

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики


Кафедра теоретичної електротехніки

«На правах рукопису»

УДК 621.3

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

 Микола ОСТРОВЕРХОВ

«16» 01 2024 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-професійною програмою «Електротехнічні пристрої та
електротехнологічні комплекси»**

**зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»**

**на тему: «Засоби обмеження комутаційних перенапруг у високовольтних
кабельних лініях електропередачі»**

Виконала:

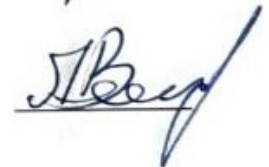
студентка 2 курсу, групи ЕВ-21мп
Галушко Валерія Валеріївна

Науковий керівник:

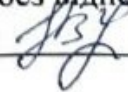
доцент, к.т.н.
Лободзинський Вадим Юрійович

Рецензент:

професор кафедри теоретичної електротехніки,
професор, д.т.н.
Сільвестров Антон Миколайович



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

Студент (-ка) 

Київ – 2024 року

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра теоретичної електротехніки

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Микола ОСТРОВЕРХОВ

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Галушко Валерія Валеріївна

1. Тема дисертації «Засоби обмеження комутаційних перенапруг у високовольтних кабельних лініях електропередачі», науковий керівник дисертації Лободзинський Вадим Юрійович, к.т.н., затверджені наказом по університету від 03.11.2023 р. № 5131-с
2. Термін подання студентом дисертації: 05.01.2024
3. Об'єкт дослідження: Розробка математичної моделі кабельної лінії електропередачі для моделювання оптимальних умов керованої комутації для обмеження перенапруги

4. Вихідні дані: Високовольтна кабельна лінія електропередачі на 110 кВ ПС «Фурси»- ПС «Рось»

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

- 1) Провести аналіз літературних джерел стосовно існуючих пристроїв керованої комутації. Принципи їх дії та основні технічні характеристики.
- 2) Розглянути конструктивні особливості високовольтної кабельної лінії електропередачі.
- 3) Розробка математичної моделі високовольтної кабельної лінії електропередачі на напругу 110 кВ.
- 4) Розробити методику вибору оптимальних умов керованої комутації для обмеження перенапруги на стадії розробки та проектування високовольтної кабельної лінії електропередачі.
- 5) Рішення завдань визначення початкового кута кожної фази, так щоб кожна фаза мала початковий кут включення рівного нулю із затримкою у часі.
- 6) Розробка стартап проекту.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація за матеріалами дисертації 12 слайдів

7. Орієнтовний перелік публікацій

- 1) Halushko V., Savichenko P., Lobodzynskyi V., Spinul L., Illina O. Calculation methods of branched circles with distributed parameters and between phase connections. Технології, інструменти та стратегії реалізації наукових досліджень: матеріали VI Міжнародної наукової конференції, м.Дніпро, 2023. С. 107-108. doi 10.36074/mcnd-04.08.2023
- 2) Halushko V., Lobodzynskyi V. Switching control and its impact on the stability of electric powersystems. Інноваційні тенденції сьогодення в сфері природничих, гуманітарних та точних наук: матеріали III Міжнародної

наукової конференції, м.Рівне, 2023. С. 90-92. doi 10.36074/mcnd-29.09.2023

- 3) Галушко В.В., Олійник В.Є., Лободзинський В.Ю., Бурик М.П. Аналіз перехідних процесів при зміні початкової фази включення високовольтної кабельної лінії. Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики», м. Київ. - Прийнято до публікації.

9. Дата видачі завдання: 01.09.2023

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз літератури, визначення структури дисертації	01.09.2023-11.09.2023	
2	Проведення аналізу технічного стану кабельних ліній в Україні	11.09.2023-25.09.2023	
3	Визначення основних аспектів будівництва високовольтних кабельних ліній	25.09.2023-09.10.2023	
4	Дослідження комутаційних перенапруг у кабельних системах	09.10.2023-30.10.2023	
5	Визначення технічних характеристик КЛ 110 кВ	30.10.2023-20.11.2023	
6	Моделювання обмеження комутаційних перенапруг	20.11.2023-11.12.2023	
7	Розробка стартап-проекту	11.12.2023-25.12.2023	
8	Оформлення дисертації	25.12.2023-05.01.2024	

Студент

Валерія ГАЛУШКО

Науковий керівник

Вадим ЛОБОДЗИНСЬКИЙ

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація виконана на 89 аркуші, 10 таблицях, 31 рисунках, та має 38 посилань, яка містить 5 основні розділи та стартап-проект.

Актуальність теми – забезпечення надійності та стабільності функціонування високовольтних кабельних систем електропередачі, які схильні до ризиків, пов'язаних із комутаційними перенапругами.

Мета дослідження – розробка та аналіз ефективних методів управління комутаційними перенапругами у високовольтних кабельних лініях електропередачі, з метою зниження ризиків пошкодження обладнання та підвищення загальної надійності електроенергетичних систем.

Об'єкт дослідження – кабельна лінія 110 кВ ПС «Фурси» - ПС «Рось».

Предмет дослідження – комутаційні перенапруги в кабельних лініях високої напруги та їх обмеження, зокрема керованим перемиканням.

Методи дослідження – методики розрахунку параметрів кабельної лінії, математичне моделювання, симуляції керованого перемикання, аналіз комутаційних перенапруг.

Апробація результатів дисертації – Галушко В.В., Олійник В.Є., Лободзинський В.Ю., Бурик М.П. Аналіз перехідних процесів при зміні початкової фази включення високовольтної кабельної лінії. Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики», м. Київ. 2023. - Прийнято до публікації.

Ключові слова: КАБЕЛЬНА ЛІНІЯ, КОМУТАЦІЙНІ ПЕРЕНАПРУГИ, ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ, КАБЕЛІ ЗІ ЗШИТОГО ПОЛІЕТИЛЕНУ, БАГАТОПОЛЮСНИК, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ.

ABSTRACT

Master's dissertation is done on 89 sheets, 10 tables, 31 figures and has 38 links, containing 5 main sections and a startup project.

Topicality of the topic - ensuring the reliability and stability of the operation of high-voltage cable power transmission systems, which are subject to risks associated with switching overvoltages.

The purpose of the research is to develop and analyze effective methods for managing switching overvoltages in high-voltage power transmission cable lines, with the goal of reducing the risks of equipment damage and increasing the overall reliability of power systems.

The object of the study is the 110 kV cable line from the 'Fursy' substation to the 'Ros' substation.

Subject of research is switching overvoltages in high-voltage cable lines and their limitation, particularly through controlled switching.

Research methods include techniques for calculating the parameters of the cable line, mathematical modeling, simulations of controlled switching, and analysis of switching overvoltages.

Approbation of the dissertation results - Halushko V., Oliynyk V., Lobodzynskyi V., Buryk M. Analysis of transient processes in changing the initial phase of high-voltage cable line switching. International scientific and technical conference of young scientists, graduate students and students "Modern problems of electric engineering and automation". 2023. - Accepted for publication.

