій комутації. Команди увімкнення або відключення на вимикач затримуються таким чином, щоб замикання або поділ контактів відбувалися в оптимальний час по відношенню до фазового кута.

За допомогою контролерів Switchsync™ можна керувати операціями подачі та відключення живлення по відношенню до положення точки на кривій струму або напруги, і шкідливі перехідні процеси не генеруються.

Нижченаведений приклад демонструє загальний принцип роботи контролера Switchsync™ для комутації конденсаторної батареї. Щоб уникнути перехідних процесів при комутації момент включення у разі буде за нульовому напрузі. Для спрощення розглядається лише одна фаза.

Відповідні автоматичні вимикачі

Вимикачі з дугогасною камерою під напругою та вимикачі з функцією роз'єднувача компанії АББ мають пружинні приводи. В деяких варіантах альтернативи використовується привід з електродвигуном. Всі ці вимикачі мають стабільний час спрацьовування, яке змінюється лише незначною мірою в залежності від температури навколишнього середовища та напруги, що управляє.

Для забезпечення нормального результату та відповідного обмеження перехідних процесів при комутації, ми рекомендуємо застосовувати контролери Switchsync тільки з елегазовими (SF6) вимикачами з дугогасною камерою під напругою компанії АББ.

Комутація конденсаторних батарей та фільтрів придушення гармонік

Switchsync для вимикачів, встановлених у ланцюзі шунтуючих конденсаторних батарей і фільтрів придушення гармонік, зазвичай використовується для керування включенням.

При підключенні до джерела живлення розряджений конденсатор ідентичний короткозамкнутому ланцюгу. При живленні від джерела з високою напругою великі перехідні напруги та струми можуть створювати серйозні проблеми. Залежно від конфігурації мережі, хвилі напруги можуть викликати пробій у якомусь місці високовольтної мережі, і тоді можливе пошкодження ізоляції або виходу з ладу низьковольтної апаратури. При використанні паралельних конденсаторних батарей пускові струми можуть мати досить високу частоту та більшу амплітуду. У крайніх випадках це становить небезпеку для механічної міцності як конденсаторів, так і вимикачів. Якщо

вимикачем управляти так, щоб напруга в ємнісне навантаження подавалося при нульовій напрузі джерела, шкідливі перехідні процеси виключаються.

На рисунку 1.1. показаний приклад того, як ефективне управління комутацією усуває шкідливі перехідні комутаційні процеси щодо подачі напруга в конденсаторну батарею.

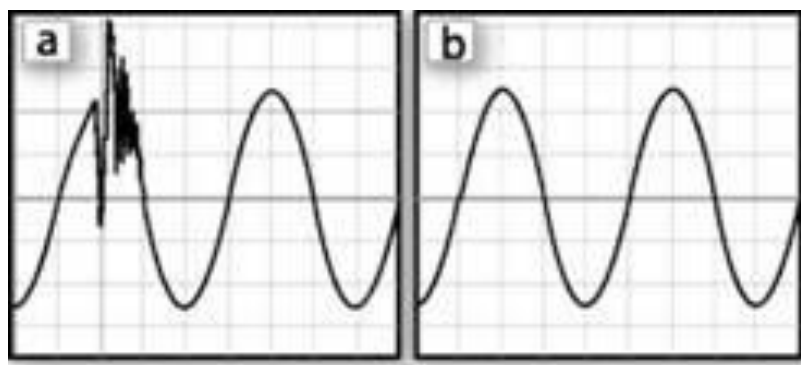


Рисунок 1.1- Перехідна напруга при збудженні однієї фази конденсаторної батареї 72 кВ

a. в невідповідній точці кривої поблизу піка напруги промислової частоти. формується висока перехідна напруга.

b. в разі використання контролера Switchsync збудження виконується поблизу нульового значення напруги, тому перехідні процеси не формуються.

Зазвичай, при трифазній комутації три полюси вимикача слід замикати в різні моменти часу. Зсув часу залежить від конкретного застосування.

Для конденсаторної батареї із заземленою нейтраллю: три полюси повинні замикатися з різницею в $1/6$ періоду (3,33 мс при 50 Гц, або 2,8 мс при 60 Гц).

Для конденсаторної батареї з незаземленою нейтраллю: два полюси повинні замикатися одночасно при нульовому значенні міжфазної напруги, а останній - на $1/4$ періоду пізніше (5 мс за 50 Гц або 4,2 мс за 60 Гц).

Необхідне рознесення за часом для заземленої шунтуючої батареї

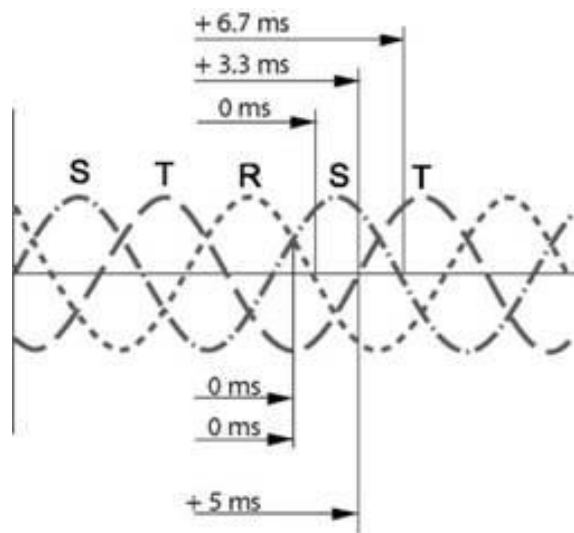


Рисунок 1.2. - Необхідне рознесення за часом для незаземленої шунтуючої батареї

Приклади послідовності комутації для конденсатора шунтуючої батареї 50 Гц. Незначні відхилення часу від нульового значення напруги джерела не враховувалися.

При пополюсному керуванні вимикача контролер Switchsync дозволяє керувати окремо кожним полюсом, щоб забезпечити замикання кожного полюса у відповідний момент. При триполюсному управлінні одним приводом полюса регулюють механічно (розносять), щоб забезпечити замикання в належний час. При комутації конденсаторної батареї або фільтра придушення гармонік конкретний вибір рознесення залежить від:

- з'єднання нейтралі навантаження - із заземленням або без заземлення;
- частоти системи – 50 або 60 Гц.

Вимкнення вимикачів конденсаторних батарей зазвичай не призводить до значних перехідних процесів. Основною причиною цього є відсутність повторних пробіїв при відключенні ємнісного струму.



Рисунок 1.3. - Некероване відключення реактора, що шунтує, призводить до глибоких перехідних процесів повторного запалювання

Кероване відключення реактора, що шунтує, виключає перехідні процеси повторного запалювання. Залишається лише обмежена перенапруга помірної частоти, пов'язана зі зрізом струму.

Однак у особливих випадках важких режимів контролер Switchsync можна застосувати для контрольованого вимкнення вимикачів конденсаторних батарей. Ціль полягає в тому, щоб виключити навіть невелику ймовірність повторного пробоя, і вимикачем управляють так, щоб виключити можливість малого часу горіння дуги.

Підходящими типами контролера Switchsync для вимикачів, що комутують конденсаторні батареї, є:

- Вимикач із триполюсним керуванням: Тільки для включення: Switchsync E113 Для увімкнення та вимкнення: Switchsync E213
- Вимикач з пополюсним керуванням: Тільки для увімкнення або увімкнення/вимкнення: SwitchsyncF236

Комутація шунтуючих реакторів

З вимикачами в ланцюзі шунтуючих реакторів, контролер Switchsync зазвичай застосовують для управління відключенням. Неконтрольоване відключення напруги буде призводити до повторного запалювання щонайменше в одному полюсі. При цьому дуже круті перехідні напруги можуть загрожувати ізоляції реактора через нерівномірний розподіл за обмотками. Існує ризик того, що градієнти напруги можуть пробити ізоляцію реактора, що через деякий час може призвести до повного пробоя. Ізоляція сусіднього обладнання може бути пошкоджена. Керуючи операцією

розмикання контактів та зміщуючи момент розмикання досить далеко від нуля струму, повторні запалення можна виключити. Перехідна напруга, що залишається, являє собою безпечну перенапругу зрізаного імпульсу відносно невеликої частоти. В деяких випадках керують також включенням реактора, що шунтує. Процес комутації аналогічний включенню ненавантаженого трансформатора і може призводити до великого кидка струму і нульової струму послідовності з відповідними електромеханічними навантаженнями. Керування включенням вимикача зводить до мінімуму ці явища.

Вимикачі, що комутують шунтуючі реактори, зазвичай мають пополюсне керування, оскільки встановлюються в мережах з високими номінальними напругами.

Комутація силових трансформаторів

Для вимикачів у ланцюгу силових трансформаторів контролер Switchsync використовується для керування операціями увімкнення, щоб обмежити кидки струмів. Неконтрольована подача напруги в невідповідних точках кривої викликає сильні кидки струму, що повільно загасають. В результаті обмотки відчують механічну напругу, наводяться перешкоди у вторинних ланцюгах через великі струми нульової послідовності, і відбуваються спотворення струмів вищими гармоніками.

Режим із некерованою подачею напруги на силовий трансформатор

При симетричному магнітному потоці в осерді трансформатора струм має невелике значення, але навіть при невеликій асиметрії швидко зростає внаслідок насичення сердечника. Кероване увімкнення напруги забезпечує симетрію магнітного потоку з моменту включення.

Операція включення повинна виконуватися у відповідний момент часу, з урахуванням залишкового магнітного потоку в осерді трансформатора.

Існують три основні способи управління вимикачем:

1. При ігноруванні залишкового магнітного потоку достатньо управляти операціями включення. Цей простий спосіб забезпечує обмеження

максимальних величин кидка струму навіть у разі, якщо є залишковий магнітний потік.

2. Здійснюється управління операціями відключення вимикача, щоб отримати певний залишковий магнітний потік, що повторюється, в сердечнику трансформатора. Струм холостого ходу зазвичай переривають поблизу переходу через нульове значення, і залишковий магнітний потік у сердечнику завдяки цьому близький до нуля. Потім керують наступною операцією включення, щоб звести до мінімуму кидок струму. Однак іноді вибирається більш високе значення залишкового магнітного потоку, так як це пов'язано з нижчим навантаженням вимикача при формуванні дуги наступної операції включення. Завдяки цьому також підвищується точність роботи вимикача.

Цей спосіб придатний для регулярної запланованої комутації трансформаторів у режимі без навантаження. Він застосовується в ситуаціях, коли один і той же вимикач завжди виконує операції увімкнення та відключення.

3. Операції відключення виконують без управління, якщо результуючий залишковий магнітний потік визначається шляхом інтегрування напруги трансформатора. Сигнали напруги на контролер для цього процесу можуть прямувати від звичайного трансформатора напруги або від ємнісного трансформатора напруги, встановленого поряд з трансформатором.

За результатами обчислення залишкового магнітного потоку керування наступною операцією включення здійснюється таким чином, щоб звести до мінімуму кидок струму. У такому режимі роботи залишковий магнітний потік може значно змінюватися від операції до операції, а фактичні операції включення можуть виконуватися різні моменти часу щодо кривої напруги живлення.

Цей спосіб в основному придатний для ситуацій з незапланованими операціями в умовах комутації, що змінюються, і працює також при операціях відключення у зв'язку з несправностями в системі. Оскільки кожен полюс

потребує незалежного управління, такий спосіб вимагає пополюсного управління вимикачем трансформатора.

Комутація ліній надвисокої напруги

Традиційний спосіб обмеження перенапруг, що виникають при включенні та автоматичному повторному включенні ненавантажених надвисоковольтних ліній полягає у використанні вимикачів, обладнаних резисторами. Однак метод керованої комутації лінійних вимикачів все більш широко розглядається як альтернативне рішення, а також часто як часткове рішення в ситуації, коли з метою захисту від перенапруги застосовують обмежувачі перенапруг для оптимального обмеження комутаційних перенапруг. Вимикачі такого рівня напруги зазвичай мають пополюсне управління.

Для некомпенсованих ліній керовану комутацію вимикачів можна організувати двома різними способами:

1. Заряд, розподілений на лінії після операції вимкнення, не записується. При включенні управління вимикачем організують таким чином, щоб включати струм приблизно в момент, коли миттєва напруга на підстанції дорівнює нулю. Тим самим вдається обмежити великі перенапруги незалежно від фактично розподіленого заряду. Цей спосіб простий і часто забезпечує відповідний результуючий рівень перенапруги, особливо коли застосовується у поєднанні з обмежувачами перенапруг. У багатьох випадках розподілений заряд буде фактично нульовим або близьким до нуля. Це буде місце, коли після операції відключення пройшло достатньо часу, або навіть при швидких операціях повторного включення, якщо лінія обладнана магнітними трансформаторами напруги.

2. Комутаційні перенапруги обмежуються ефективніше, коли заряд, розподілений на лінії, записується та враховується керуючим пристроєм. Це рішення особливо корисно за умов, коли очікується великий розподілений заряд, тобто. при швидких операціях повторного включення за умов

застосування ємнісних трансформаторів напруги. Величину розподіленого заряду можуть записувати ємнісні трансформатори напруги.

У поперечно скомпенсованих лініях взаємодія між лінійною ємністю та індуктивністю реактора призводитиме до коливань напруги в лінії після відключення. В цьому випадку, через коливання напруги на лінії, трансформатори напруги, підключені до лінії, забезпечуватимуть правильні сигнали напруги.

Для керованої комутації потрібні лінійні автоматичні вимикачі з пополюсним керуванням. Повторне включення може бути відрегульовано на момент трохи пізніше за нульове значення фазної напруги на стороні живлення.

Адаптивне керування

Усі контролери Switchsync мають спеціальні функції контролю операції керованої комутації.

Адаптивне керування може бути організовано двома способами і застосовуватися як для керованого включення, так і для керованого відключення.

Відхилення від заданих значень може бути викликані відмінностями робочих умов. Робочі умови, які можуть вплинути на час спрацьовування вимикача, - це, наприклад, обгорання контактів, що поступово збільшується, внаслідок багатьох циклів комутації, зміна температури навколишнього середовища і зміна допоміжної напруги.

Принцип дії адаптивного управління полягає в тому, що виявлена похибка компенсується наступною керованою операцією.

Якщо вимикач має відхилення часу спрацьовування від значення, встановленого контролером Switchsync™, сигнал зворотного зв'язку адаптації датчика з'явиться трохи пізніше або трохи раніше, ніж очікувалося. Коли контролер виявив помилку, внутрішній час витримки буде змінено для наступної операції так, щоб вимикач повернувся до розрахункового часу спрацьовування.

Адаптивне керування

Усі контролери Switchsync мають спеціальні функції контролю операції керованої комутації.

Адаптивне керування може бути організовано двома способами і застосовуватися як для керованого включення, так і для керованого відключення.

Відхилення від заданих значень може бути викликані відмінностями робочих умов. Робочі умови, які можуть вплинути на час спрацьовування вимикача, - це, наприклад, обгорання контактів, що поступово збільшується, внаслідок багатьох циклів комутації, зміна температури навколишнього середовища і зміна допоміжної напруги.

Принцип дії адаптивного управління полягає в тому, що виявлена похибка компенсується наступною керованою операцією.

Якщо вимикач має відхилення часу спрацьовування від значення, встановленого контролером Switchsync™, сигнал зворотного зв'язку адаптації датчика з'явиться трохи пізніше або трохи раніше, ніж очікувалося. Коли контролер виявив помилку, внутрішній час витримки буде змінено для наступної операції так, щоб вимикач повернувся до розрахункового часу спрацьовування.

Приклад увімкнення шунтуючої конденсаторної батареї з контуром зворотного зв'язку по моменту виникнення струму

Для вимикачів із пополюсним керуванням адаптивне керування може бути організоване окремо для кожного полюса.

В разі вимикачів із триполюсним керуванням зі зміщенням часу спрацьовування механічним способом контролюється лише один полюс. Інші два полюси мають механічне з'єднання з керованим полюсом

У всіх контролерах передбачено адаптивне введення сигналів для компенсації систематичних змін часу спрацьовування вимикача. Крім того, у контролерах Switchsync F236, T183 та L183 передбачено введення двох зовнішніх адаптивних сигналів (наприклад, зміни температури та керуючої

напруги). Ці функції дозволяють підвищити точність синхронізації керованого вимикача. Крім того, контролери мають пам'ять даних для зберігання інформації про часи комутації і завдяки цьому допускають контроль стану вимикача.

1.2. Напрями досліджень з розробки ефективних засобів обмеження параметрів комутаційних перехідних процесів в електричних мережах

Максимальний рівень струмів КЗ для розподільчих мереж 6 - 10 кВ обмежується технічними параметрами струмопроводів, електричних апаратів, стійкістю рухового навантаження та термічною стійкістю кабелів.

На сьогоднішній день існує багато способів обмеження струмів короткого замикання таких як:

- ✓ Підвищення напруги мереж живлення.
- ✓ Зменшення числа ступенів трансформації напруги.
- ✓ Секціонування збірних шин при розімкнених секційних вимикачів.
- ✓ Застосування трансформаторів з розщепленими обмотками та секційних реакторів
- ✓ Застосування лінійних реакторів
- ✓ Предвключені резистори
- ✓ Демпфуючі реактори або резистори, а також розрядники
- ✓ Посилення ізоляції системи та обладнання для витримування вищих струмів.
- ✓ Тиристорні ТОУ

Якщо супутні витрати на обмежувачі струмів КЗ або заходи обмеження струмів КЗ окупаються завдяки можливості використання більш дешевих комутаційних пристроїв і струмоведучих частин, причому підвищується надійність електропостачання споживачів, то використання таких заходів вважається економічно вигідним.

Найбільш поширені та дієві з них: Секціонування збірних шин при розімкнених секційних вимикачах; застосування трансформаторів з розщепленими обмотками нижчої напруги та використання струмообмежувальних реакторів.

Секціонування електричних мереж – ефективний засіб, яке дозволяє зменшити рівні струмів короткого замикання в електричній мережі в 1,5 - 2 рази.

Для обмеження струмів КЗ. у потужних електроустановках використовуються реактори, також при пошкодженнях за реакторами вони дозволяють підтримувати напруги на шинах на певному рівні.

Тиристорні струмообмежуючі пристрої (СОП)

Тиристорний струмообмежуючий пристрій шунтового типу (СОП) призначене для промислових та міських розподільчих підстанцій середнього класу напруги 6-10 кВ. СОП призначено для підвищення комутаційної спроможності електромеханічних вимикачів, встановлених на підстанціях (вакуумних, масляних, елегазових та інших) при невідповідності комутаційної спроможності цих вимикачів та реальної потужності струму короткого замикання (КЗ). Одночасно СОП знижує динамічний та термічний вплив на кабельну мережу 6-10 кВ, знижуючи ударну хвилю струму КЗ. Комутаційна здатність вимикачів, що захищаються, збільшується не менше ніж у три рази.

Вакуумний СОП шунтуючого типу – комутаційний пристрій, який одночасно виконує функції короткозамикача та вимикача. Тому до нього застосовуються такі вимоги:

- швидке включення (одиниці мілісекунд) та здатність витримувати струми КЗ протягом певного встановленого часу (функції короткозамикача).
- відключення струмів КЗ та здатність витримувати ПВН (функції вимикача).

Досліджувані вакуумні СОП шунтуючого типу дозволяють відключати струми КЗ великої величини. Вакуумні СОП є аналогом тиристорного ТОУ: у нього є два основних і один (або більше) керуючий електрод. Коли на сигнал

управління приходить команда на електрод, що управляє, відбувається включення основного ланцюга.

Таким чином, завдання використання вакуумних вимикачів як СОП актуальне і може сприяти розширенню сфери їх застосування, а також можливості створення принципово нових СОП для електротехніки та електроенергетики.

Принцип дії ТОВ полягає в наступному. При виникненні контуру короткого замикання на одному з фідерів, що відходять на підстанції, струм КЗ від системи електропостачання та електродвигунів підживлення (за наявності) надходить через вимикач несправного приєднання до точки КЗ. Величина струму КЗ обмежується потужністю системи електропостачання, реактивністю знижувального трансформатора, реактора (за його наявності) та опором від до точки КЗ.

При виникненні КЗ через всі елементи схеми електропостачання поширюється аперіодична ударна хвиля струму КЗ, яка в граничних випадках може досягати значення 2,55 від встановленого значення струму КЗ. Якщо в навантаженні на інших фідерах є електродвигуни, то вони забезпечують додаткове підживлення точки КЗ, величина якої залежить від встановленої потужності електродвигунів та їх типу.

Кабельні мережі 6/10 кВ при КЗ також піддаються додатковому термічного та динамічного впливу, особливо місця муфтових з'єднань, що знижує їхню експлуатаційну надійність. Установка ТОВ на підстанції істотно змінює характер процесу аварійного струму КЗ несправного приєднання.

СОП є потужним безконтактним комутатором. змінного струму, послідовно з яким встановлений активний резистор. Величина резистора визначається потужністю трансформатора, що живить, ступенем струмообмеження. СОП підключається паралельно до кожної секції збірних шин 6-10 кВ підстанції.

Включення СОП під час аварійного режиму КЗ утворює штучний контур короткого замикання, підключений паралельно контуру КЗ. При цьому

відбувається перерозподіл струму КЗ від живильного трансформатора між контуром реального КЗ та контуром увімкненого СОП. Характер струмоперерозподілу залежить від точки видалення реального КЗ від секції збірних шин підстанції за допомогою СОП контуру штучного КЗ, паралельного контуру природного КЗ, що істотно впливає на величину ударної хвилі струму КЗ. На наведених нижче осцилограмах роботи СОП в умовах реального КЗ видно, що аперіодична складова ударної хвилі струму навіть нижче встановленого значення струму КЗ. Система струмообмеження на основі СОП збільшує комутаційну здатність фідерних вимикачів не менше ніж утричі.

На рисунку 1.4 показані осцилограми, зняті при натурних випробуваннях одного з пристроїв СОП, встановленого на розподільчій ПС із трансформаторами потужністю 40 МВА. Місце короткого замикання знаходилося прямо на вихідних шинах одного з резервних масляних вимикачів. На осцилограмах можна чітко бачити процес зняття ударної хвилі струму КЗ з аварійного приєднання.

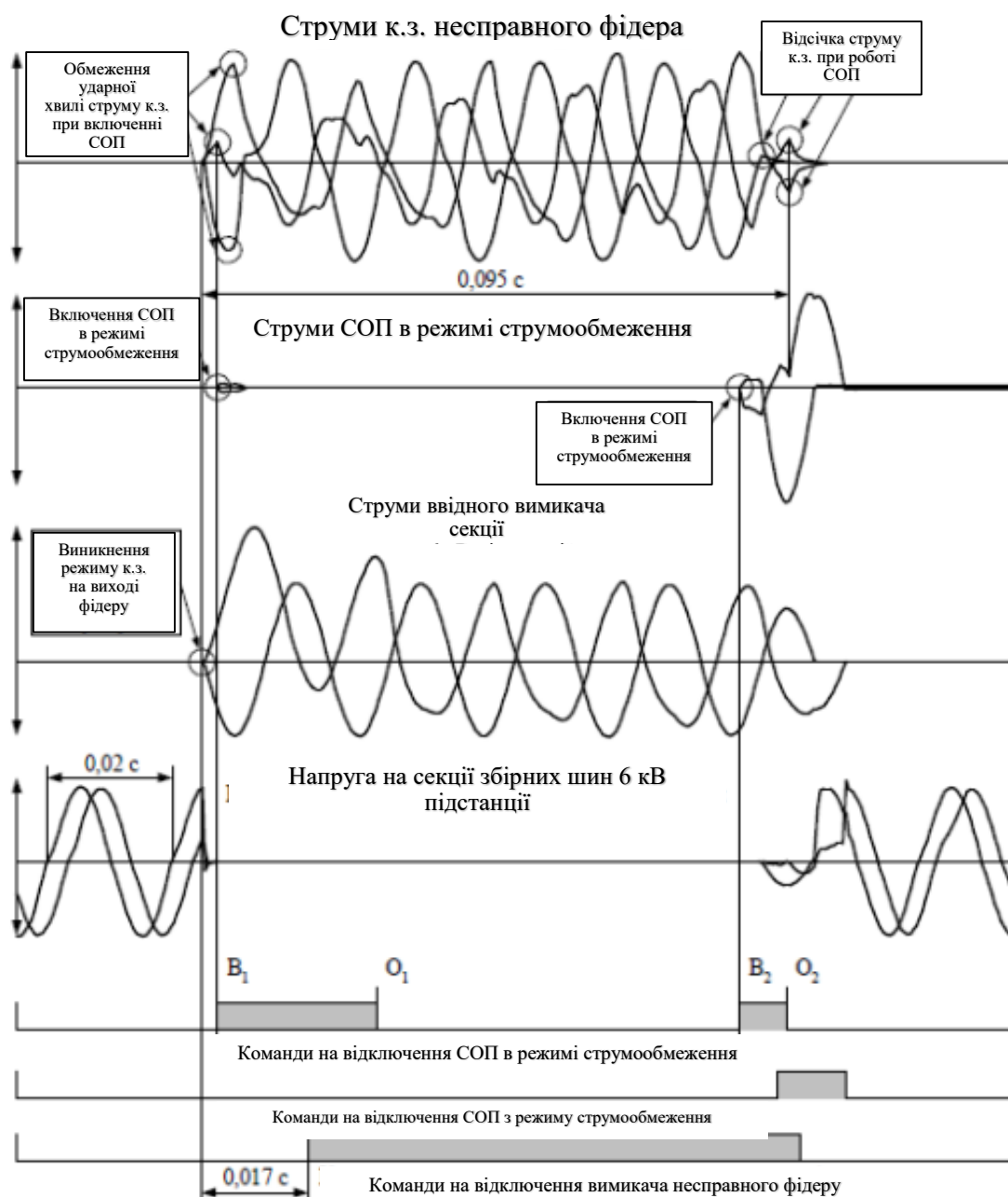


Рисунок 1.4 – Епюри осцилограм при роботі ТОУ в режимі струмообмеження та короткому замиканні поблизу секції збірних шин підстанції

Технічні характеристики СОП представлені в таблиці 1.1:

Таблиця 1.1 - Технічні характеристики СОП

Номінальна напруга, В	6
Потужність трансформатора, що живить, кВА	63000
Струм динамічної стійкості, тривалість 0,02 с, кА, не менше	60
Термін служби	10 років
Умови експлуатації: закриті опалювальні приміщення з температурою, °С	від 0 до +40
Число включень	10000
Охолодження – природне, повітряне	

Мікроконтролерна система управління СОП виконує такі функції:

- ✓ автоматичне включення СОП через 0,02 секунд після виникнення короткого замикання одному з приєднань підстанції;
- ✓ автоматичне подання команди на вимкнення вимикача несправне приєднання після включення СОП;
- ✓ автоматичне відключення СОП після ліквідації аварійного режиму короткого замикання.

В основі напряму дослідження комутаційних перехідних процесів в електричних мережах лежать практичні дослідження властивостей комутаційних пристроїв, а також теоретичні обґрунтування цих досліджень. В даний час актуальність набувають вакуумні комутаційні апарати, у дослідженнях використовуються експериментальні зразки швидкодіючого керованого вимикача, а також швидкодіючого пристрою, що комутує, на основі РВУ.

Дослідження комутаційних характеристик БУВВ показують, що при підключенні реактивного навантаження (конденсаторної батареї та повітряного реактора) продемонстрували правильність прийнятих технічних рішень. При підключенні конденсаторної батареї вимикач забезпечував необхідну точність увімкнення $\Delta t < 0,1$ мс щодо нуля напруги. Після нуля струму зсув фази подальшого включення РВП не перевищував 1 мс. У цьому

випадку відносні кидки струму не перевищували струм, що встановився в конденсатор після його підключення.

1.3. Можливість застосування вакуумних комутаційних апаратів як СОП

Ефективним способом обмеження струмів короткого замикання (КЗ) є короткочасне шунтування точок КЗ на фідерах, що відходять з допомогою поперечно включаються (шунтуючих) комутаційних пристроїв, приєднаних до шин підстанцій. До практичних виходів можна віднести лише результати в індивідуальному тиристорні струмообмежувальні пристрої (СОП) напругою 6-10 кВ. Вакуумні вимикачі в цих пристроях використовуються як захисних (дублюючих) пристроїв.

Водночас вакуумні вимикачі напругою 6, 10, 20, 35 кВ, серійно випускаються промисловими підприємствами електротехнічної галузі, за основними технічними та експлуатаційними показниками цілком конкурентоспроможні з тиристорними ТОВ. Перевагами вакуумними вимикачів є: ширша номенклатура виробів, серійність виробництва, знижені розрахункові витрати, велика практика експлуатації в електричних мережах.

Можливості використання вакуумних вимикачів як комутаційних апаратів у складі шунтуючих СОП частково можуть бути оцінені на основі аналізу відповідності їх технічних характеристик умовам розв'язуваного завдання. Як відомо, час включення-відключення таких вимикачів з урахуванням роботи приводів становить десятки мілісекунд, а замикання-розмикання їх контактів здійснюється за частки мілісекунди. Розкид часу роботи приводів вакуумних вимикачів не перевищує двох мілісекунд, що дозволяє вибирати та реалізовувати оптимальні моменти щодо цих комутацій. Вимикаюча здатність вимикачів струму короткого замикання відповідає струмам КЗ переважної більшості електричних підстанцій середньої напруги.

Їхня номінальна напруга в найближчій перспективі буде піднята до 110 кВ.

Деяким обмеженням є ресурс роботи вимикачів, використовуються на потужних електричних підстанціях, де струми КЗ близькі до їх відключає здібності. Однак і в цих умовах вимикачі витримують до капітального ремонту 40-50 циклів «відключення включення», що є прийнятним для багатьох випадків практичного застосування цих вимикачів у складі СОП шунтуючого типу. При цьому слід враховувати, що при організації синхронних циклів «відключення включення» ресурс вимикачів у складі СОП типу шунту, може бути кратно збільшено. Щодо лінійних вимикачів очікується, що їх ресурс зросте за рахунок значного обмеження струмів КЗ, що відключаються.

1.4. Процеси при роботі вакуумних комутаційних апаратів Сучасні тенденції застосування вимикачів у розподільних мережах 6 (10) кВ

Вакуум є ідеальним ізоляційним середовищем, оскільки ймовірність іонізації молекул газу шляхом зіткнення з ними електронів надзвичайно мала. Однак досвід показує, що за досить великої напруженості електричного поля $10\text{-}10^3$ В/см навіть у найдосконалішому технічному вакуумі з'являється електричний струм, який швидко зростає при подальшому збільшенні напруженості поля до пробою.

Вакуумні комутаційні пристрої здатні викликати значні перенапруги при відключенні індуктивних навантажень (Ненавантажені трансформатори, електродвигуни в режимі пуску). В силу особливих властивостей вакууму ці перенапруги за своїм характером можуть відрізнятися від перенапруг, створюваних у тих самих умовах комутаційними апаратами, у яких використовується інша дугогасне середовище (повітря, елегаз або олія). При комутації електричної мережі вакуумними вимикачами виникають такі явища: попередні пробої при включенні, зріз струму при відключенні, повторні запалення дуги при відключенні та віртуальний зріз струму.

Крім того, на величину перенапруг і кидків струму впливає неодночасність спрацьовування полюсів апарату. Зріз струму при відключення є найбільш відомим і найбільш поширене явище, яке трапляється

у всіх типах вимикачів. Під зрізом струму розуміється передчасне переривання змінного струму перед його природним переходом через нульове значення.

Механізм розвитку перенапруг зрізу струму полягає в наступному: При протіканні струму в індуктивному навантаженні утворюється запас електромагнітної енергії. Розрив контуру, що містить індуктивність, при значенні струму, відмінного від нульового значення, супроводжується перетворенням цієї енергії на інші види енергії, зокрема, енергію електричне поле. В результаті відбувається підвищення напруги з сторони навантаження, характерний процес зміни якого представлений на рисунку 1.5.