Keywords: CABLE LINE, SWITCHING OVERVOLTAGES, TRANSIENTS, CROSS-LINKED POLYETHYLENE CABLES, MULTIPOLE, MATHEMATICAL MODEL.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП	10
1 ТЕХНІЧНИЙ СТАН КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ УКРАЇНИ	14
1.1 Характеристика та структура електричних мереж ОЕС України	14
1.2 Технічний стан енергетичної інфраструктури України після повномаштабного вторгнення	16
Висновок до розділу 1	17
2 ОСНОВНІ АСПЕКТИ БУДІВНИЦТВА ВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ.....	18
2.1 Порівняння надземних та підземних високовольтних ЛЕП	18
2.2 Етапи будівництва високовольтних КЛ.....	18
2.3 Структура кабелів напругою 110-500 кВ.....	21
2.4 Заходи заземлення кабельних ліній.....	24
2.5 Транспозиція екранів трифазних кабельних ліній	29
Висновок до розділу 2	34
3 АНАЛІЗ КОМУТАЦІЙНИХ ПЕРЕНАПРУГ У КАБЕЛЬНИХ СИСТЕМАХ.....	35
3.1 Загальна характеристика перенапруг	35
3.2 Техніки зменшення перехідних комутаційних процесів.....	37
3.3 Управління комутацією та її вплив на стабільність електричних мереж.....	43
3.4 Пристрої керованої комутації: принцип дії та основні технічні характеристики.....	50
Висновок до розділу 3	53
4 ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЛ 110 ПС «ФУРСИ» - ПС «РОСЬ»	55
4.1 Опис проекту та реалізації КЛ 110 кВ.....	55

4.2	Розрахунок параметрів КЛ 110 кВ ПС «Фурси»- ПС «Рось»	57
	Висновок до розділу 4	60
5	РОЗРАХУНОК КАБЕЛЬНОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ 110 КВ ТА ЗАСОБИ ОБМЕЖЕННЯ КОМУТАЦІЙНИХ ПЕРЕНАПРУГ	61
5.1	Комп’ютерна модель кабельної лінії електропередачі.....	61
5.2	Перевірка моделі для аналізу електричних кіл з високовольтними КЛ .	66
5.3	Обмеження комутаційних перенапруг у високовольтних кабельних лініях електропередачі	69
	Висновок до розділу 5	73
6	РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ	75
6.1	Опис ідеї проекту.....	75
6.2	Технологічний аудит проекту	77
6.3	Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї стартапу	78
6.4	Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	81
	Висновок до розділу 6	82
	ВИСНОВКИ.....	84
	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	85

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

АПВ	–	автоматичне повторне включення
ЕРС	–	електрорушійна сила
ЗПЕ	–	зшитий поліетилен
ККП	–	керований комутаційний пристрій
КЛ	–	кабельна лінія
КП	–	кероване перемикання
КСП	–	контрольована система перемикання
ОЕС	–	Об'єднана енергетична система України
ПЛ	–	повітряна лінія
ПП	–	перехідні процеси
ПС	–	підстанція
ПУЕ	–	Правила улаштування електроустановок
СЕС	–	сонячна електростанція
ENTSO- E	–	Європейська мережа операторів системи передачі електроенергії

ВСТУП

Електропередача - це процес транспортування електричної енергії від місць її виробництва до кінцевих споживачів, які включають домогосподарства, промислові об'єкти та інші установи. Ця технологічна система є ключовою для повсякденного життя мільйонів людей і має велике значення для економічного розвитку країн.

Стабільність електропостачання критично важлива для функціонування сучасної економіки, оскільки вона лежить в основі багатьох сфер діяльності, включаючи промисловість, комерцію, ІТ-сектор та фінансові послуги. Перебої у постачанні електроенергії можуть мати серйозні фінансові наслідки, порушуючи роботу підприємств і спричиняючи збитки.

У промисловому секторі надійне електропостачання необхідне для забезпечення безперервності виробничих процесів. Навіть короткотривалі перерви у подачі електроенергії можуть мати негативні наслідки, включно з фінансовими збитками та зупинкою виробництва. У ІТ-секторі перебої в електропостачанні можуть призводити до проблем із безпекою, адже деякі системи безпеки, включаючи системи контролю доступу, можуть вийти з ладу, що загрожує безпеці об'єктів. Медичні заклади, такі як лікарні, вкрай залежать від постійного електропостачання для функціонування життєво важливих медичних пристроїв, від апаратів штучного дихання до діагностичного обладнання.

З огляду на всі ці аспекти, стабільність електропередачі необхідна для гарантування економічного благополуччя та громадської безпеки. Дослідження та розробка стратегій для управління ризиками, пов'язаними з перебоями в електропостачанні, є важливими для підтримки надійності електроенергетичних систем. Основні стратегії можуть включати в себе планування та моделювання електромережі для виявлення потенційних проблем, розробку систем моніторингу та діагностики для раннього виявлення несправностей, а також розробку планів невідкладних заходів і аварійного відновлення.

Розвиток кабельних технологій є логічним кроком у контексті зростаючих потреб у електроенергії. Високовольтні та надвисоковольтні кабельні системи стають все більш популярними, з огляду на їх здатність забезпечувати більшу пропускну спроможність через збільшення напруги та поперечного перерізу кабелів. Це ставить нові вимоги до надійності та ефективності енергетичного обладнання, вимагаючи інновацій та вдосконалення в області кабельних технологій та обслуговування інфраструктури [1].

Електростанції з'єднуються між собою та з споживачами через електричні мережі, які формують централізовані системи управління. Існують два основних типи мереж електропередачі: повітряні лінії (ПЛ) та підземні кабельні системи (КЛ). Передача електроенергії на далекі відстані здебільшого здійснюється через ПЛ, в той час як КЛ використовуються для коротших дистанцій або в певних технічних умовах. В умовах сучасності розвиток і розширення ПЛ зустрічається з низкою викликів, що сприяє зростанню популярності підземних кабельних систем [2].

КЛ мають ряд недоліків у використанні, порівняно з повітряними. Зокрема, їх встановлення та ремонт вимагають більших витрат через складність будівельних робіт, високу вартість матеріалів та потребу у висококваліфікованому персоналі. Також, через температурні обмеження ізоляції, КЛ мають меншу пропускну спроможність на одиницю перерізу, а виявлення точного місця пошкодження може бути часомістким.

Проте, КЛ володіють низкою переваг. Вони можуть бути прокладені через автомагістралі та інші комунікації, не потребуючи великої площі для розміщення. Крім того, кабелі, часто прокладаються під землею, менше піддаються впливу атмосферних умов і є менш небезпечними для людей у випадку пошкодження.

Передача електроенергії на будь-яку відстань несе в собі неминучі втрати потужності, які залежать від багатьох факторів, серед яких є відстань від генераторів до споживачів, параметри напруги, а також опір ліній передачі, що впливають на їхню ефективність. Оскільки опір у лініях передачі призводить до

перетворення частини енергії у тепло, втрати потужності зростають із відстанню, для їх зменшення застосовується передача на високій напрузі в лініях, оскільки при однаковій кількості потужності потрібно менший струм. Важливо, щоб електроенергія, яка передається через електроенергетичні системи, відповідала певним стандартам якості, щоб забезпечити ефективність та надійність постачання.

При розробці електропередавальних систем, особливо тих, що працюють при високих та надвисоких напругах, слід враховувати вплив перехідних процесів(ПП), таких як комутаційні перенапруги. Ці явища стають більш значними при збільшенні рівня напруги в лініях передачі. Таким чином, у проектуванні електричних передавальних систем, як для ліній високої напруги (наприклад, 110 кВ), потрібно враховувати різні технічні аспекти та виклики, пов'язані з надійністю та ефективністю системи.