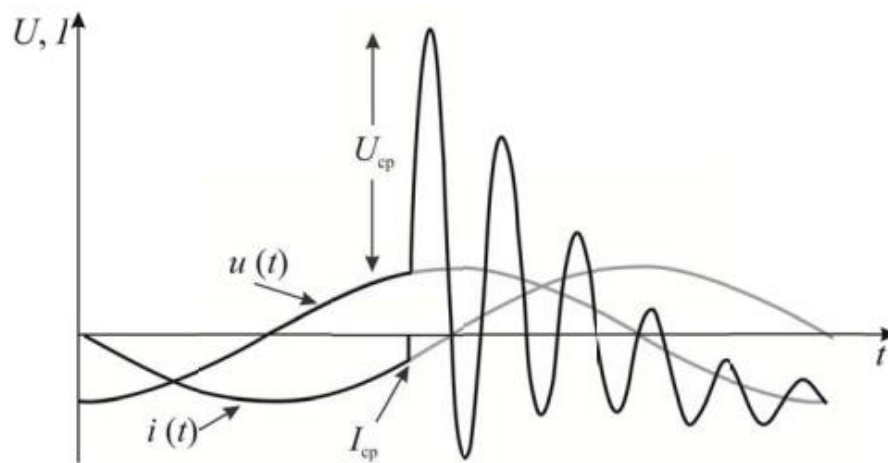


Рисунок 1.5 – Комутаційні перенапруги, спричинені зрізом струму: $U_{\text{ср}}$ – перенапруга, спричинена зрізом струму; $I_{\text{ср}}$ - зріз струму

При відключенні змінного струму вакуумними вимикачами, якщо момент початку розведення контактів не збігається з нулем струму промислової частоти між контактами вимикача запалюється дуга. Дуга горить у парах металу контактів. Концентрація парів металу випадкова та знижується при підході струму до нульового значення. Незадовго до досягнення нуля струму, концентрація пари стає недостатньою для підтримки горіння дуги, і дуга гасне. Цей процес залежить, в основному, від природи контактного матеріалу.

Таким чином, наявність зрізів струмів у вакуумних вимикачах являють собою практично миттєвий ($10^{-7} - 10^{-8}$) обрив малого струму до переходу через

нульове значення, внаслідок нестійкості дуги в середовищі вакууму. Ця поведінка також вимикача дозволяє представити його як модель ідеального ключа, що миттєво переходить з провідного стану в непровідний.

Попередні пробої при включенні та повторні запалювання дуги при відключенні є процес запалювання електричної дуги між контактами вимикача у разі, коли прикладена напруга перевищує електричну міцність міжконтактного проміжку.

Таким чином, систематично можна спостерігати попередні пробої при включенні наприкінці процесу включення. Швидкість зближення контактів та величина напруги, яка прикладена в момент зближення контактів впливає час виникнення попередніх пробів. При відключення повторні запалення дуги виникають на початку процесу відключення у разі, коли час горіння дуги замало.

В цьому випадку проміжок між контактами вимикача недостатній для витримки напруги, що відновлюється, завдяки чому відбувається повторний пробій діелектрика.

Тоді проміжок між контактами вимикача недостатній для витримування напруги, що відновлюється, через що і відбувається повторний пробій діелектрика.

При попередньому пробом або повторному запалюванні дуги коливальний розряд зосереджених ємностей викликає струм високої частоти (104 – 105 Гц), що проходить між контактами вимикача, накладенням струм промислової частоти (рисунок 1.5). Ці явища неминучі характерні всім типів вимикачів. Особливістю вакуумних вимикачів є їх найбільш висока дугогасна здатність та можливість відключати високочастотні струми, що мають дуже висока швидкість переходу через нуль.

Внаслідок цього вакуумні комутаційні апарати дають більше запалювань електричної дуги в порівнянні з іншими типами вимикачів.

Багаторазові запалення електричної дуги в залежності від відстані між контактами змінюються таким чином:

- при включенні амплітуда перенапруг зменшується до змикання контактів;

- при відключенні амплітуда перенапруг зростає (ескалація напруги) до тих пір, поки електрична міцність між контактами вимикача не стане напруга.

При протіканні струму в індуктивному навантаженні утворюється запас електромагнітної енергії достатньою, щоб витримувати напруга, що відновлюється.

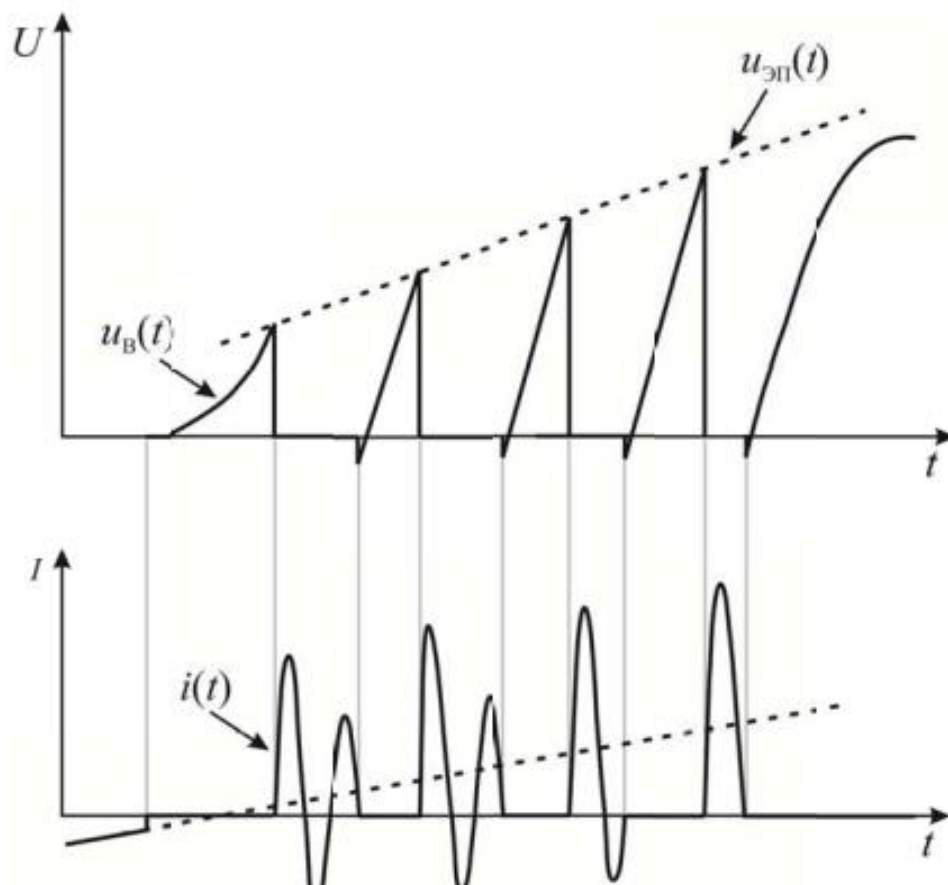


Рисунок 1.6 – Процес запалювання електричної дуги між контактами вимикача: $u_B(t)$ – напруга, що відновлюється між контактами; $u_{ЭП}(t)$ – електрична міцність міжконтактного проміжку; $i(t)$ – високочастотний струм в електричній дузі

Поява багаторазових запалювань електричної дуги супроводжується перенапругами з крутим фронтом, що становить небезпеку, насамперед всього для виткової ізоляції електроустаткування.

Віртуальний зріз струму може виникати в спеціальних конфігураціях електричних мереж, що характеризуються сильними ємнісно-індуктивними зв'язками між фазами. Суть явища ось у чому. При відключенні електричної мережі повторні запалювання дуги в першому нашому плюсі вакуумного вимикача викликають помітні коливання високочастотного струму не тільки в даній фазі, але також і в сусідніх фазах, якими в цей момент часу може проходити струм досить високої величини.

Якщо індуктивний високочастотний струм у сусідній фазі досягне амплітуди того ж порядку, що струм промислової частоти, то виникне нуль струму («Штучний», але реальний, а не віртуальний). Вимикач у цей час може відключити струм до його проходження через природний нуль. В подібних випадках значення струму обриву обчислюється в десятках, навіть у сотнях ампер, а пов'язані зі струмом перенапруги мають дуже високу кратність.

Оптимальним вирішенням питання зниження перенапруг у даному випадку є зрушення моменту часу відключення одного з полюсів вимикача таким чином, щоб протягом тимчасового інтервалу, коли можуть відбуватися багаторазові повторні запалювання дуги, дві інші фази залишалися ще включеними і, відповідно, нечутливими до наведених перешкод.

Неодночасність спрацювання полюсів апарату у процесі комутації викликає короткочасний неповнофазний режим, під час якого можуть відбуватися перенапруги високої кратності. З збільшенням неодночасності замикання контактів перенапруги збільшуються.

Навпаки, комутація кожної окремої фази вимикача в наперед визначений момент часу дозволяє значно знизити кратність перенапруг і амплітуду кидків струму.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1:

У розділі «Способи та засоби обмеження параметрів комутаційних перехідних процесів в електричних мережах» було розглянуто основні аспекти комутаційних перехідних процесів, напрямки досліджень для розробки ефективних засобів їх обмеження, а також сучасні тенденції використання вакуумних комутаційних апаратів у розподільних мережах напругою 6 (10) кВ.

Процеси комутації в електричних мережах супроводжуються виникненням перехідних режимів, що можуть спричиняти різного роду негативні явища, такі як перенапруги, перевантаження та інші аномальні стани. Важливою проблемою є контроль та обмеження параметрів цих процесів для забезпечення стабільної та безпечної роботи електричних мереж.

В ході дослідження були визначені основні напрямки, що включають вдосконалення конструкції комутаційних апаратів, розробку нових матеріалів для їхніх контактів, застосування нових методів управління комутаційними процесами, а також використання різноманітних засобів захисту для зниження впливу перехідних процесів на електроустаткування.

Аналіз роботи вакуумних комутаційних апаратів показав їх високу ефективність у обмеженні параметрів комутаційних перехідних процесів. Вакуумні вимикачі забезпечують швидке гасіння дуги, що сприяє зменшенню перенапруг та зниженню теплового впливу на контакти. Ці апарати демонструють високу надійність і довговічність, що робить їх перспективними для широкого застосування в електричних мережах.

Розвиток розподільних мереж напругою 6 (10) кВ супроводжується збільшенням використання вакуумних вимикачів завдяки їхнім перевагам. Сучасні тенденції включають інтеграцію вимикачів із системами автоматичного управління та моніторингу, що дозволяє забезпечити оперативне реагування на аварійні ситуації та покращити загальну ефективність експлуатації мереж.

Таким чином, розробка та впровадження ефективних способів і засобів обмеження параметрів комутаційних перехідних процесів є важливим кроком

до підвищення надійності та безпеки електричних мереж. Вакуумні комутаційні апарати представляють собою перспективний напрямок для подальших досліджень і впровадження у практику електроенергетики.

РОЗДІЛ 2. ПІДГОТОВКА МОДЕЛЮЮЧОГО КОМПЛЕКСУ ТА ПРОГРАМА ДОСЛІДЖЕНЬ ОБМЕЖЕННЯ СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В ЕС

Для здійснення поставленого завдання вибрано програмний комплекс MATLAB Simulink. Назва програми – скорочення від англійської Matrix Laboratory (Матрична Лабораторія), в російській мові вимовляється як Матлаб.

MATLAB — це інтерактивне середовище та високорівнева мова для програмування, виконання чисельних розрахунків та візуалізації результатів MATLAB дозволяє проводити аналіз даних, створювати алгоритми, розробляти моделі та програми.

Пакет використовують більше мільйона вчених та інженерів, він сумісний з більшістю сучасних операційних систем, у тому числі Linux, Mac OS, Solaris

MATLAB – основа всього сімейства продуктів MathWorks, є головним інструментом для вирішення широкого спектру прикладних та наукових задач, в таких областях як: моделювання об'єктів та розробка систем управління, проектування комунікаційних систем, обробка сигналів та зображень, вимірювання сигналів та тестування, фінансове моделювання, обчислювальна біологія тощо.

MATLAB широко застосовується у таких областях:

- ✓ обробка сигналів та зв'язок;
- ✓ обробка сигналів та зображень;
- ✓ моделювання об'єктів та розробка систем управління;
- ✓ автоматизація тестування та вимірювань;
- ✓ фінансовий інжиніринг та моделювання;
- ✓ проектування комунікаційних систем;
- ✓ обчислювальна біологія тощо.

Програма Simulink – розширення програмного комплексу Matlab.

При моделюванні з використанням Simulink реалізується принцип візуального програмування, відповідно до якого, користувач на екрані з бібліотеки стандартних блоків створює модель пристрою та здійснює розрахунки. При цьому, на відміну від класичних способів моделювання, користувачу не потрібно досконально вивчати мову програмування та чисельні методи математики, а досить загальних знань, що потрібні при роботі на комп'ютері і, природно, знань тієї предметної області, у якій він працює.

2.1. Модель фрагмента електричної мережі для проведення дослідження

Як модель фрагмента електричної мережі для чисельного моделювання обмеження струму при короткому замиканні використовувалося спрощена схема підстанції 110/10 кВ (рисунок 2.1).

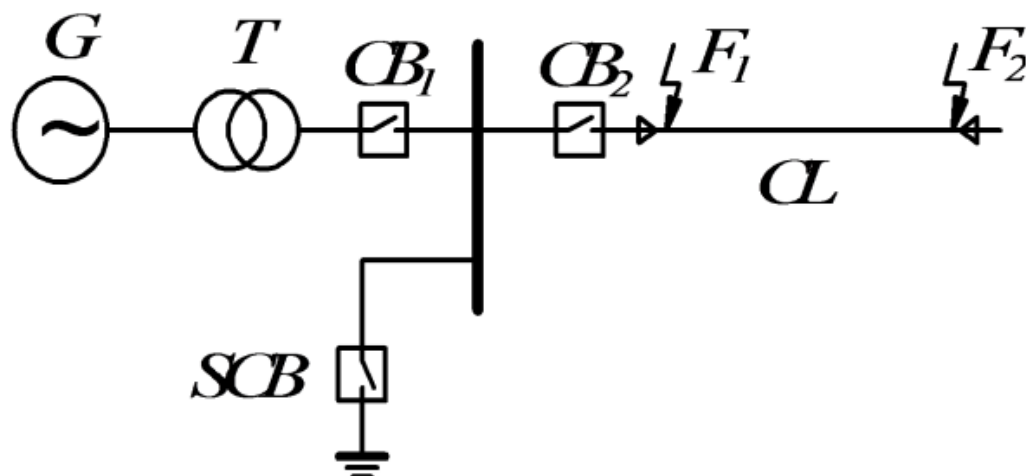


Рисунок 2.1 - Електрична схема для чисельного моделювання обмеження струму за короткого замикання.

Тут: G – еквівалентний генератор енергосистеми, T – силовий трансформатор 110/10. QF1 -лінійний вимикач за трансформатором;

QF2 -лінійний вимикач фідера, що відходить;

SQF-шунтуючий вимикач;

K1 - коротке замикання на початку кабельної лінії;

K2 – коротке замикання наприкінці кабельної.

Проведено серію розрахунків параметрів режиму при трифазних і двофазних КЗ на початку та в кінці кабельної лінії.

Шунтуючий вимикач у досліді включався через резистор з опором 0.01 Ом. Опір необхідний для оптимального перерозподілу струмів кз.

2.2. Моделі елементів електричної мережі у форматі моделюючого комплексу

В форматі MATLAB Simulink є елементи електричної мережі, зображеною на рисунку вище (рис 2.1) представлені в такий спосіб.

Трифазне джерело напруги Three Phase Source - еквівалентний генератор G представлений у вигляді блоку Three Phase Source – трифазне джерело напруги, за допомогою якого виробляється трифазна система напруг. Three Phase Source представлений на рисунку 2.2., вікно завдання параметрів блоку на рисунку 2.3. в даною схемою є енергосистема.

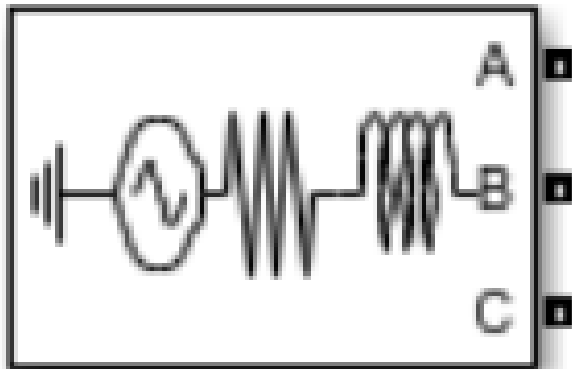


Рисунок 2.2. - Зовнішній вигляд блоку

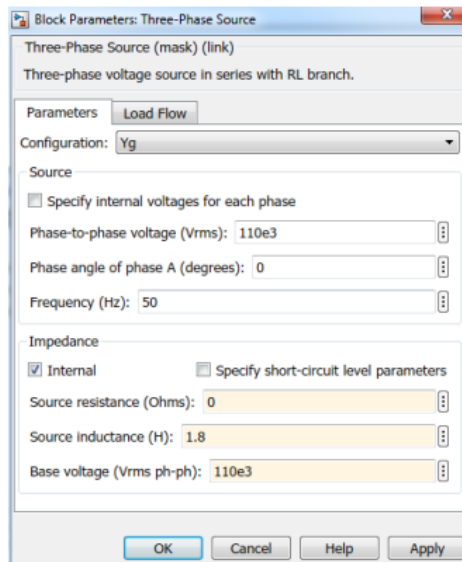


Рисунок 2.3. - Вікно завдання параметрів Three Phase Source

Параметри блоку:

Configuration - Вибір способу з'єднання фаз джерела. Значення вибирається із запропонованого списку:

Y - зірка,

Y_n - зірка з нульовим дротом,

Y_g - зірка із заземленою нейтраллю.

Оскільки ми моделюємо джерело напругою 110 кВ, отже, нам необхідно вибрати спосіб заземлення нейтралі, який використовується в мережах високої напруги - Y_g - зірка із заземленою нейтраллю.

Phase-to-phase voltage (V_{rms}) – у цьому вікні задається чинне значення лінійної напруги. У цій моделі приймається 110 кВ;

Phase angle of phase A (degree) – необхідно задати початкову фазу напруги у фазі А, одиниці вимірювання градуси;

Frequency (H_z) – частота, одиниці виміру – Герці (Гц). Задаємо промислову частоту для мереж, що дорівнює 50 Гц;

Вікно Specify impedance using short-circuit level – завдання власного повного опору джерела використовуючи параметри короткого замикання. У цій моделі не використовується.

Source resistance (O_{hms}) - опір джерела власне, одиниці виміру - Оми (Ом), приймаємо рівним нулю.

Source inductance (H) - індуктивність джерела власна, одиниці вимірювання - Генрі (Гн), приймаємо рівним 1,8 Гн.

Base voltage ($V_{rms\ ph} - ph$) – лінійна базова напруга, Чинне значення. Величина базової лінійної напруги джерела, при якому визначено потужність короткого замикання. Для даної моделі не задається.

Трифазний двообмотувальний трансформатор Three-phase Transformer (Two Windings)

Трансформатор Т представлений як блоку Three-phase Transformer. З його допомогою моделюється трифазний двообмотувальний трансформатор. Модель виконана на базі трьох однофазних трансформаторів. У моделі можливий облік нелінійності характеристики намагнічування матеріалу сердечника.

Three-phase Transformer (Two Windings) представлений рисунку 2.4., вікно завдання параметрів блоку рисунку 2.5.

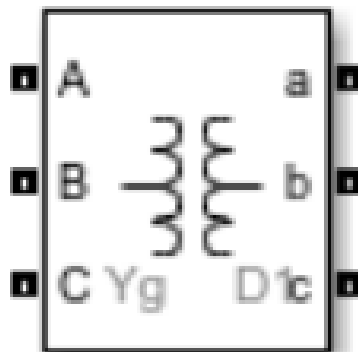


Рисунок 2.4. - Зовнішній вигляд блоку

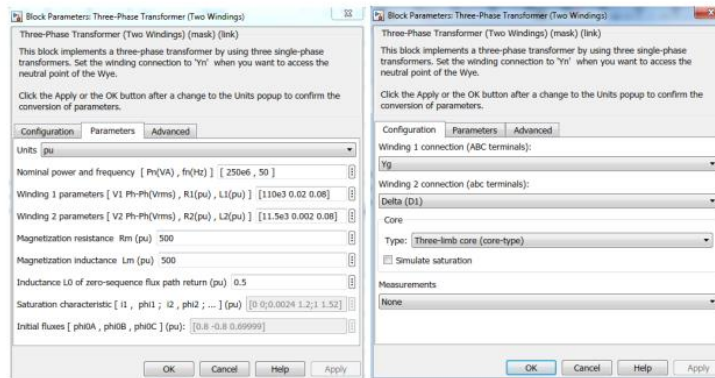


Рисунок 2.5. - Вікно завдання параметрів Three-phase Transformer (Two Windings)

Параметри блоку:

Winding 1 (ABC) connection – вибір схеми з'єднання первинної обмотки.

Winding 2 (abc) connection - вибір схеми з'єднання вторинної обмотки.

Значення параметрів для первинної та вторинної обмоток вибирається зі списку:

- ✓ Y - зірка,
- ✓ Y_n – зірка з нейтраллю,
- ✓ Y_g - зірка із заземленою нейтраллю,
- ✓ Delta(D1) – трикутник першої групи (зсув) напруг у бік випередження на 30° , в порівнянні з з'єднанням у зірку),
- ✓ Delta(D11) - трикутник одинадцятої групи (зсув) напруг у бік відставання на 30° , в порівнянні зі з'єднанням у зірку).

Оскільки високу напругу мережі приймаємо 110 кВ, то для первинних обмоток трансформатора вибираємо спосіб з'єднання Y_g -зірка із заземленою нейтраллю, для вторинних обмоток 10 кВ, згідно з ПУЕ, вибирається з'єднання обмоток до трикутника – Delta(D1) Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)] – номінальна потужність (ВА) та частота (Гц) трансформатора.

Winding 1/2 parameters [$V1\ Ph - Ph(V), R1(pu), L1(pu)$] – параметри первинної/вторинної обмотки. Лінійна напруга (В), активна опір обмотки (в.о.), індуктивність обмотки (в.о.).

Saturable core - сердечник, що насичується. При встановленому прапорці Використовується нелінійна модель трансформатора.

Magnetization resistance $R_m(pu)$ /inductance $L_m(pu)$ – активне опір/індуктивність ланцюга намагнічування (в.о.).

Saturation characteristic (pu) $[i1, \phi1; i2, \phi2]$ – характеристика насичення сердечника. Параметр не використовується у даній моделі.

Параметри ланцюга намагнічування, як і опору, і індуктивності обмоток задаються у відносних одиницях аналогічно моделі лінійного трансформатора. Характеристика намагнічування визначається аналогічно моделі нелінійного трансформатора.

Трифазна послідовна RLC-ланцюг Three-Phase Series RLC Branch

Для обліку опорів ліній електропередач використовуються блоки Three-Phase Series RLC Branch – трифазний послідовний RLC-ланцюг.

Three-Phase Series RLC Branch дозволяє змодельовати трифазний ланцюг, що складається з трьох RLC-ланцюгів. Зовнішній вигляд блоку представлений рисунку 2.6, вікна завдання параметрів блоку для ЛЕП 110 кВ, ЛЕП 10 кВ і шунта на секції шин на рисунках 2.7, 2.8 і 2.9 відповідно.

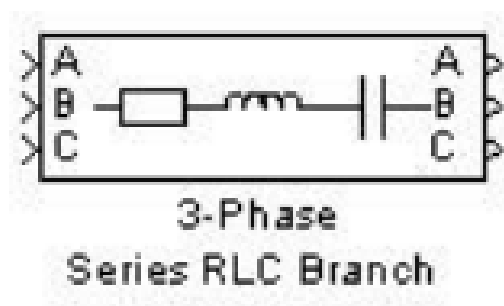


Рисунок 2.6. - Зовнішній вигляд блоку Three-Phase Series RLC Branch

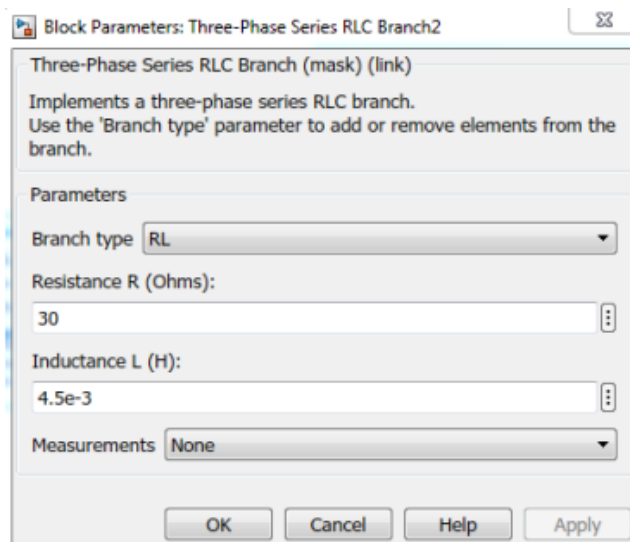


Рисунок 2.7. - Вікно завдання параметрів Three-Phase Series RLC Branch для ЛЕП 110 кВ

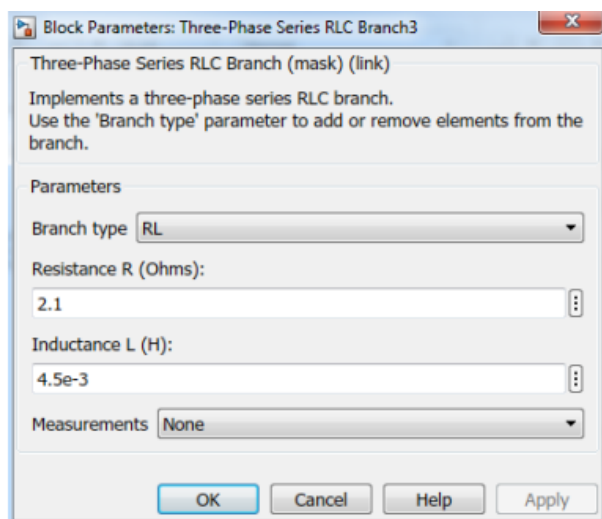


Рисунок 2.8. - Вікно завдання параметрів Three-Phase Series RLC Branch для ЛЕП 10 кВ

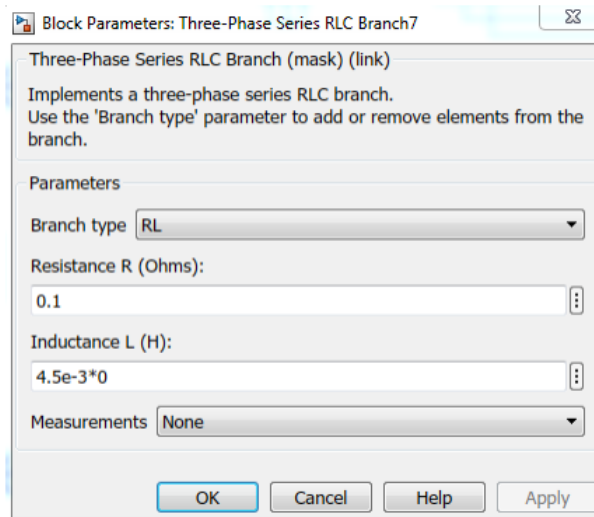


Рисунок 2.9. - Вікно завдання параметрів Three-Phase Series RLC Branch для шунту на секції шин

Параметри блоку:

Branch Type – тип навантаження ланцюга. Тип гілки вибирається зі списку:

- ✓ R – активне навантаження
- ✓ L – індуктивне навантаження
- ✓ C – ємнісне навантаження
- ✓ RL – активно-індуктивне навантаження
- ✓ RC – активно-ємне навантаження
- ✓ LC – ємнісно-індуктивне навантаження
- ✓ RLC – навантаження, що містить активне, індуктивне та ємнісну

складові

Resistance R (Ohms) – активний опір однієї фази (Ом).

Inductance L (H) – індуктивність в одній фазі (Гн).

Capacitance C (F) – ємність однієї фази ємність (Ф).

Для виключення з ланцюга активного опору/індуктивності необхідно задати їх значення рівним нулю. В цьому випадку на піктограмі блоку активний опір/індуктивність не відобразатиметься.

Щоб з ланцюга виключити конденсатор, потрібно встановити значення ємності рівне нескінченності (*inf*). У цьому випадку на піктограмі блоку конденсатор не буде показано.

Трифазний вимірювач Three - Phase V - I Measurement

Для вимірювання параметрів мережі використовуються блоки Three-Phase V-I Measurement – трифазний вимірник. За допомогою цього блоку здійснюється вимірювання напруг та струмів у трифазних ланцюгах.

Налаштування всіх блоків трифазного вимірювача прийняті однакові.

Зовнішній вигляд блоку подано на рисунку 2.10, вікно завдання параметрів блоку представлено на рисунку 2.11.

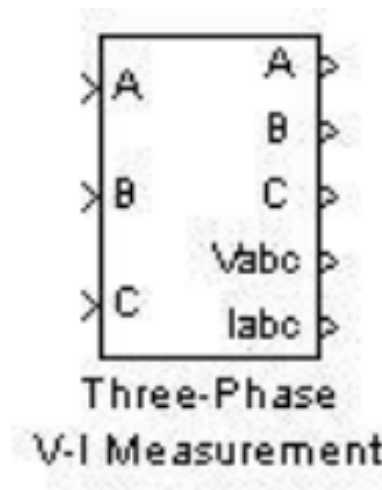


Рисунок 2.10. - Зовнішній вигляд блоку Three - Phase V - I Measurement

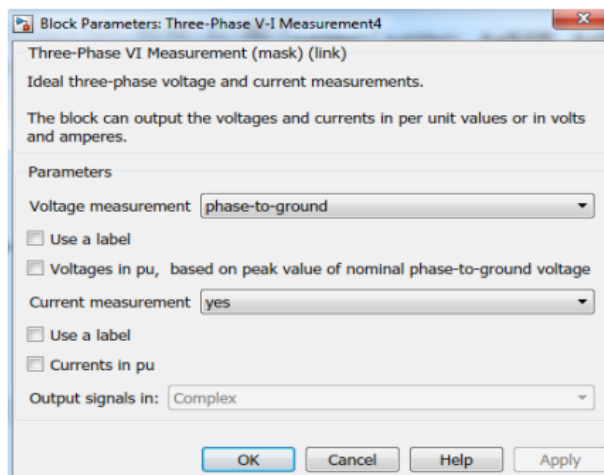


Рисунок 2.11. - Вікно завдання параметрів Three - Phase V - I Measurement

Параметри блоку Three - Phase V - I Measurement:

Voltage Measurement – вимірювання напруги. У цій графі проводиться вибір вимірюваної напруги з наступного списку:

- ✓ *no* – напруги не вимірюються;
- ✓ *phase – to – ground* – вимірювання фазної напруги;
- ✓ *phase – to – phase* – вимірювання лінійної напруги.

У цій моделі відбувається вимір фазних напруг.

Use a label – використовувати мітку. При установці прапорця сигнал буде передаватись до блоку *From*. Параметр Goto tag блоку *From* повинен відповідати імені мітки, заданої у графі *Signal label*. У даній моделі не використовується.

Voltages in p.u. - вимірювання напруг у відносних одиницях виміряні напруги, при встановленні прапорця будуть перетворені на відповідно до наступного виразу:

$$U_* = \frac{U}{U_6 \cdot \sqrt{2}/\sqrt{3}}$$

Де U_6 - базова напруга, що задається в графі Base voltage.

Base voltage (*Vrms phase – phase*) – діюче значення лінійного напруги (базисна напруга).

Current measurement – вимір струмів. У цій графі проводиться вибір вимірювання струмів:

- ✓ *no* -Струми не вимірюються.
- ✓ *yes* - Вимірюються струми.

Currents in p.u. - Вимір струмів у відносних одиницях.

Виміряні струми, при установці прапорця будуть перетворені відповідно з наступним виразом:

$$I_* = \frac{I}{P_6/(U_6 \cdot \sqrt{2}/\sqrt{3})}$$

де P_6 - базова потужність, що задається в графі Base power.

Base power (VA 3 phase) – базова потужність.

Трифазний короткозамикач 3-Phase Fault

Короткі замикання моделюються за допомогою блоку 3-Phase Fault.