З початку повномасштабної військової агресії російської федерації проти України в лютому 2022 року енергетичний сектор країни зазнав значних ушкоджень. Об'єкти енергетичної інфраструктури, що мають критичне економічне, гуманітарне та геополітичне значення, стали мішенню для російських військових атак. Прямі збитки українського енергетичного сектору були оцінені в мільярди доларів. Система передачі електроенергії в Україні, що включає тисячі кілометрів ПЛ та КЛ і сотні підстанцій, постраждала від ворожих дій, що призвело до значних руйнувань і втрат контролю над частиною інфраструктури.

В умовах, коли енергетичний сектор України зазнав серйозних ушкоджень та перебудови через воєнні дії, дослідження перенапруг та впровадження високовольтних кабелів стають особливо актуальним для забезпечення більшої ефективності та надійності передачі електроенергії, що важливо для підвищення стабільного енергопостачання в регіонах та стійкості електромережі до зовнішніх впливів, включаючи воєнні дії.

Кероване перемикання (КП) високовольтних КЛ застосовується для зменшення комутаційних перенапруг, які можуть викликати серйозні проблеми

у електроенергетичних системах. ПП, які виникають під час звичайних перемикальних операцій, можуть викликати стрибки струму, перенапругу, створювати значні постійні складові струму, що негативно впливають на трансформатори, а також гармоніки в сигналах напруги та струму. Це може призводити до неправильної роботи реле захисту та збоїв у обладнанні. КП дозволяє точно контролювати моменти замикання та розмикання вимикачів, щоб мінімізувати або навіть усунути ці перехідні процеси.

1 ТЕХНІЧНИЙ СТАН КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ УКРАЇНИ

1.1 Характеристика та структура електричних мереж ОЕС України

Об'єднана енергетична система України (ОЕС) складається з електростанцій, електричних і теплових мереж, а також інших об'єктів, які зайняті у генерації, передачі та розподілі електричної та теплової енергії (рис. 1). Централізоване управління цими об'єктами сприяє їх ефективній роботі та координації. Станом на кінець 2015 року було встановлено, що більшість електрогенеруючих об'єктів та ключових електромереж зношені і потребують оновлення. Понад 90% ліній електропередач високої напруги (220 кВ та вище) та 55% основного обладнання підстанцій експлуатуються понад 25 років, а 56% ЛЕП і 17% підстанцій – понад 40 років [3, 4]. Електромережі України, побудовані переважно у 1960-1970-х роках та спроектовані за стандартами 1950-х, вже наближаються до кінця свого обмеженого терміну служби, оцінюваного в близько 10 років. Ця ситуація характеризується застарілою конфігурацією мереж, збільшенням вимог щодо якості електропостачання, а також глобальними напрямками, що акцентують на збереженні енергії та підвищенні її ефективності.



Рисунок 1 – Карта-схема магістральних електричних мереж ОЕС України [3]

"Укренерго", державна компанія України, відповідальна за керування ОЕС, забезпечуючи передачу електроенергії від виробників до розподільчих мереж через магістральні електромережі. Компанія керує більш ніж 21 300 км магістральних та міждержавних високовольтних ліній і відповідає за високовольтне обладнання та восьма регіональними електроенергетичними системами в країні (табл. 1).

Таблиця 1– Показники довжин ЛЕП України за 2019 рік наведено в таблиці [5]

Передача: довжина мереж	напруга	км	%
	800 кВ	84,01	0,35
	750 кВ	4403,17	18,35
	500-400 кВ	566,89	2,36
	330 кВ	12593,28	52,47
	220 кВ	2009,65	8,37
	110-150 кВ	486,42	2,03
	35 кВ	77,73	0,32
	КЛ 110-0,4 кВ	3780,65	15,75
Передача: витрати в мережах		млн кВт·год	% від відпуску в мережу
		3547	2,33
Розподіл: довжина мереж	напруга	км	
	ПЛ 110 (150) кВ	35463	
	ПЛ 35 кВ	61317	
	ПЛ 6(10) кВ	268722	
	ПЛ 0,4 кВ	386674	
	КЛ 110 (150)-35 кВ	635	
	КЛ 6 (10) кВ	41522	
	КЛ 0,4 кВ	29826	
Розподіл: витрати в мережах		млн кВт·год	% від відпуску в мережу
		12887	10,35

Основні проблеми, з якими стикається ОЕС України, включають обмежену пропускну спроможність ліній електропередач (ЛЕП), зокрема для передачі енергії від атомних електростанцій до споживачів, ненадійність енергопостачання у деяких регіонах, таких як Одеська та Чернівецька області, Київ та прилеглі території, а також проблеми із компенсацією реактивної потужності в електромережах та забезпеченням якісної напруги.

1.2 Технічний стан енергетичної інфраструктури України після повномасштабного вторгнення

Повномасштабна військова агресія російської федерації проти України, розпочата 24 лютого 2022 року, спричинила значні руйнування у енергетичному секторі країни. Енергетична інфраструктура України, критично важлива для національної економіки та гуманітарних потреб, стала мішенню для військових ударів. За даними Київської школи економіки та Світового банку, станом на березень 2023 року, збитки в секторі оцінюються приблизно в 11 мільярдів доларів та 10,6 мільярда доларів відповідно [6].

Станом на період після 24 лютого 2022 року, українська система передачі електроенергії, яка включає 23 600 км ПЛ та 141 підстанцію з напругою від 110 до 750 кВ, зазнала значних втрат. Близько 25% підстанцій передачі були розташовані на тимчасово окупованих територіях, а ще 12% опинилися під окупацією після цієї дати. В результаті цілеспрямованих атак, приблизно 45% контрольованих підстанцій були знищені або пошкоджені [6].

Важливим кроком у відповідь на воєнні дії стала синхронізація електромереж України та Молдови з Континентальною європейською мережею (ENTSO-E) 16 березня 2022 року. Це забезпечило Україні додаткову енергетичну стабільність і сприяло інтеграції з енергетичними ринками Європи. 30 червня 2022 року Україна розпочала комерційний експорт електроенергії до ЄС, експортувавши за перші 10 місяців 2022 року електроенергію на суму 542,5 млн доларів [7].

Системи розподілу електроенергії в Україні, включаючи понад 800 тисяч км ПЛ та КЛ з напругою від 0,4 до 150 кВ, також зазнали пошкоджень внаслідок військових дій. На початку 2022 року в країні було зареєстровано 17,7 мільйонів споживачів електроенергії, включаючи 17,2 мільйона домогосподарств і 0,5 мільйона комерційних клієнтів. Однак попит на електроенергію знизився приблизно на 30-35% порівняно з 2021 роком через переміщення населення та зупинку промислових підприємств [8].

Станом на січень 2023 року, більше ніж тисяча ПЛ (6-150 кВ) та вісім тисяч трансформаторів (6-150 кВ) були пошкоджені або відключені через обстріли та бойові дії [9]. Мільйони українців зіткнулися з обмеженим доступом до електрики взимку-навесні 2023 року. Серед найбільш постраждалих регіонів - Харківська, Донецька, Херсонська та Запорізька області, де інфраструктура зазнала серйозних руйнувань. Відновлення більш ніж 50% енергетичної інфраструктури, пошкодженої внаслідок війни, є ключовим завданням для України протягом наступних десятиліть.