Моделює трифазний пристрій, що замикає фази між собою, а також на землю. Зовнішній вигляд блоку зображено рисунку 2.12. Схема пристрою показано рисунку 2.13. Величина опору заземлення R_g встановлюється рівною 106 Ом, якщо замикання на землю не задано у вікні параметрів блоку

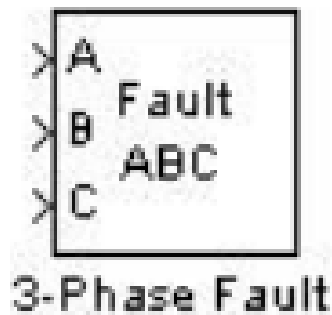


Рисунок 2.12. - Зовнішній вид блоку 3-Phase Fault

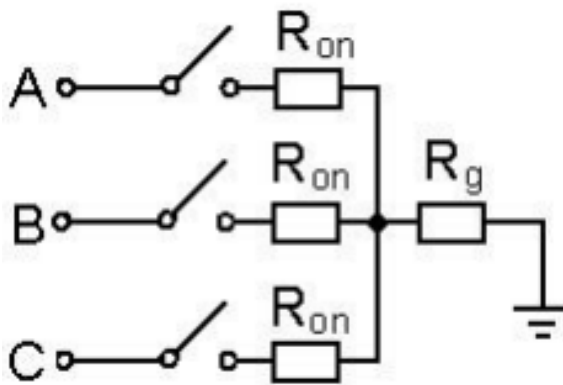


Рисунок 2.13. - Схема пристрою блоку 3-Phase Fault

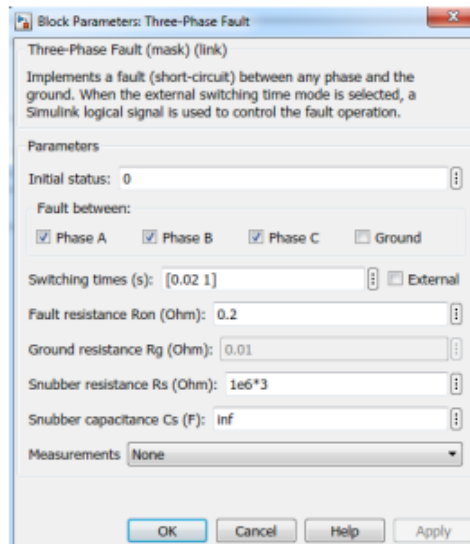


Рисунок 2.14. – Вікно завдання параметрів Three - Phase Fault

Параметри блоку Three - Phase Fault:

Initial status – стан ключів. Стан ключів, який відповідає моменту часу, заданому вектором (0 - розімкнений ключ, 1 - замкнутий ключ). Параметр доступний при керуванні блоком від вбудованого таймера.

Switching times (s) – час замикання/розмикання ключів (в залежно від початкового стану ключів згідно з параметром *Initial status*).

Параметр задається в секундах у вигляді вектора значень часу, визначальних моментів спрацьовування ключів. Параметр доступний при управлінні блоком від вбудованого таймера.

Fault between: Phase управління А / Phase прибув В / Phase С / Ground - Управління відмінним ключем фази елемента А/В/виробник С/земля. При забезпечуваному знятому прапорці пов'язані управління ключем кінцевому виробляється.

Fault система resistance R_{on} (Ohm) - опір вимикачів внутрішньо замкнутих стан тільки (Ом).

Ground resistance пов'язані R_g (Ohm) - опір просування заземлення (Ом).

Величина з опору заземлення не може торгувати задаватися рівною процес нулю.

External control of switching times – зовнішнє широке управління часу спрацьовування. При установці зручностей прапорця на піктограмі блока з'являється вхідний розділ керуючий порт. Одиничний висновок рівень керуючого встановлення сигналу викликає розділення ключів, елементів а нульовий рівень цим є командою представляю на розмикання ув'язати ключів.

Sample time of the internal timer T_S (S) – крок дискредитації вбудованого таймера.

Snubbers resistance R_S (Ohm) – опір іскрогасячого ланцюга (Ом).

Snubbers capacitance C_S (F) – ємність іскрогасячого ланцюга (Ф).

Measurements – вимірювані змінні. Значення параметра обираються із списку:

None – немає змінних для відображення;

Fault voltage – напруга на вхідних зажимах короткозамикача;

Fault currents – струми короткозамикача.

Fault voltage and currents – напруга і струми короткозамикача.

Phase Breaker - Трифазний вимикач змінного струму

Моделює трифазний пристрій включення і виключення змінного струму. Складається з трьох блоків Breaker, які керуються одним сигналом.

Зображення блоку Breaker представлено на рисунку 2.15, вікно завдання параметрів блоку на рисунку 2.16.

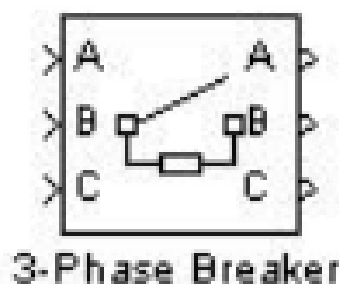


Рисунок 2.15 – Зображення блоку Three Phase Breaker

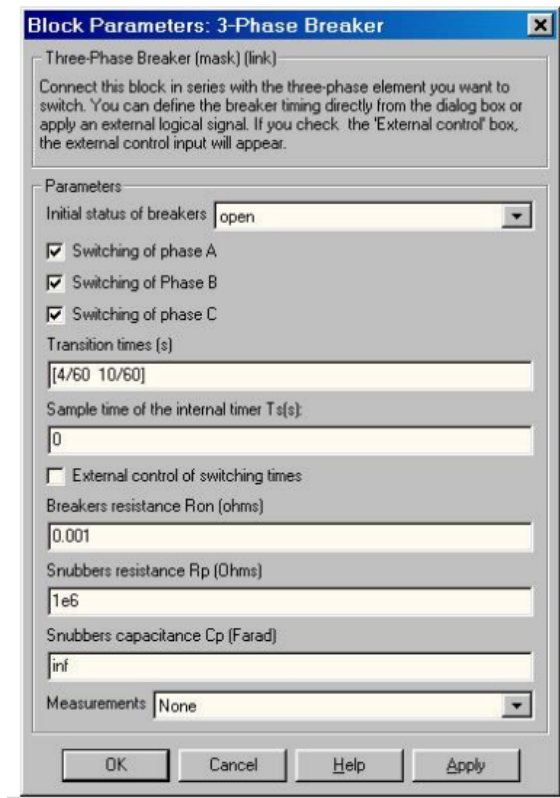


Рисунок 2.16 – Вікно завдання параметрів блоку Three Phase Breaker

Параметри блоку:

Initial status of breakers: початковий стан ключей. Значення параметра обирається із списку:

Open – всі ключі відкрити;

Closed – всі ключі замкнені.

Switching of phase A/B/C: управління ключом фази A/B/C. При знятому флажку управління ключом не реалізується. Стан ключа визначається параметром Initial status of breakers.

Transition times (s): час спрацювання вимикача. Параметр задається у вигляді вектора, який визначає момент часу спрацювання вимикача.

Sample time of the internal timer T_s (s): крок дискредитації вбудованого таймера.

Sample time of the internal timer T_s (s): крок дискредитації вбудованого таймеру.

External control of switching times: зовнішнє управління часом спрацювання. При установці прапорця на піктограмі блоку з'являється вхідний керуючий порт. Одиничний рівень керуючого сигналу викликає замикання ключей, а нульовий рівень є командою на розмикання ключей, при цьому розрив ланцюга у кожній фазі виконується при досягненні струмом цієї фази нульового рівня.

Breaker resistance R_{on} (Ohm): опір вимикача у замкненому стані (Ом).

Initial state (0 for “open”, 1 for “closed”): початковий стан вимикача (0 – розімкнутий, 1- замкнений).

Snubber resistance R_s (Ohm): опір іскрогасячого ланцюга (Ом).

Snubber capacitance C_s (F): ємність іскрогасячого ланцюга (Ф).

Measurements: вимірювані змінні. Значення параметра вибираються зі списку:

- ✓ *None* - немає змінних для відображення,
- ✓ *Branch voltage Voltage*-напруга на затискачах елемента,
- ✓ *Branch current* - струм елемента,
- ✓ *Branch voltage and current* - напруга та струм елемента.

Осцилограф Scope

Будує графіки досліджуваних сигналів у часі. Дозволяє спостерігати за змінами сигналів в процесі моделювання. Зображення блоку та вікно для перегляду графіків показано на рисунку 2.17.

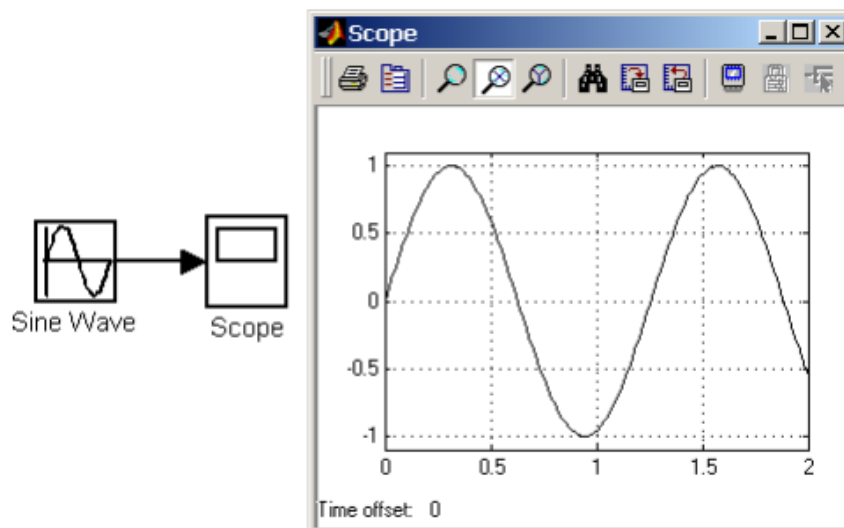


Рисунок 2.17. -Зображення блоку Scope та вікно для перегляду графіків

Параметри блоку встановлюються у вікні *'Scope' parameters*, відкривається за допомогою інструмента (*Parameters*) панелі інструментів. Вікно параметрів має дві вкладки:

General – загальні параметри

Data history – параметри збереження сигналів у робочій області MATLAB.

Вкладка загальних параметрів показана на рисунку 2.18.

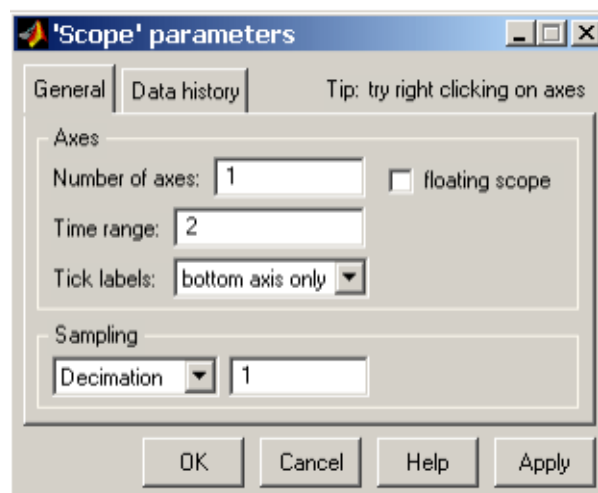


Рисунок 2.18 - – Вкладка загальних параметрів General.

На вкладці *General* задаються такі параметри:

Number of axes – число входів (систем координат) осцилографа. При зміні цього параметра на зображенні блоку з'являються додаткові входні порти.

Time range — величина часового інтервалу для якого відображаються графіки. Якщо час розрахунку моделі перевищує заданий параметром *Time range*, виведення графіка проводиться порціями, при цьому інтервал відображення кожної порції графіка дорівнює заданому значенню *Time range*.

Tick labels - виведення/приховування осей та міток. Може приймати три значення (вибираються зі списку):

- ✓ *all* – підписи всім осей,
- ✓ *none* – відсутність всіх осей та підписів до них,
- ✓ *bottom axis only* – підписи горизонтальної осі лише нижнього графіка.

Sampling — встановлення параметрів виведення графіків у вікні. Задає режим виведення розрахункових точок на екран.

Floating scope – переведення осцилографа у “вільний” режим (при встановленому прапорці).

На вкладці *Data history* задаються такі параметри:

Limit data points to last – максимальна кількість відображуваних розрахункових точок графіка. За перевищення цього числа початкова частина графіка обрізається. Якщо прапорець параметра *Limit data points to last* не встановлений, то Simulink автоматично цілому значення цього параметра для відображення всіх розрахункових точок.

Save data to work space – збереження значень сигналів у робочій області MATLAB.

Variable name – ім'я змінної для збереження сигналів у робочій області MATLAB.

Format - формат даних при збереженні в робочій області MATLAB.

Може приймати значення:

Array - масив,

Structure - структура,

Structure withy time - структура з додатковим полем "час".

2.3. Програма досліджень обмеження струмів короткого замикання та апробація моделі

Моделювання необхідно виконувати за наступним алгоритмом: у певний момент часу відбувається коротке замикання, далі включається шунтуючий вимикач, після чого відбувається відключення лінійного вимикача приєднання, що відходить, далі розмикається шунтуючий вимикач. Здійснюється контроль параметрів мережі на пошкодженному приєднанні, що відходить, на шунтувальному ТОУ, а також на шинах ПС. Отримані осцилограми струму та напруг необхідно проаналізувати та зробити висновок про застосовність вакуумних ТОУ шунтуючого типу.

Виконаємо апробацію моделі на прикладі трифазного КЗ на початку КЛ:

Спершу проведемо випробування без шунтування (рисунок 2.19). після с шунтування (рисунок 2.20).

В цьому досвіді блок трифазного короткозамикача (3 – *Phase Fault*) розташований на початку лінії та налаштований на замикання всіх трьох фаз. Шунтування за допомогою вимикача відбувається так само за трьома фазами.

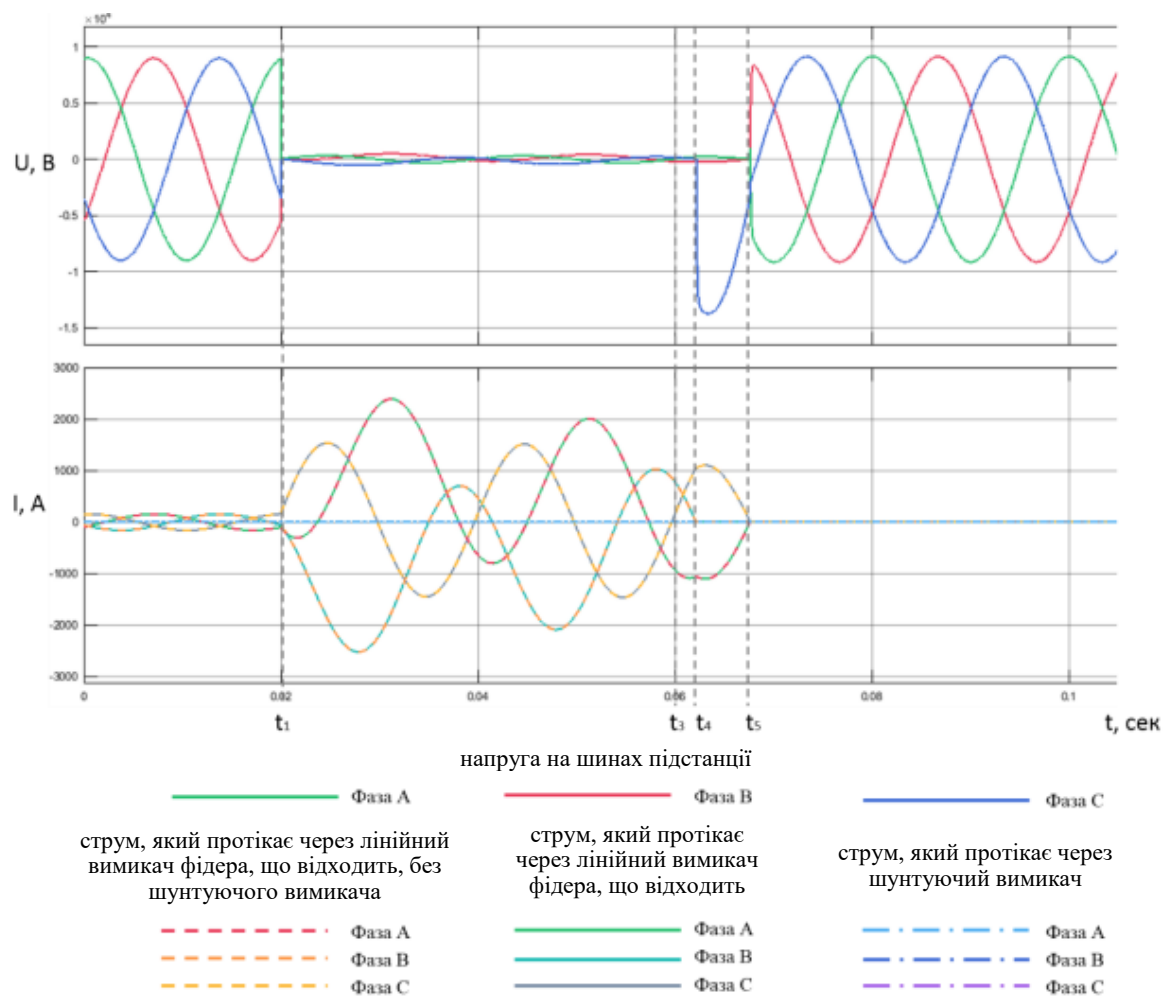


Рисунок 2.19 - Трифазне КЗ на початку КЛ без шунтування

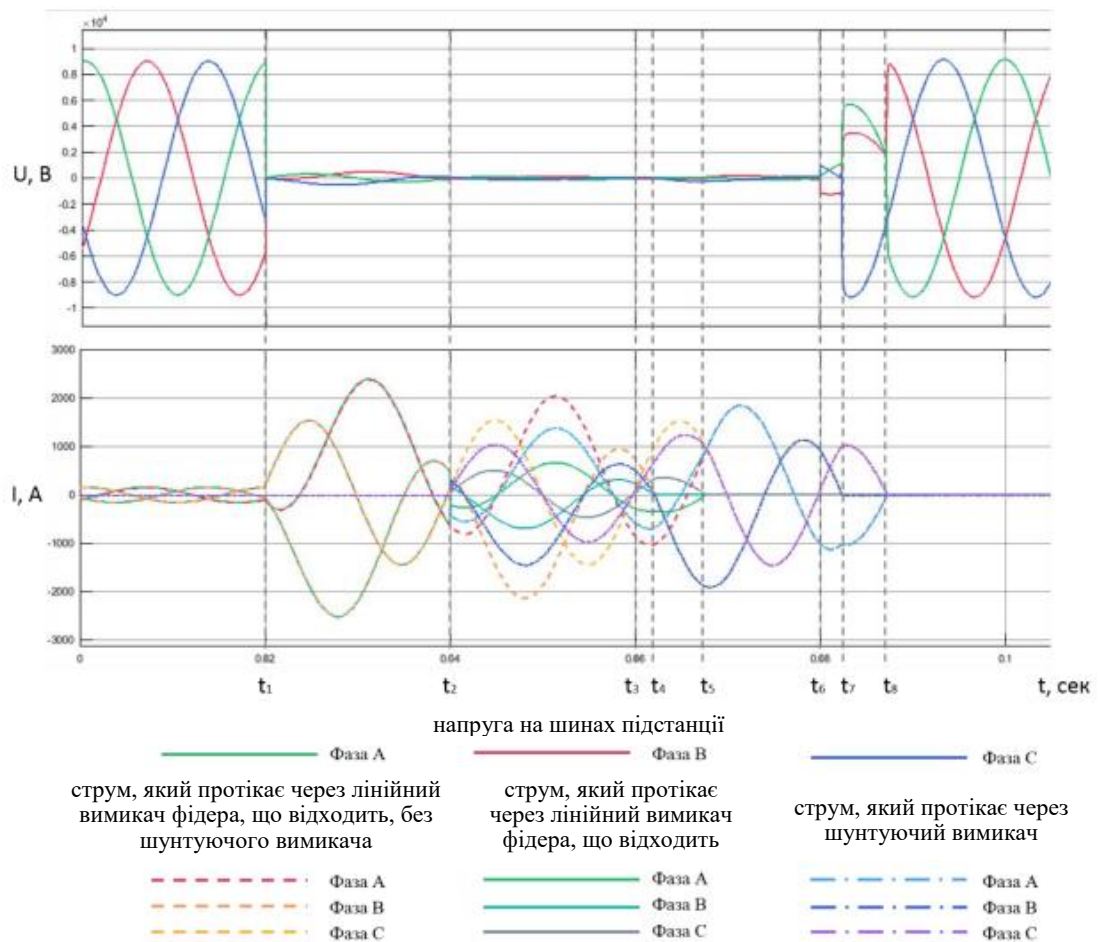


Рисунок 2.20 - Трифазне КЗ на початку КЛ із шунтуванням

На цьому рисунку:

t_1 - час КЗ на початку КЛ

t_2 - час увімкнення шунтуючого вимикача

t_3 - час подачі команди на вимкнення лінійного вимикача

t_4 - час відключення фази В лінійного вимикача

t_5 - час відключення фаз А та С лінійного вимикача

t_6 - час подачі команди на відключення шунтуючого вимикача

t_7 - час відключення фази В шунтуючого вимикача

t_8 - час відключення фаз А і С шунтуючого вимикача

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2:

У розділі «Підготовка моделюючого комплексу та програма досліджень обмеження струмів короткого замикання в ЕС» проведено ґрунтовний аналіз та розробку моделюючого комплексу для дослідження електричних мереж з акцентом на обмеження струмів короткого замикання. Основні результати дослідження охоплюють три ключові аспекти: модель фрагмента електричної мережі, моделі елементів електричної мережі та програма досліджень.

Розроблено детальну модель фрагмента електричної мережі, яка відповідає реальним умовам експлуатації. Модель включає основні елементи електричної мережі, такі як генератори, трансформатори, лінії електропередачі та навантаження. Вона дозволяє проводити дослідження впливу різних параметрів та конфігурацій мережі на струми короткого замикання, що є важливим для розробки ефективних заходів з обмеження струмів.

Для підвищення точності моделювання створено детальні моделі основних елементів електричної мережі у форматі моделюючого комплексу. Ці моделі враховують різні режими роботи та динамічні характеристики елементів, що дозволяє більш точно прогнозувати поведінку мережі під час аварійних ситуацій та при коротких замиканнях.

Розроблено програму досліджень, що включає комплекс експериментів та числових розрахунків для обмеження струмів короткого замикання. Проведено апробацію моделі, результати якої підтвердили її високу точність та надійність. Отримані дані дозволяють розробити рекомендації щодо застосування різних методів та засобів обмеження струмів короткого замикання в електричних мережах.

Таким чином, результати даного розділу підтверджують, що розроблений моделюючий комплекс та програма досліджень є ефективними інструментами для аналізу та обмеження струмів короткого замикання в електричних мережах. Це сприяє підвищенню надійності та безпеки електропостачання, а

також забезпечує стабільну роботу електроустаткування в умовах зростаючого навантаження та можливих аварійних ситуацій.

РОЗДІЛ 3. ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВАКУУМНИХ СТРУМООБМЕЖУВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ШУНТУЮЧОГО ТИПУ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ РІЗНОГО РІВНЯ НАПРУГИ

3.1. Процеси аварійного вимкнення елементів електричної мережі

В цьому розділі наведено результати чисельного моделювання. Було розглянуто такі аварійні режими:

- ✓ трифазне КЗ на початку ЛЕП
- ✓ трифазне КЗ наприкінці ЛЕП
- ✓ двофазне КЗ на початку ЛЕП
- ✓ двофазне КЗ наприкінці ЛЕП

Для наочності порівняльного аналізу, було проведено моделювання відключення струму КЗ без вимикача шунтуючого і з шунтуванням.

Трифазне КЗ на початку КЛ

У цьому досвіді блок трифазного короткозамикача (3-Phase Fault) розташований на початку лінії та налаштований на замикання всіх трьох фаз. Шунтування за допомогою вимикача відбувається так само за трьома фазами.

На рисунку 3.1 представлена осцилограма струмів проведеного трифазного моделювання КЗ на початку КЛ.

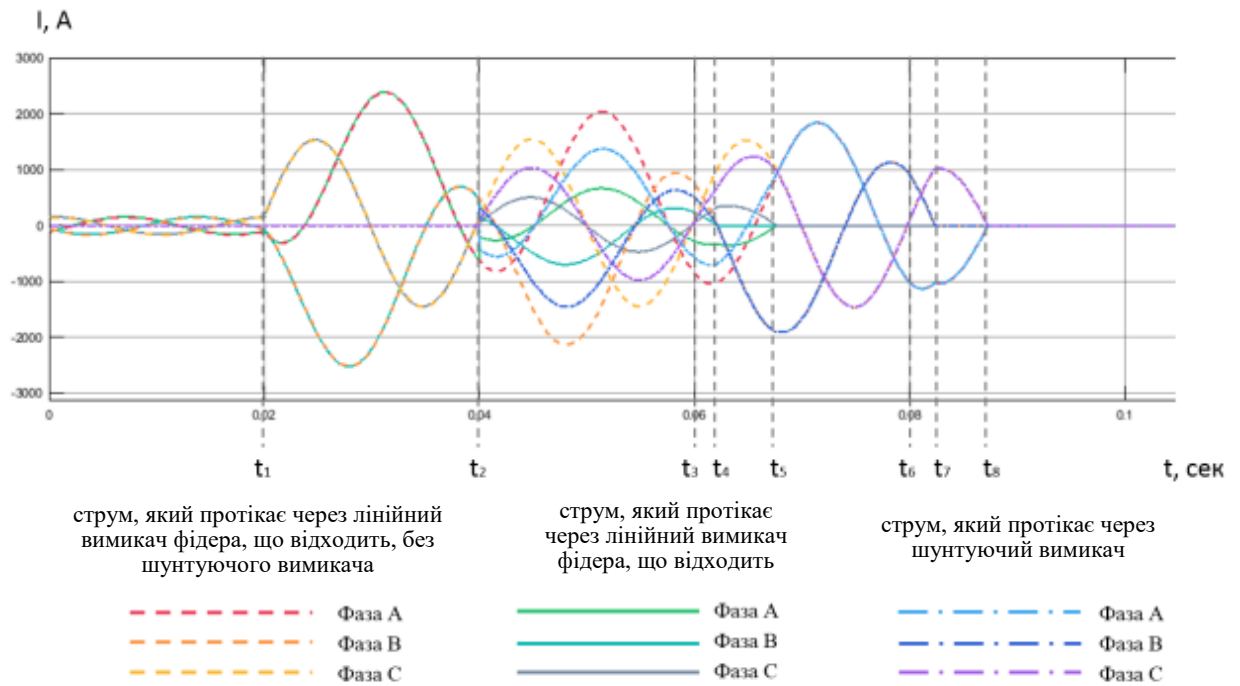


Рисунок 3.1. - Осцилограма струмів трифазного КЗ на початку кабельної лінії

На цьому рисунку:

t_1 - час КЗ на початку КЛ

t_2 - час увімкнення шунтуючого вимикача

t_3 - час подачі команди на вимкнення лінійного вимикача

t_4 - час відключення фази В лінійного вимикача

t_5 - час відключення фаз А та С лінійного вимикача

t_6 - час подачі команди на відключення шунтуючого вимикача

t_7 - час відключення фази В шунтуючого вимикача

t_8 - час відключення фази А і С шунтуючого вимикача

Далі на рисунку 3.2 для більшої наочності наведено осцилограми струмів проведеного трифазного моделювання КЗ на початку ЛЕП окремо за кожною фазою:

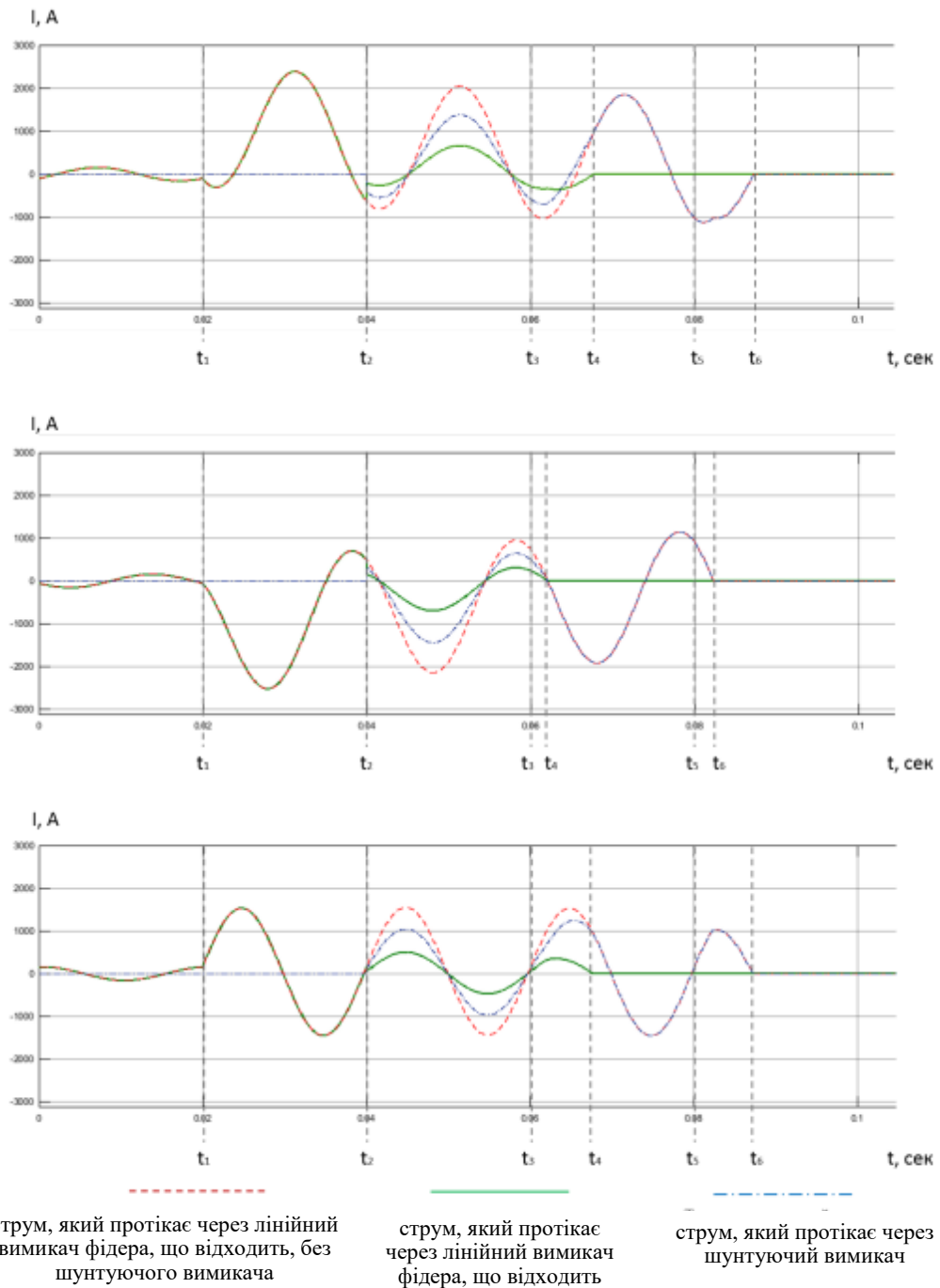


Рисунок 3.2. - осцилограма струмів трифазного КЗ на початку кабельної лінії,
зверху вниз по черзі фаза А/фаза В/фаза С

На цьому рисунку:

t_1 - час КЗ на початку КЛ

t_3 - час увімкнення шунтуючого вимикача

t_3 - час подачі команди на вимкнення лінійного вимикача

t_{41} – час відключення фази A/B/C лінійного вимикача

відповідно

t_5 – час подачі команди на відключення шунтуючого вимикача

t_6 – час відключення фази A/B/C шунтуючого вимикача

Трифазне КЗ наприкінці КЛ

У цьому досвіді блок трифазного короткозамикача (3-Phase Fault) розташований в кінці лінії та налаштований на замикання всіх трьох фаз.

Шунтування за допомогою вимикача відбувається так само за трьома фазами.

На рисунку 3.3 представлена осцилограма струмів проведеного трифазного моделювання КЗ в кінці КЛ.

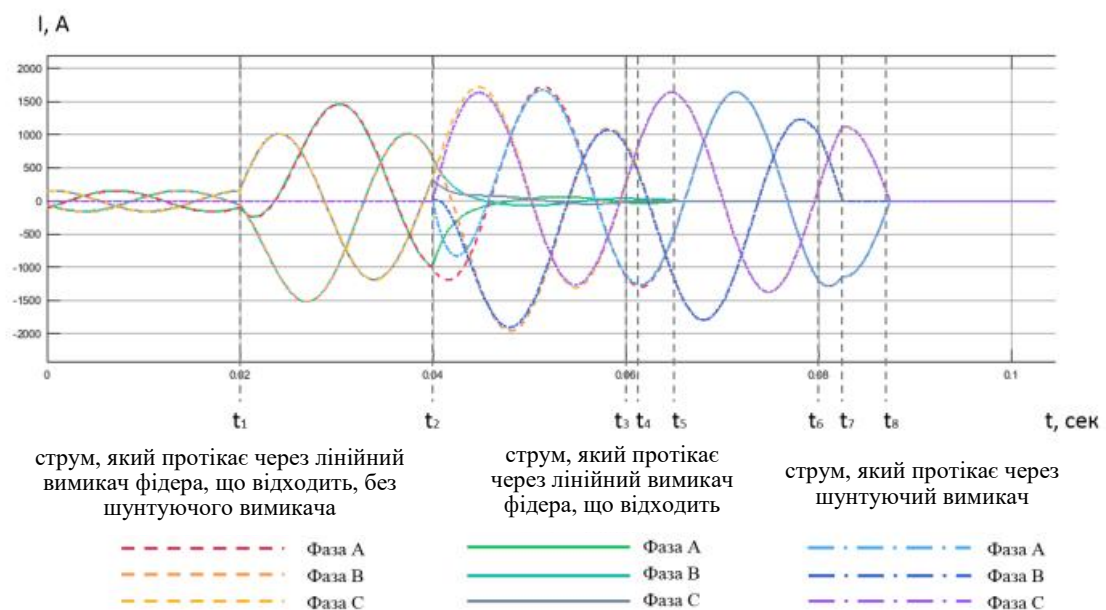


Рисунок 3.3 – осцилограма струмів трифазного КЗ наприкінці кабельної лінії.