Незважаючи на виклики, у 2023 році Україна демонструє значний прогрес у розвитку високовольтних ліній, зокрема завершенням будівництва 330 кВ лінії на Заході України компанією "Укренерго" [10]. Модернізація лінії передачі між Україною та Польщею, реалізована "Укренерго" та Polskie Sieci Elektroenergetyczne (PSE), зміцнила зв'язки між українською та європейською енергетичними системами [11]. Також Фонд Підтримки Енергетики України придбав і запустив пересувні високовольтні лабораторії для виявлення пошкоджень КЛ, що сприяє швидкому відновленню електропостачання у регіонах, постраждалих від війни [9].

Висновок до розділу 1

Технічний стан ЛЕП в Україні характеризується значним зносом і потребою в оновленні. Більшість ліній, побудованих у 1960-1970-х роках, досягли критичного віку експлуатації. Понад 90% високовольтних ЛЕП (220 кВ та вище) використовуються понад 25 років, а частина – близько 40 років. Військові дії, що розпочалися в 2022 році, завдали додаткових пошкоджень енергетичній інфраструктурі, ускладнивши ситуацію. Для вирішення цих проблем Україна зосереджується на модернізації та відновленні ЛЕП, залучаючи сучасні технології та зміцнюючи співпрацю з міжнародними партнерами для підвищення надійності та ефективності електропостачання.

2 ОСНОВНІ АСПЕКТИ БУДІВНИЦТВА ВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ

2.1 Порівняння надземних та підземних високовольтних ЛЕП

Вибір між високовольтними ЛЕП, які проходять повітрям чи під землею, виходять за рамки простого порівняння вартості. Надземні лінії зазвичай дешевші, але в міських умовах підземні можуть бути більш вигідними через естетичні та екологічні переваги, нижче електромагнітне випромінювання та більшу надійність.

У складних природних умовах, як-от на кам'янистих ґрунтах, підземне прокладання може бути неефективним, віддаючи перевагу надземним лініям на довгих та малонавантажених ділянках. Однак, гібридні системи, які комбінують обидва варіанти, часто є оптимальним рішенням, залежно від специфіки місцевості та потреб споживачів [12].

2.2 Етапи будівництва високовольтних КЛ.

На початку процесу проектування визначається траса майбутньої кабельної лінії (КЛ). Після цього проводяться інженерні вишукування, включаючи збір всіх необхідних документів, специфічних для даної лінії [13]. Без проведення таких досліджень неможливо розпочати розробку проектної документації, особливо коли йдеться про нові траси КЛ та місця для трансформаторних підстанцій. У випадках реконструкції, необхідне уточнення існуючих даних. Всі інженерні дослідження та проектні роботи виконуються згідно з чинними нормативними документами [13].

Згідно з завданням на проектування, виданим замовником, визначаються трансформаторні підстанції та розподільчі пристрої, які є початковими і кінцевими точками КЛ. Це стосується випадків, коли мова йде про заміну або прокладання кабелю між підстанціями. В подальшому, на основі цих даних, розраховуються номінальні та аварійні навантаження. Це також включає перевірку рекомендованого перерізу кабелю з урахуванням розрахункових

навантажень лінії в аварійному режимі, виходячи з номінальних потужностей трансформаторів та допустимого тривалого струму.

Однією з особливостей КЛ, зокрема тих, що працюють під високою напругою, є їх здатність генерувати магнітні поля, які можуть бути небажаними у житлових районах та приміщеннях. Ця проблема стає особливо виразною, коли йдеться про вибір методу заземлення тому при проектуванні КЛ необхідно передбачити використання екрануючих елементів, які мінімізують вплив магнітного поля на оточення.

Отримавши дані з інженерних досліджень, розпочинається наступний етап проектування - розробка плану траси. Відповідно до вимог Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), у плані прокладання кабельної траси на кресленнях повинні бути відображені наступні елементи [14]:

1. Точний маршрут прокладання кабелю прив'язаний до стабільних орієнтирів, з вказівкою місць пікетування. Пікетування зазвичай виконується кожні 50 метрів на прямих ділянках траси або в місцях її поворотів.
2. Тип кабелю, а також спосіб його прокладання, який може включати в себе такі методи як прокладання в траншеї, в трубі, методом проколу тощо.
3. Загальну протяжність траси. У випадку наявності географічних перешкод або інженерних конструкцій, в плані вказуються профілі перетинів цих об'єктів з деталями про глибину прокладання кабелю.

При проектуванні у міських умовах КЛ, є можливість їх тісного розташування поруч з іншими комунікаційними системами. Згідно з ПУЕ, можна знайти рекомендації щодо мінімально допустимих відстаней від КЛ до фундаментів будівель та інших комунікацій [14].

Наприклад, для забезпечення безпеки, між підземною частиною будівлі та найближчим до неї кабелем повинна бути дотримана горизонтальна відстань, що дорівнює глибині прокладання кабелю і не менше 0,6 метра.

Окрім того, при проектуванні КЛ необхідно враховувати спосіб їх прокладки при перетині, зближенні або паралельному розміщенні з іншими

комунікаційними лініями чи фундаментами. Це допомагає уникнути можливих конфліктів та забезпечити надійну роботу всіх систем [15].

Проектування КЛ також враховує можливість укладення декількох кабелів в одній траншеї. У випадку ПЛ для досягнення подібного рівня інтеграції потрібно було б створювати дволанцюгові лінії або будувати кілька паралельних ліній. Ця особливість набуває особливої значущості у міських умовах, де використання ліній вищої напруги може бути обмежене через необхідність зведення відповідних підстанцій. Згідно з ПУЕ, при прокладанні декількох КЛ у одній траншеї необхідно дотримуватися певних відстаней між кабелями. Для кабелів напругою до 10 кВ ця відстань становить 0,1 метра, для кабелів між 20 - 35 кВ відстань збільшується до 0,25 метра, а для кабелів вище 110 кВ слід забезпечувати відстань 0,5 метра. Крім того, для кабелів з напругою 110 – 330 кВ потрібно використовувати залізобетонні плити, встановлені на ребро, для розділення КЛ [14].

Після затвердження плану траси КЛ, проект переходить до подальших етапів, які включають формування відомостей об'ємів робіт, перетинів та специфікацій. Для кращого орієнтування у проекті створюється ситуаційний план, через який схематично відображено як проєктована траса, так і інші, уже існуючі або плановані комунікації.

У відомості перетинів, що формується одночасно з планом траси або відразу після нього, вказуються деталі об'єктів, які перетинають КЛ: глибина розташування кабелю у місці перетину, вертикальний розмір, методи захисту кабелю (наприклад, за допомогою поліетиленової або гофрованої труби) та довжина цих захисних елементів. Всі перетини нумеруються та позначаються на плані траси [14].

Відомість об'ємів робіт містить інформацію про основні типи робіт та їх обсяги, зокрема:

- встановлення або видалення кабельних систем (у трубопроводах, траншеях, розподільчих пристроях), монтаж кінцевих та сполучних муфт, встановлення бордюрів;

- викопування землі на різні глибини та ширини для траншей (залежно від необхідності укладання одного або декількох кабелів);
- Вимірювання для укладання сигнальної стрічки, укладання цегли, гофрованої труби та будівництво підземних переходів.

У документації, що орієнтується на інформацію про обсяги виконаних робіт, визначено необхідність матеріалів, які потрібні для конструкції КЛ. Цей список включає, але не обмежується, кількість з'єднувальних та кінцевих муфт, цегли, довжина труб і сигнальної стрічки, а також екрани та їхні заземлювачі, кабельні стяжки, пісок, довжина кабелю, герметик для труб. Це забезпечує всі необхідні ресурси для ефективного виконання робіт.