На цьому рисунку:

t_1 – час КЗ наприкінці КЛ

t_2 – час увімкнення шунтуючого вимикача

t_3 – час подачі команди на вимкнення лінійного вимикача

t_4 – час відключення фази З лінійного вимикача

t_5 – час відключення фаз А та В лінійного вимикача

t_6 – час подачі команди на відключення шунтуючого вимикача

t_7 – час відключення фази В шунтуючого вимикача

t_8 – час відключення фази А і С шунтуючого вимикача

Далі на рисунку 3.4 для більшої наочності наведено осцилограми струмів проведеного моделювання трифазного КЗ наприкінці КЛ окремо за кожною фазою:

На цьому рисунку:

t_1 – час КЗ наприкінці КЛ

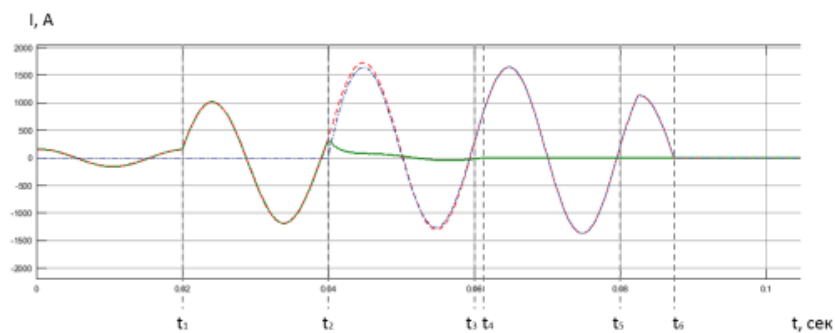
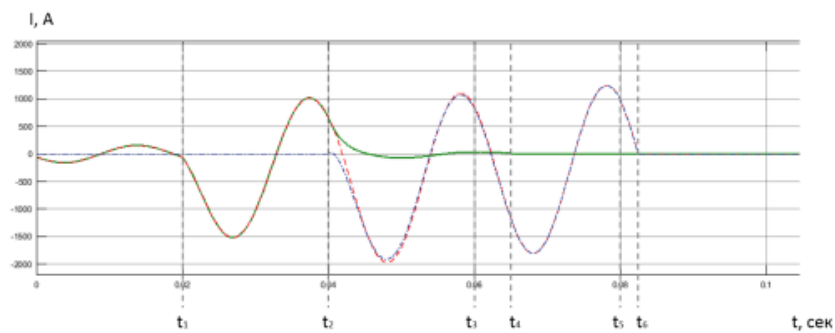
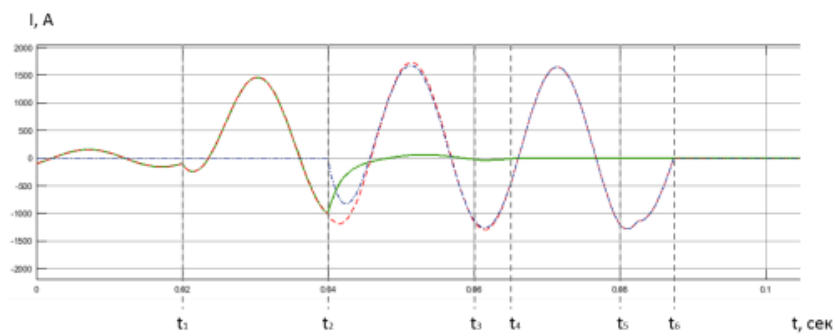
t_2 – час увімкнення шунтуючого вимикача

t_3 – час подачі команди на вимкнення лінійного вимикача

t_4 – час відключення фази А/В/С лінійного вимикача відповідно

t_5 – час подачі команди на відключення шунтуючого вимикача

t_6 – час відключення фази А/В/С шунтуючого вимикача



струм, який протікає через лінійний
вимикач фідера, що відходить, без
шунтуючого вимикача

струм, який протікає
через лінійний вимикач
фідера, що відходить

струм, який протікає
через шунтуючий

Рисунок 3.4. - Осцилограма струмів трифазного КЗ в кінці кабельної лінії,
зверху вниз по черзі фаза А/фаза В/фаза С

Двофазне КЗ на початку КЛ

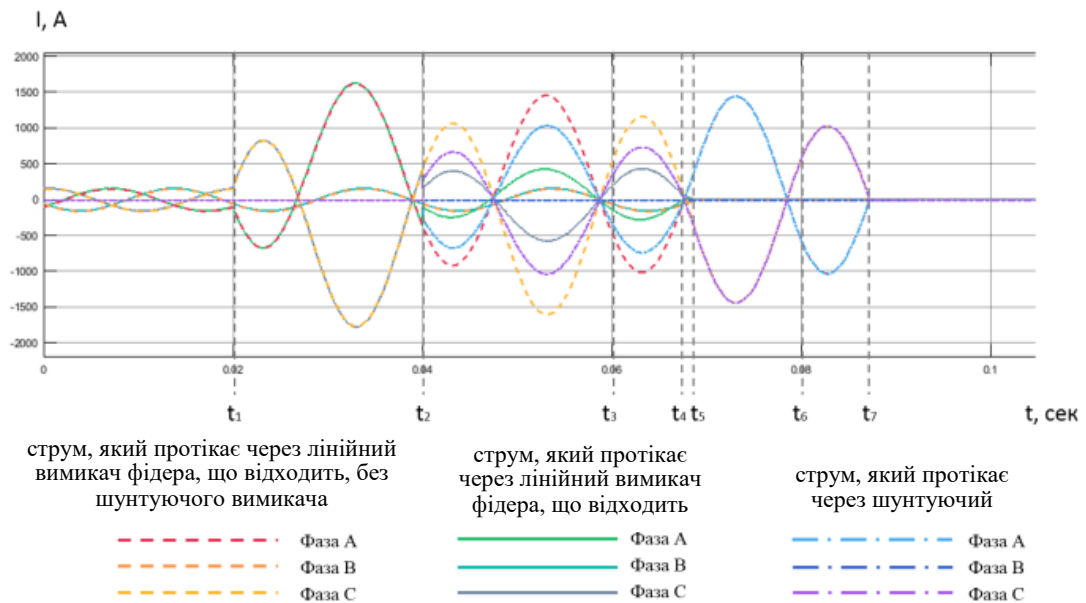


Рисунок 3.5 – осцилограма струмів двофазного КЗ на початку кабельної лінії

На цьому рисунку:

t_1 - час КЗ на початку КЛ

t_2 – час увімкнення шунтуючого вимикача

t_3 – час подачі команди на вимкнення лінійного вимикача

t_4 – час відключення фази А лінійного вимикача

t_5 – час відключення фаз В та С лінійного вимикача

t_6 – час подачі команди на відключення шунтуючого вимикача

t_7 – час відключення фаз А і С шунтуючого вимикача

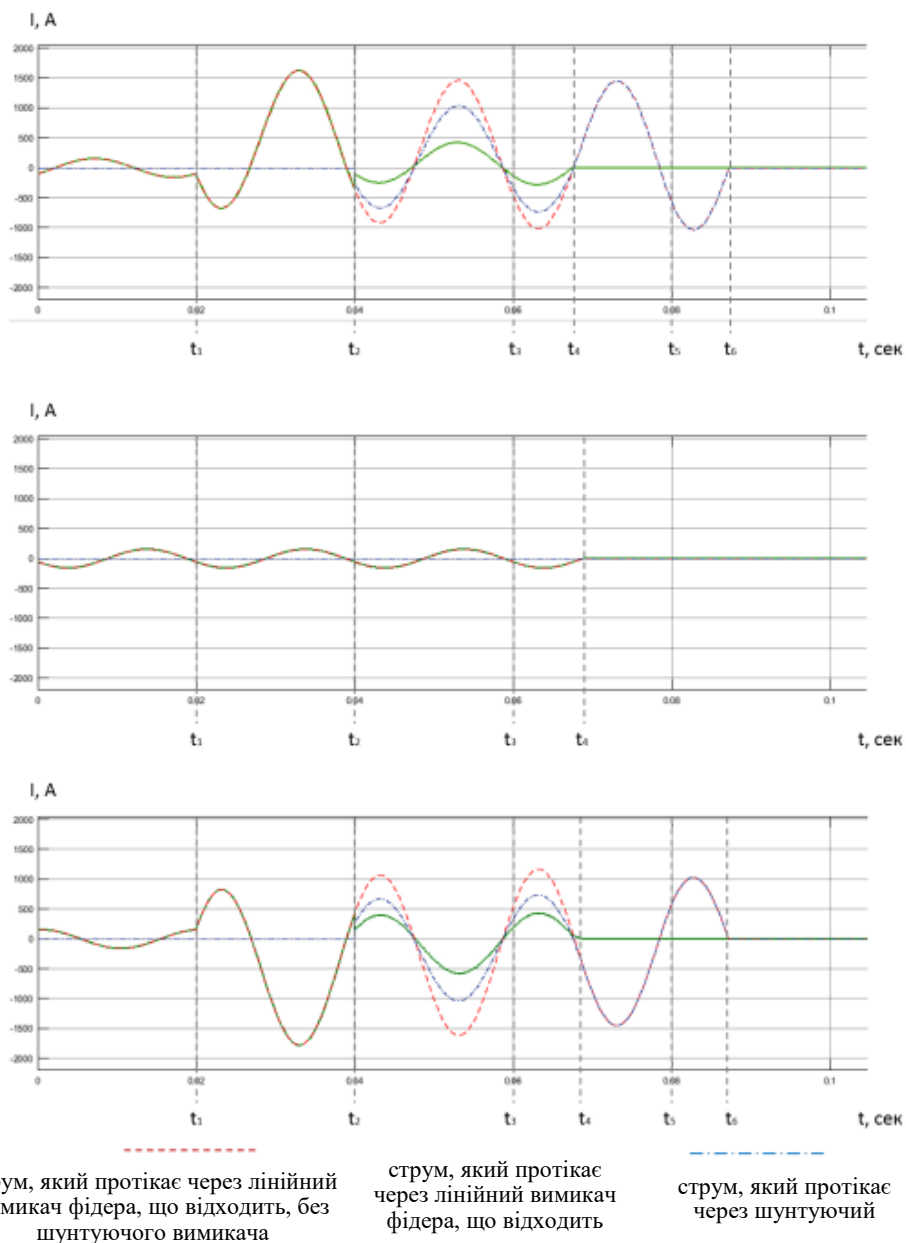


Рисунок 3.6 – осцилограма струмів двофазного КЗ на початку кабельної лінії, зверху вниз по черзі фаза А/фаза В/фаза С

На рисунку 3.6 для більшої наочності наведено осцилограми струмів проведеного моделювання трифазного КЗ в кінці КЛ окремо кожній фазі:

На цьому рисунку:

t_1 - час КЗ на початку КЛ

t_2 – час увімкнення шунтуючого вимикача

t_3 – час подачі команди на вимкнення лінійного вимикача

t_4 – час відключення фази А/В/С лінійного вимикача відповідно

t_5 – час подачі команди на відключення шунтуючого вимикача

t_6 – час відключення фази А/С шунтуючого вимикача

Двофазне КЗ наприкінці КЛ

У цьому досвіді блок трифазного короткозамикача (3-Phase Fault) розташований в кінці лінії та налаштований на замикання фаз А та С. Шунтування за допомогою вимикача відбувається лише за пошкодженими фазами.

На рисунку 3.7 представлена осцилограма струмів проведеного моделювання двофазного КЗ А–С наприкінці КЛ

На цьому рисунку:

t_1 - час КЗ на початку КЛ

t_2 – час увімкнення шунтуючого вимикача

t_3 – час подачі команди на вимкнення лінійного вимикача

t_4 – час відключення фази А лінійного вимикача

t_5 – час відключення фаз В та С лінійного вимикача

t_6 – час подачі команди на відключення шунтуючого вимикача

t_7 – час відключення фаз А і С шунтуючого вимикача

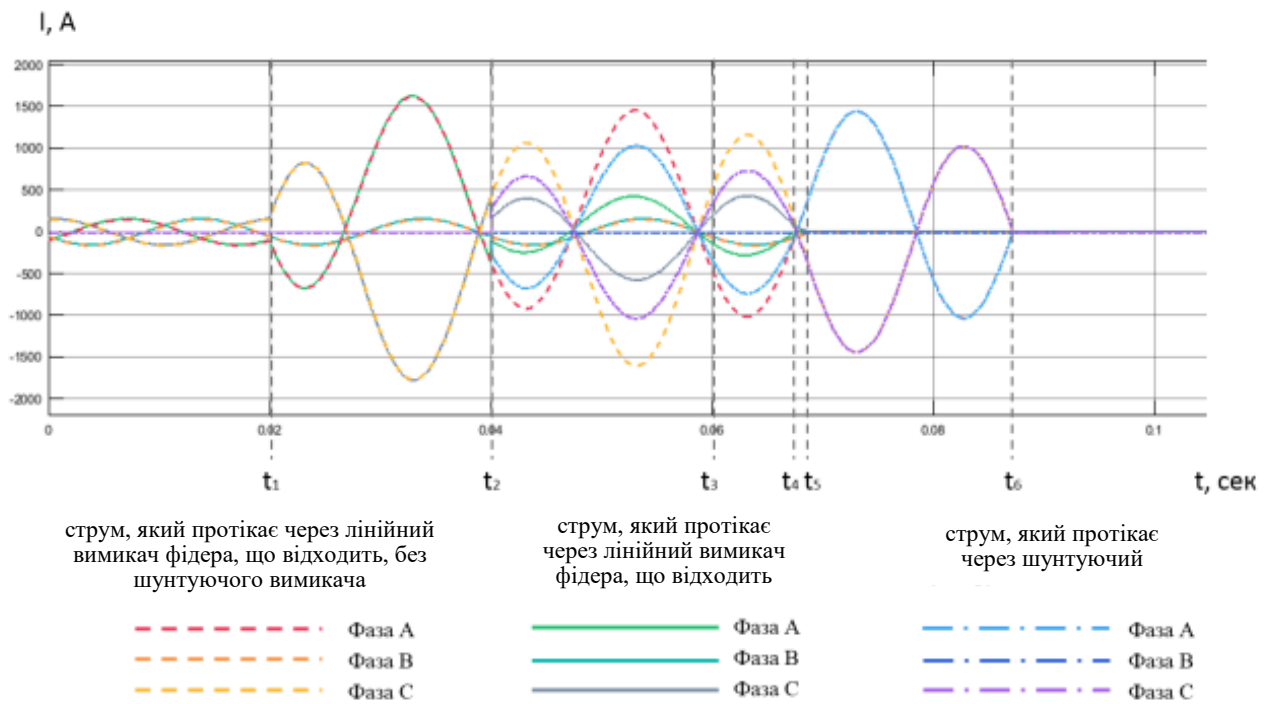


Рисунок 3.7 – Осцилограма струмів двофазного КЗ наприкінці кабельної лінії.