Робочий проект, який є основним документом для початку будівництва КЛ, формується на основі різних документів. Це включає в себе договір на виконання проектних робіт, видане замовником завдання на проектування, а також листи від нього, які можуть містити рекомендації щодо конкретних аспектів проекту, наприклад, щодо вибору перерізу кабелю [14].

На завершальному етапі проекту формуються кошторисні документи. Цей процес включає узгодження з власниками земельних ділянок та комунікацій, а також із органами виконавчої влади. Це забезпечує юридичну та адміністративну підтримку проекту, а також допомагає уникнути можливих конфліктів та затримок у процесі реалізації проекту КЛ.

2.3 Структура кабелів напругою 110-500 кВ

КЛ з номінальною напругою 110-500 кВ широко використовуються у енергетичних системах для з'єднання різних точок електричних мереж, таких як генеруючі станції, перетворювальні або розподільні підстанції, а також для зв'язку між підстанціями. Ці лінії можуть бути комбінованими, включаючи і кабельні, і повітряні ділянки.

Високовольтні КЛ складаються з трьох одножильних кабелів, оснащених високовольтними контактними виводами на кожному кінці, відомими як "кінцеві муфти". Для з'єднання окремих сегментів кабелю, особливо коли довжина лінії

перевищує довжину кабелю на барабані, використовуються з'єднувальні муфти. Додатково, у системах високовольтних кабелів застосовуються кабельні з'єднувальні коробки, коробки для заземлення екранів і заземлюючі кабелі.

Структура високовольтних кабелів, виготовлених із ЗПЕ, представлена на рис. 2.



Рисунок 2 – Схема кабелю напругою 110-500 кВ

Струмopрoвідні жили, виготовлені з міді або алюмінію, служать для передачі електричного струму. Важливо враховувати скін-ефект, який зосереджує струм на поверхні провідника, та ефект близькості, що виникає в кабельних лініях з тісним розташуванням фаз, зосереджуючи струм на зовнішній поверхні жили.

Що стосується конструкції струмопровідних жил, існують два основні типи: круглі жили з компактною скруткою та сегментовані (або міллікенівські) жили. Круглі жили складаються з декількох витих провідників, розташованих концентрично. Така конструкція забезпечує низький електричний опір і робить скін-ефект та ефект близькості подібними до тих, що спостерігаються у монолітних жилах великого перетину.

Сегментовані жили, з іншого боку, складаються з кількох великих провідників у формі секторів, ізольованих один від одного. Ці провідники утворюють циліндричну жилу, їх спіральна конструкція зменшує вплив ефекту близькості. Такі жили використовуються для діаметрів понад 1200 мм² у випадку

алюмінієвих і 1000 мм² для мідних жил. Структура типу «Milliken» значно знижує як скін-ефект, так і ефект близькості [16].

Сегментовані мідні жили з перетином понад 1600 мм² часто виготовляються з емальованих провідників, зменшуючи вплив скін-ефекту і дозволяючи рівномірний розподіл струму. Такий підхід дозволяє зменшити загальний перетин жили, зберігаючи пропускну спроможність.

Напівпровідниковий екран жили у електричних кабелях служить для стабілізації та рівномірного розподілу електричного поля між струмопровідною жилою та шаром ізоляції, зазвичай з поліетилену. Екран компенсує або зменшує різницю у напруженості електричного поля на межі між металом та ізоляцією, запобігаючи локалізації високих напружень, що можуть призвести до пошкодження ізоляції та кабелю. Він також захищає від зовнішніх електромагнітних впливів, підвищуючи надійність та довговічність кабельної системи.

Ізоляція зі зшитого поліетилену (ЗПЕ, англ. XLPE) відокремлює струмопровідну жилу, що знаходиться під високим напругою, від напівпровідникового екрану з потенціалом землі. ЗПЕ вирізняється високою стійкістю до пробою під впливом електричного поля, здатністю витримувати високі напруження у різних умовах, включаючи пускові струми та короточасні перенапруги. Також цей матеріал має високу механічну міцність та хімічну стійкість, що робить його ідеальним для довготривалого застосування.

Напівпровідниковий екран ізоляції у кабельних системах забезпечує плавний перехід напруженості електричного поля між ізоляцією та зовнішнім металевим екраном, сприяючи оптимальному розподілу поля в кабелі. Його задача - уникнути різких перепадів напруженості поля між ізоляцією, де поле існує, та металевим екраном, де воно нульове, тим самим попереджаючи локалізацію високих напружень, що можуть призвести до пробоїв ізоляції. Його напівпровідникова структура розподіляє електричне поле рівномірно, знижуючи ризик електричних порушень та підвищуючи надійність кабелю. Екран також

захищає від зовнішніх електромагнітних перешкод, забезпечуючи стабільність роботи кабельної системи.

Металевий екран у кабелях усуває електричне поле на їх поверхні, особливо при високих напругах, виступаючи як другий електрод у конденсаторній системі кабелю, де першим є струмопровідна жила. Його основні функції включають забезпечення заземлення для відведення ємкісних струмів та струмів КЗ на землю, а також захист від індукційних вихрових струмів від інших кабелів.

Металевий екран також ізолюється на більшій частині довжини кабелю для захисту від корозії та герметизує кабель, запобігаючи проникненню вологи що може спричинити утворення водних дерев в ізоляції, що згодом може призвести до її руйнування.

Для забезпечення електричної ізоляції металевого екрану від землі та захисту від вологості та корозії, в якості захисної оболонки часто використовують поліетилен.

У ситуаціях, де потрібна підвищена пожежобезпека, застосовують матеріали HFFR, які не містять галогенів і є більш вогнестійкими, хоча й мають гірші механічні властивості та вищу вартість порівняно з поліетиленом. Для контролю цілісності зовнішньої оболонки може застосовуватися шар напівпровідного матеріалу, що забезпечує додатковий захист.

2.4 Заходи заземлення кабельних ліній

Заземлення екранів кабелю є ключовим заходом безпеки та функціональності в системах електропередачі. Існують такі види заземлення як в одній точці, в двох точках та транспозиція екранів переваги і основні моменти реалізації наведено в табл. 2.

Коли змінний струм протікає через жилу кабелю, то на металічних екранах різних фаз і між кінцями лінії виникає напруга, пропорційна індукованому струму. Це створює ризик ураження електричним струмом, особливо на незаземлених кінцях лінії, де може виникати значна індукована напруга.

Таблиця 2 – Порівняльна характеристика різних видів заземлення [16]

Вид заземлення	Постійне в двох точках: металеві екрани заземлені з обох боків	В одній точці: металевий екран заземлений з однієї сторони, а з іншої підключений до ОПН	Транспозиція екранів: металевий екран заземлюється відповідно з двох сторін лінії, транспозиція екранів знижує загальну індуковану напругу, яка виникає в екрані кожної фази. Транспозиція здійснюється за допомогою спеціального з'єднання металевих екранів з ОПН
Характеристика лінії	-Довжина лінії більше 200 м -Переріз кабеля не більше 630 мм ²	-Довжина лінії менше 1 км	-Лінія великої довжини -Велика пропускна здатність, переріз більше 630 мм ² , Cu -Встановлення з'єднувальних муфт -Кількість відрізків: кратне трьом, довжини відрізків мають бути приблизно рівні
Необхідний матеріал	-Кабель типу R2V або ізоляція якого має невелику пробивну напруженість	-ОПН -Кабель типу R2V або ізоляція якого має невелику пробивну напруженість	-З'єднання з роздільником екрана -Коаксіальний кабель -ОПН в точці транспозиції екранів
Переваги	-Простота в установці -Відсутність екіпотенціального кабеля, який встановлюється вздовж з'єднання	-Оптимальне використання пропускної здатності -Можливий захист "маса-кабель"	-Екіпотенціальний кабель вздовж лінії(необов'язково) -Зменшення індукованих струмів в екранах
Недоліки	-Зниження пропускної здатності -Захист "маса-кабель" неможливий	-Екіпотенціальний кабель вздовж всієї лінії -Використання ОПН	-Необхідність обслуговування -Вартість

На рисунках 3-5 представлена реалізація систем заземлення в одній точці, в двох точках та транспозиція екранів відповідно [16].

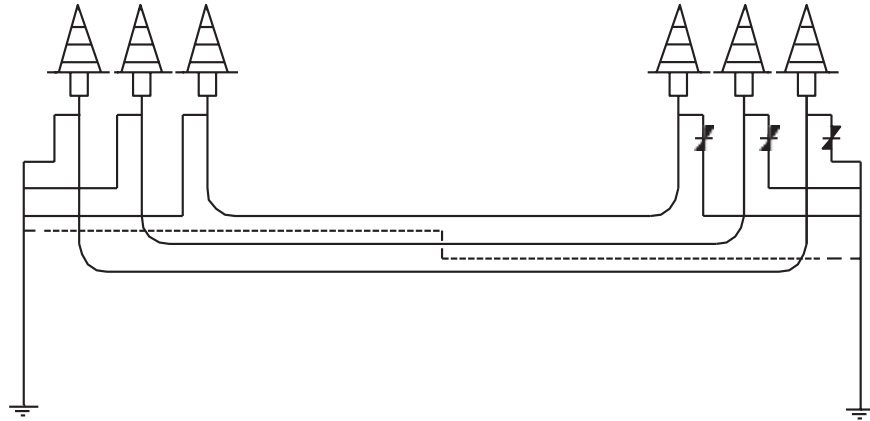


Рисунок 3 –Електрична схема лінії із заземленням в одній точці

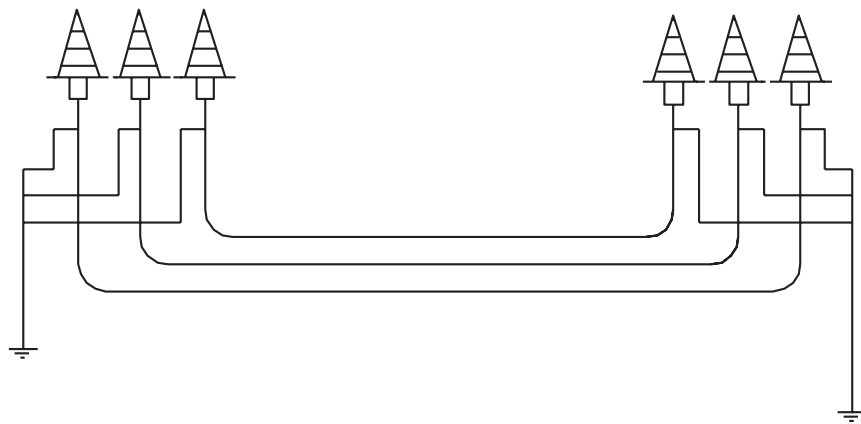


Рисунок 4 – Схема заземлення з двох кінців лінії

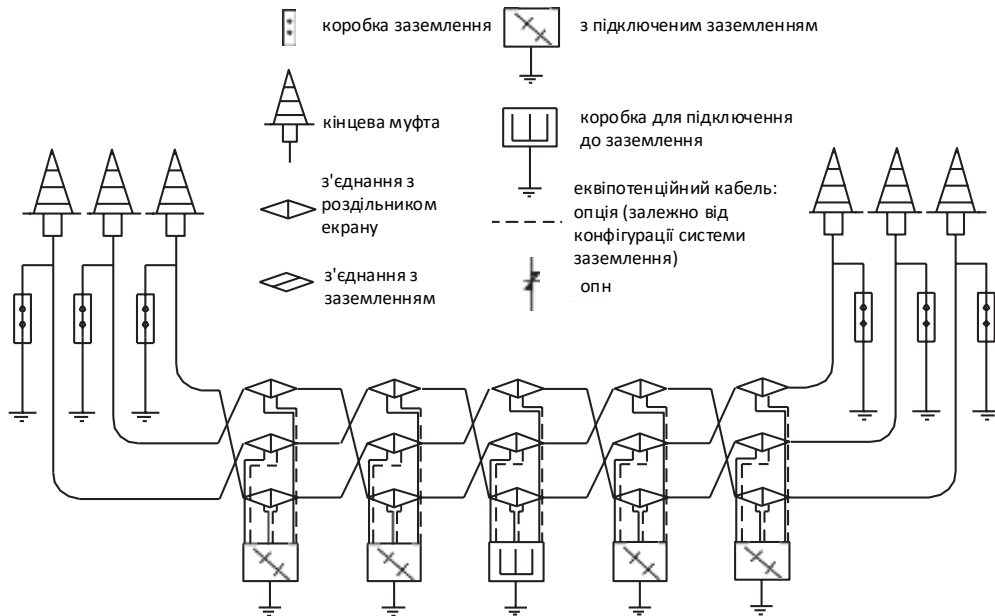


Рисунок 5 – Система транспозиції екранів

У нормальних умовах роботи лінії, індукована напруга зазвичай досягає лише декількох десятків вольт, і її можна контролювати за допомогою простих

методів. Проте при струмах короткого замикання, розміри яких можуть досягати кількох кілоампер, індукована напруга може стрімко зростати, досягаючи кількох кіловольт.

У випадках ударів блискавки чи при комутаційних операціях, напруга між землею та металічним екраном може сягати кількох десятків кіловольт, створюючи можливість для електричного розряду пройти через захисну оболонку до землі. Тому слід обмежити зростання потенціалу екрану, використовуючи спеціальне обладнання для обмеження перенапруг (ОПН) між екраном і землею.

ОПН працюють як нелінійні опори: при низькій нарузі (в нормальних умовах) вони мають високий опір і функціонують як ізолятори, але під високим напруженням, як у випадку удару блискавки, вони стають провідними і дозволяють струму протікати, тим самим обмежуючи перенапругу до рівня розрядного напруження ОПН [17].

У режимі короткого замикання (КЗ) в електричних мережах, особливо в високовольтних, виникають струми КЗ через непередбачене з'єднання фаз між собою або з землею. Часто нейтраль трансформатора у таких мережах з'єднується з землею, при цьому опір цього з'єднання варіюється в залежності від типу нейтралі.

Існують два основних види короткозамкнутих кола: симетричні та однофазні. Симетричні короткозамкнуті кола відзначаються ситуацією, коли всі три фази замкнуті накоротко, утворюючи симетричну систему, де струми циркулюють лише через основні провідники кабельної лінії. Натомість однофазні короткозамкнуті кола виникають у несиметричних системах, де однофазні струми зазвичай повертаються через землю або через паралельні електричні провідники до системи заземлення.