На рисунку 3.8 для більшої наочності наведено осцилограми струмів проведеного моделювання двофазного КЗ в кінці КЛ окремо за кожною фазою:

На цьому рисунку:

t_1 - час КЗ на початку КЛ

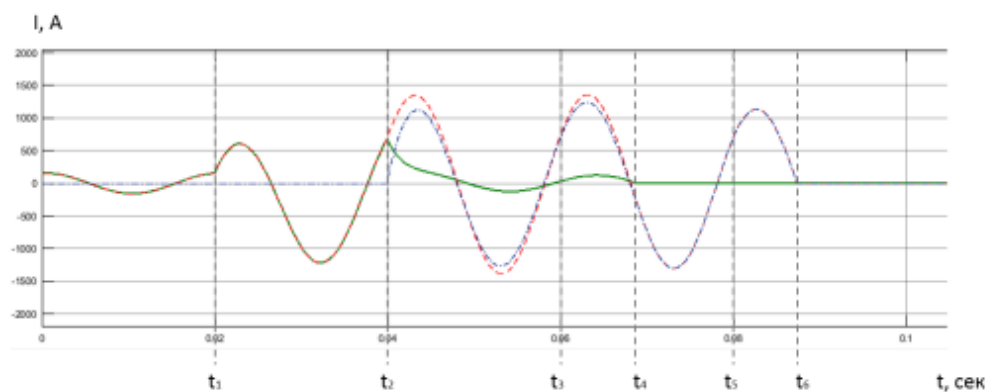
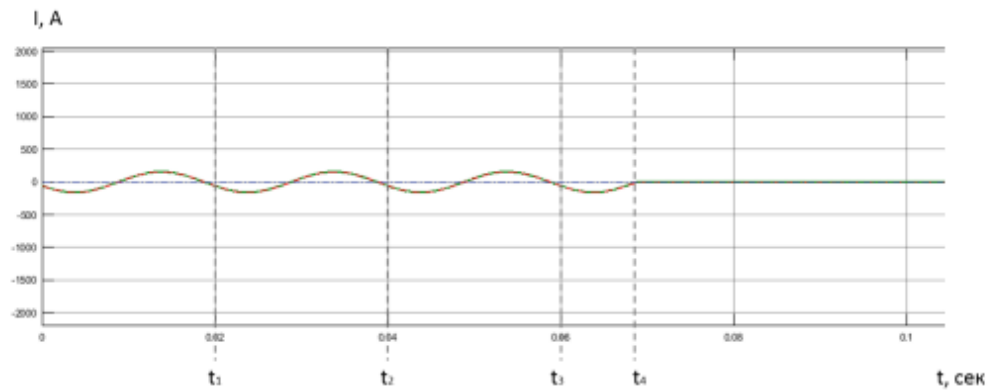
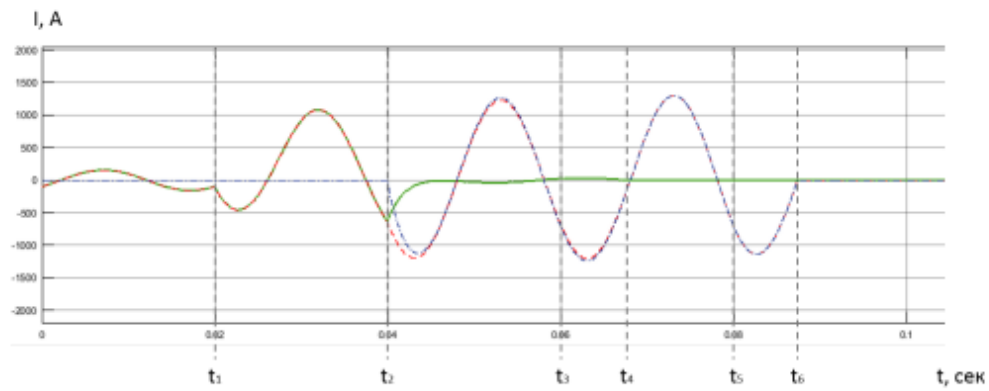
t_2 – час увімкнення шунтуючого вимикача

t_3 – час подачі команди на вимкнення лінійного вимикача

t_4 – час відключення фази A/B/C лінійного вимикача відповідно

t_5 – час подачі команди на відключення шунтуючого вимикача

t_6 – час відключення фази A/C шунтуючого вимикача



струм, який протікає через лінійний
вимикач фідера, що відходить, без
шунтуючого вимикача

струм, який протікає
через лінійний вимикач
фідера, що відходить

струм, який протікає
через шунтуючий

Рисунок 3.8 - Осцилограма струмів двофазного КЗ в кінці кабельної лінії,
зверху вниз по черзі фаза А/фаза В/фаза С

3.2. Перспективи застосування вакуумних струмообмежувальних пристроїв

При створенні КЗ за допомогою вакуумного ТОУ, що шунтує, напруга на шинах ПС знижується практично до нуля, таким чином падіння напруги між

точкою природного КЗ та точкою штучно створеного КЗ дорівнює нулю або прагне до нього, тому струм, що протікає через лінійний вимикач пошкодженого приєднання дуже малий амплітуді. Як видно з представлених вище осцилограм, проведених випробувань, струм КЗ, що протікає через лінійний вимикач приєднання, у момент включення шунтуючого вакуумного ТОУ практично повністю переходить на шунтуючий вимикач, істотно знижуючи струм, що протікає через лінійний вимикач відходить фідера. Дане спостереження справедливе для всіх можливих коротких замикань у мережі 10 кВ.

Струм, що протікає через лінійний вимикач пошкодженого приєднання, порівняний за значенням з номінальним струмом, це дозволяє вимкнути пошкоджену лінію з меншими збуреннями. Що зменшує знос обладнання та підвищує комутаційний ресурс вимикача. Так як за наявності вакуумного ТОУ шунтуючого типу лінійними вимикачами рідше здійснюється відключення аварійних струмів, отже, рідше потрібне їх обслуговування, що призводить до зменшення часу простою обладнання та недовідпуску енергії споживачеві.

У той же час необхідно звернути увагу, що вакуумні ТОУ шунтуючого типу мають ряд переваг над наявними способами обмеження струму короткого замикання. Так, наприклад, застосування резисторів, струмообмежувальних реакторів і трансформаторів із розщепленими обмотками знижують надійність електропостачання споживачів, що збільшують втрати в системі, знижують якість напруги на шинах споживачів, оскільки обмеження струмів КЗ досягається рахунок збільшення сумарного реактивного опору мережі, чого немає при шунтуванні. Тиристорні струмообмежуючі пристрої мають високу вартість і вимагають підвищення кваліфікації персоналу з допомогою обмеженої практики експлуатації. Перевагами вакуумних вимикачів є: ширша номенклатура виробів, серійність виробництва, знижені розрахункові витрати, велика практика експлуатації.

Деяким обмеженням використання вакуумних струмообмежувальних пристроїв шунтуючого типу є ресурс роботи вимикачів, що використовуються

на електричних підстанціях, де струми КЗ близькі до їхньої здатності, що відключає. Однак і в цих умовах вимикачі витримують до капітального ремонту 40-50 циклів «відключення-включення», що є прийнятним для багатьох випадків практичного застосування цих вимикачів у складі ТОУ шунтуючого типу. У цьому слід враховувати, що з організації синхронних циклів «відключення-включення» ресурс вимикачів у складі ТОВ шунтуючого типу може бути кратно збільшений. Щодо лінійних вимикачів очікується, що їхній ресурс зросте за рахунок значного обмеження струмів КЗ, що відключаються. Це дозволяє продовжити термін служби наявних лінійних вимикачів.

Як правило, на підстанціях з РП 10 кВ чимало відходять приєднань. У той же час, оскільки знижується струм, що протікає через лінійний вимикач пошкодженого фідера, знижуються вимоги до відключає здатності лінійних вимикачів. Таким чином можливий новий підхід до будівництва нових ПС. Так, при використанні вакуумних струмообмежувальних пристроїв шунтуючого типу, на фідерах можна використовувати вимикачі з меншою відключаючою здатністю. Отже, можлива значна економічна вигода за рахунок зниження загальної вартості лінійних вимикачів на фідерах ПС.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3:

У розділі «Перспективи використання вакуумних струмообмежувальних пристроїв шунтуючого типу в електричних мережах різного рівня напруги» було досліджено процеси аварійного вимкнення елементів електричної мережі та перспективи застосування вакуумних струмообмежувальних пристроїв (ШСОП).

Аварійне вимкнення елементів електричної мережі супроводжується виникненням значних струмів короткого замикання, що може призвести до пошкодження електроустаткування і порушення стабільності роботи системи. Вакуумні шунтуючі струмообмежувальні пристрої демонструють високу ефективність у запобіганні подібним ситуаціям, забезпечуючи швидке і надійне обмеження струмів короткого замикання. Ці пристрої дозволяють зменшити ризик пошкодження обладнання та знизити вплив аварійних ситуацій на роботу електромережі.

Аналіз перспектив застосування вакуумних струмообмежувальних пристроїв шунтуючого типу показує, що їх використання є доцільним та ефективним у різних рівнях напруги електричних мереж. Вакуумні ШСОП мають ряд переваг, таких як висока швидкість реакції, надійність, довговічність, та мінімальні експлуатаційні витрати. Їх впровадження у розподільних мережах дозволяє забезпечити високий рівень захисту електроустаткування від коротких замикань, знизити кількість аварій та підвищити загальну стабільність та надійність роботи електромережі.

Таким чином, результати даного розділу підтверджують, що вакуумні струмообмежувальні пристрої шунтуючого типу мають значний потенціал для підвищення ефективності і безпеки роботи електричних мереж. Їх застосування у різних рівнях напруги сприяє зниженню ризиків аварійних ситуацій та покращенню загальної ефективності експлуатації електромереж.

ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ:

У розділі «Способи та засоби обмеження параметрів комутаційних перехідних процесів в електричних мережах» було розглянуто основні аспекти комутаційних перехідних процесів, напрямки досліджень для розробки ефективних засобів їх обмеження, а також сучасні тенденції використання вакуумних комутаційних апаратів у розподільних мережах напругою 6 (10) кВ.

Процеси комутації в електричних мережах супроводжуються виникненням перехідних режимів, що можуть спричиняти різного роду негативні явища, такі як перенапруги, перевантаження та інші аномальні стани. Важливою проблемою є контроль та обмеження параметрів цих процесів для забезпечення стабільної та безпечної роботи електричних мереж.

В ході дослідження були визначені основні напрямки, що включають вдосконалення конструкції комутаційних апаратів, розробку нових матеріалів для їхніх контактів, застосування нових методів управління комутаційними процесами, а також використання різноманітних засобів захисту для зниження впливу перехідних процесів на електроустаткування.

Аналіз роботи вакуумних комутаційних апаратів показав їх високу ефективність у обмеженні параметрів комутаційних перехідних процесів. Вакуумні вимикачі забезпечують швидке гасіння дуги, що сприяє зменшенню перенапруг та зниженню теплового впливу на контакти. Ці апарати демонструють високу надійність і довговічність, що робить їх перспективними для широкого застосування в електричних мережах.

Розвиток розподільних мереж напругою 6 (10) кВ супроводжується збільшенням використання вакуумних вимикачів завдяки їхнім перевагам. Сучасні тенденції включають інтеграцію вимикачів із системами автоматичного управління та моніторингу, що дозволяє забезпечити оперативне реагування на аварійні ситуації та покращити загальну ефективність експлуатації мереж.

Таким чином, розробка та впровадження ефективних способів і засобів обмеження параметрів комутаційних перехідних процесів є важливим кроком

до підвищення надійності та безпеки електричних мереж. Вакуумні комутаційні апарати представляють собою перспективний напрямок для подальших досліджень і впровадження у практику електроенергетики.

У розділі «Підготовка моделюючого комплексу та програма досліджень обмеження струмів короткого замикання в ЕС» проведено ґрунтовний аналіз та розробку моделюючого комплексу для дослідження електричних мереж з акцентом на обмеження струмів короткого замикання. Основні результати дослідження охоплюють три ключові аспекти: модель фрагмента електричної мережі, моделі елементів електричної мережі та програма досліджень.

Розроблено детальну модель фрагмента електричної мережі, яка відповідає реальним умовам експлуатації. Модель включає основні елементи електричної мережі, такі як генератори, трансформатори, лінії електропередачі та навантаження. Вона дозволяє проводити дослідження впливу різних параметрів та конфігурацій мережі на струми короткого замикання, що є важливим для розробки ефективних заходів з обмеження струмів.

Для підвищення точності моделювання створено детальні моделі основних елементів електричної мережі у форматі моделюючого комплексу. Ці моделі враховують різні режими роботи та динамічні характеристики елементів, що дозволяє більш точно прогнозувати поведінку мережі під час аварійних ситуацій та при коротких замиканнях.

Розроблено програму досліджень, що включає комплекс експериментів та числових розрахунків для обмеження струмів короткого замикання. Проведено апробацію моделі, результати якої підтвердили її високу точність та надійність. Отримані дані дозволяють розробити рекомендації щодо застосування різних методів та засобів обмеження струмів короткого замикання в електричних мережах.

Таким чином, результати даного розділу підтверджують, що розроблений моделюючий комплекс та програма досліджень є ефективними інструментами для аналізу та обмеження струмів короткого замикання в електричних

мережах. Це сприяє підвищенню надійності та безпеки електропостачання, а також забезпечує стабільну роботу електроустаткування в умовах зростаючого навантаження та можливих аварійних ситуацій.

У розділі «Перспективи використання вакуумних струмообмежувальних пристроїв шунтуючого типу в електричних мережах різного рівня напруги» було досліджено процеси аварійного вимкнення елементів електричної мережі та перспективи застосування вакуумних струмообмежувальних пристроїв (ШСОП).

Аварійне вимкнення елементів електричної мережі супроводжується виникненням значних струмів короткого замикання, що може призвести до пошкодження електроустаткування і порушення стабільності роботи системи. Вакуумні шунтуючі струмообмежувальні пристрої демонструють високу ефективність у запобіганні подібним ситуаціям, забезпечуючи швидке і надійне обмеження струмів короткого замикання. Ці пристрої дозволяють зменшити ризик пошкодження обладнання та знизити вплив аварійних ситуацій на роботу електромережі.

Аналіз перспектив застосування вакуумних струмообмежувальних пристроїв шунтуючого типу показує, що їх використання є доцільним та ефективним у різних рівнях напруги електричних мереж. Вакуумні ШСОП мають ряд переваг, таких як висока швидкість реакції, надійність, довговічність, та мінімальні експлуатаційні витрати. Їх впровадження у розподільних мережах дозволяє забезпечити високий рівень захисту електроустаткування від коротких замикань, знизити кількість аварій та підвищити загальну стабільність та надійність роботи електромережі.

Таким чином, результати даного розділу підтверджують, що вакуумні струмообмежувальні пристрої шунтуючого типу мають значний потенціал для підвищення ефективності і безпеки роботи електричних мереж. Їх застосування у різних рівнях напруги сприяє зниженню ризиків аварійних ситуацій та покращенню загальної ефективності експлуатації електромереж.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ:

1. Матвійчук В.А., Стаднік М.І., Рубаненко О.О. Електропривод виробничих машин і механізмів. Навчальний посібник з виконання курсової роботи для спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». / Вінниця: ВНАУ, 2016.- с.92.,
2. Основи Інженерних методів розрахунків на міцність і жорсткість / [Г. М. Калетнік, М. Г. Чусов, В. М. Швайко та ін.], 2010. – 616 с.
3. Технічна механіка / [Г. М. Калетнік, В. М. Булгаков, О. М. Черниш та ін.], 2011. – 340 с.
4. Яндульський О.С., Дмитренко О.О., Касьянов Г.П. Релейний захист електричних систем. Мікропроцесорні пристрої релейного захисту і автоматики електроенергетичних систем: навч. посіб. 72 с., 2007 р.
5. Кідиба В.П., Шелепетень Т.М. Захист трансформаторів та автотрансформаторів: навч. посіб. НУ «ЛП», 2004. 180 с.
6. Кідиба В.П., Шелепетень Т.М. Захист ліній електропередавання: навч. посіб. НУ «ЛП», 2004. 184 с.
7. Буличев, А.В. Релейний захист електроенергетичних систем: Навч. посібник / А.В. Буличев, В.К. Ванін, А.А. Наволочний, М.Г. Попов. - СПб.: Вироб-во Політехн. ун-та, 2008. - 211 с.
8. Електроенергетика України. Структура, керування, інновації : монографія / І. В. Хоменко, О. А. Плахтій, В. П. Нерубацький, І. В. Стасюк. – Харків: НТУ «ХП», ТОВ «ПланетаПрінт», 2020. – 132 с.
9. Інтернет джерело: <https://www.mev.gov.ua/reforma/enerhetychnyy-front>
10. Правила улаштування електроустановок. - Видання офіційне. Міненерговугілля України. - Х. : Видавництво «Форт», 2017. - 760 с.
11. Василега П. О. Електропостачання/ П. О. Василега– Суми: ВТД «Університетська книга», 2008. – 415 с.