У таких випадках основними каналами для повернення струму часто стають проводи заземлення та металічні екрани кабелів, заземлені на кінцях ліній. Тому необхідно, щоб металічні екрани кабелів мали достатній переріз, аби ефективно витримувати навантаження від однофазних струмів КЗ.

Система захисту змішаних повітряних і підземних кабельних ліній або "маса-кабель" є важливим компонентом при монтажі комбінованих повітряно-підземних ліній електропередачі, коли заземлення виконується лише в одній точці (рис.6). Цей вид захисту використовується для виявлення пошкоджень в кабелі та запобігання повторним включенням у випадку їх виявлення [12].

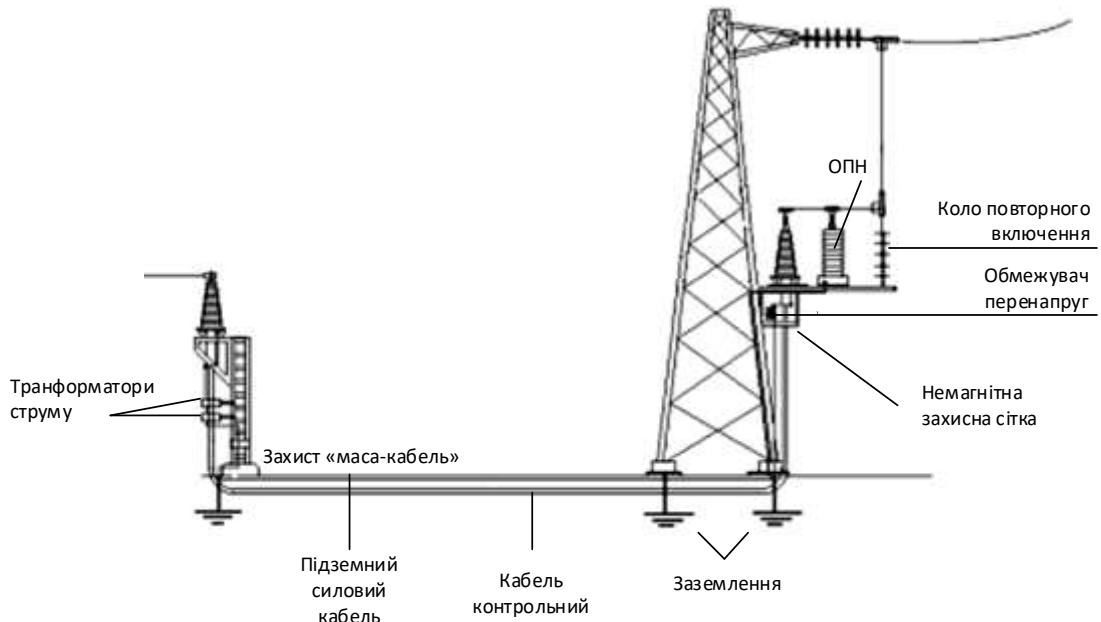


Рисунок 6 – Установка повітряно-підземної лінії із захистом «маса-кабель»

Принцип роботи цього захисту базується на використанні трансформатора струму з тороїдальним сердечником, який інтегрується у заземлюючий контур екрану кабелю. У випадку пошкодження ізоляції на повітряній ділянці лінії, трансформатор не фіксує струм, але при пошкодженнях в кабелі він активується. Трансформатор підключений до реле, яке при виявленні пошкодження замикає свої контакти та відправляє сигнал про аварію, ініціюючи автоматичне повторне включення (АПВ).

Основною перевагою системи захисту "маса-кабель" є значне спрощення експлуатації комбінованих повітряно-підземних ліній. Вона дозволяє ефективно виявляти та реагувати на пошкодження, тим самим зменшуючи ризик виникнення пожеж у підземних колекторах. Ці системи є відносно недорогими та широко використовуються в електротехнічних інсталяціях та підземних колекторах, де потрібний надійний захист від потенційних аварій.

2.5 Транспозиція екранів трифазних кабельних ліній

В процесі створення математичної моделі для дослідження струмопровідних жил і електромагнітних екранів у однофазних трифазних кабелях з ЗПЕ, враховують методи заземлення екранів, а саме транспозиція вважається однією з найбільш ефективних стратегій для мінімізації поздовжніх струмів у екранах кабелів. Цей метод ефективно знижує інтенсивність струмів до рівня десятків ампер, значно покращуючи продуктивність кабельної системи. Проте, із зростанням довжини КЛ та в точках транспозиції можливе підвищення напруги, що ризикує перевищити максимально допустимий рівень міцності ізоляції. Це питання можна вирішити шляхом збільшення кількості транспозиційних циклів, що допоможе контролювати напругу та уникнути перенавантаження ізоляції [18-19].

Розглянемо процес формування струму в одножильних екранованих кабелях, які є складовою частиною трифазної системи (рис. 7). Склад такої системи включає в себе три окремі одножильні кабелі з екранами, які можуть бути виготовлені з алюмінію чи міді. На кінцевих ділянках цих кабелів, зазвичай, здійснюється з'єднання екранів між усіма фазами та їх подальше заземлення.

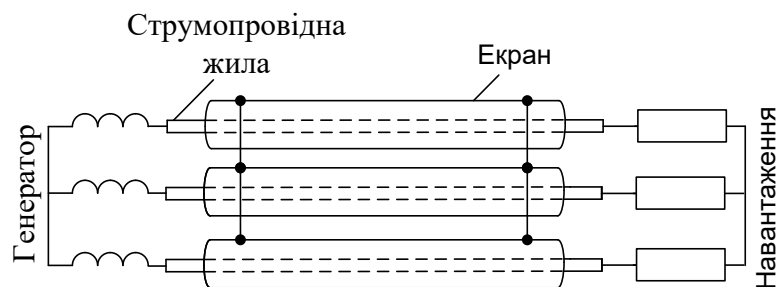


Рисунок 7 – Система, що має три фази і складається з трьох окремих екранованих кабелів

Однак, з'єднання екранів між собою, а не їх заземлення, є причиною виникнення струмів. У процесі роботи однофазного кабелю з екранами, заземленими з обох сторін, утворюються два взаємопов'язані контури струму. Це означає, що струм, що протікає через струмопровідну жилу кабелю, через явище взаємної індукції між жилою та екраном, може індукувати струм у самому екрані. Без вжиття додаткових заходів для контролю цього явища, інтенсивність

струму в екрані може досягати значень, порівнянних із струмом у жилі кабелю. Така ситуація може призвести до небажаних наслідків, таких як надмірні втрати енергії або потенційні пошкодження кабельної системи [11].

Якщо розглянути ситуацію, де екрани з'єднані між собою на кінцях лінії, але не заземлені, можна побачити, як це впливає на появу струмів у системі. Для аналізу цього явища виберемо момент часу t_1 , коли напруга на фазі В дорівнює нулю, тоді як напруга між фазами А та С є лінійною (рис. 8). Це спрощення дозволяє нам математично вивести механізм появи струмів, зберігаючи при цьому фізичну суть процесу.

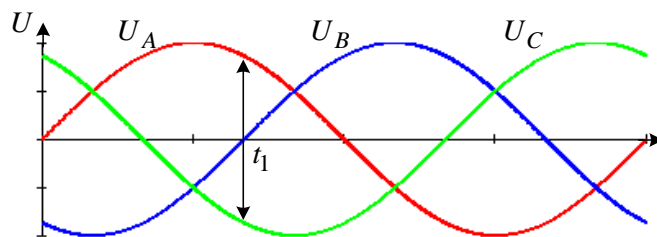


Рисунок 8 – Напруга на фазах

Розглядаючи екран як провідник, який утворює замкнутий контур, він знаходиться на відстані r_E від жили до екрану кабелю та на відстані h від жили до сусіднього кабелю (рис. 9).

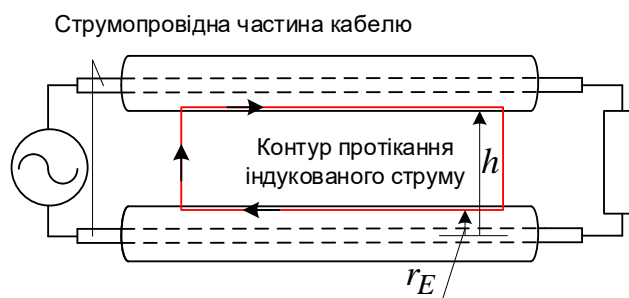


Рисунок 9 – Схематичне представлення екрана провідником

Струми, які протікають в жилі та екрані, можна розглядати як струми, що протікають через два умовних контури. Ці контури демонструються на схемі рис. 10. Струм, що тече через жилу кабелю ($I_{ж}$), і його шлях через контур 5-6-7-8, створює змінне магнітне поле навколо проводів. Ураховуючи значну різницю в відстанях між точками 5-6 порівняно з точками 5-8, для аналізу береться до уваги тільки магнітне поле, генероване ділянками 5-6 і 7-8. Вектор магнітної індукції

B проникає через контур 1-2-3-4, що призводить до виникнення струму I_e . у цьому контурі [20].

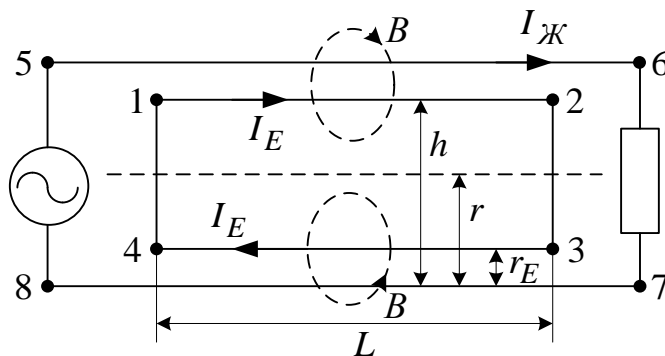


Рисунок 10 – Еквівалентна схема

Магнітне поточозчеплення, яке відбувається у контурі 1-2-3-4, еквівалентне магнітному потоку через цей контур, оскільки цей контур складається з одного витка

$$\Psi = \oint_S B dS \quad (2.1)$$

де S – площа контуру 1–2–3–4. Вздовж контуру з довжиною L , магнітна індукція B залишається сталою, отже, вираз можна сформулювати наступним чином:

$$\Psi = L \int_{r_E}^h B dr \quad (2.2)$$

де h – відстань від жили до сусіднього екрана, r_E – радіус екрана.

Підставимо $B = \mu \mu_0 H$, де μ – магнітна проникність, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна постійна; $H = I_{\text{Ж}} / 2\pi r$ [21]. Далі підставимо B та H у формулу (2.2):

$$\Psi = L \int_{r_E}^h \frac{1}{2\pi r} \mu \mu_0 dr. \quad (2.3)$$

Виносимо константні величини, які не залежать від радіуса, з-під знака інтеграла та інтегруємо, як показано в рівнянні (2.3):

$$\Psi = \frac{L I \mu \mu_0}{2\pi} \int_{r_E}^h \frac{dr}{r}, \quad \Psi = \frac{L I \mu \mu_0}{2\pi} \ln \frac{h}{r_E}. \quad (2.4)$$

Коефіцієнти взаємної індукції між контуром 5-6-7-8 та контуром 1-2-3-4 визначаються: $M = \Psi/I$ та підставимо його у (2.4), отримаємо:

$$M = \frac{L\mu\mu_0}{2\pi} \ln \frac{h}{r_E}. \quad (2.5)$$

ЕРС у контурі наводиться за рахунок взаємної індуктивності між контурами.

$$\dot{E} = -M \frac{d\dot{I}}{dt}. \quad (2.6)$$

Запишемо

$$\dot{E} = E_m e^{j\omega t}, \quad \dot{I} = I_m e^{j\omega t} \quad (2.7)$$

де E_m та I_m – амплітудні значення ЕРС і струму.

Візьмемо похідну виразу (2.8)

$$\frac{d\dot{I}}{dt} = j\omega I_m e^{j\omega t}, \quad (2.8)$$

і підставимо (2.6) в (2.9), одержуємо:

$$E_m e^{j\omega t} = -M j\omega I_m e^{j\omega t} \quad \text{або} \quad E_m = -M j\omega I_m, \quad (2.9)$$

Замінімо $I = I_{\text{Ж}}$ отримаємо рівняння (2.10) для жили 1-2. Аналогічно, така ж ЕРС виникає від жили 3-4, тому загальна ЕРС у системі буде представлена наступним чином:

$$E = -j\omega M I_{\text{Ж}} \quad (2.10)$$

Струм екрану I_E так само створює ЕРС, тому

$$E = -2j\omega M (I_{\text{Ж}} + I_E) \quad (2.11)$$

Струм I_E , протікаючи через екран, створює падіння напруги, яке можна визначити як $2I_E R_E$. Відповідно до закону Кірхгофа:

$$-2j\omega M (I_{\text{Ж}} + I_E) + 2I_E R_E = 0 \quad (2.12)$$

Із рівняння (2.12) виражаємо I_E

$$I_E = \frac{I_{\text{Ж}} j\omega M}{R_E - j\omega M} \quad (2.13)$$

Звідки модуль струму

$$I_E = \frac{I_{\text{Ж}} j\omega M}{R_E - j\omega M} \quad (2.14)$$

У трифазних системах, де використовуються одножильні кабелі, виникнення поздовжніх струмів у екранах обумовлене з'єднанням цих екранів на кінцях лінії. Це з'єднання стає причиною індукції струмів усередині екранів кабелів, інтенсивність яких може бути порівнянна з величиною струмів, що протікають у жилах [20].

Для зменшення струмів у екранах кабелів, як у звичайних умовах, так і під час КЗ, часто достатньо використання одного повного циклу транспозиції. Проте, в певних ситуаціях, особливо коли виникає необхідність управління збільшеними рівнями допустимої напруги U_E , може знадобитися додаткове збільшення кількості вузлів транспозиції та повних циклів. Кількість циклів транспозиції обчислюється на основі аналізу напруги, яка виникає на кожному циклі, та її порівняння з максимально допустимою напругою $U_{E,\text{доп}}$, яка встановлена для екрану кабелю [18].

Щоб мінімізувати рівень поздовжніх струмів у екранах однофазних кабелів у складі трифазної системи, використовується метод електромагнітної компенсації, що полягає у транспозиції екранів (рис. 11), це передбачає, що сумарна ЕРС, яка індукується у трьох окремих секціях транспозиції екранів (утворюючи контур a-b-c-d-e-f), в підсумку дорівнює нулю. Це досягається завдяки зсуву ЕРС на 120 градусів. В результаті, у нормальному режимі роботи через екрани не протікають поздовжні струми.

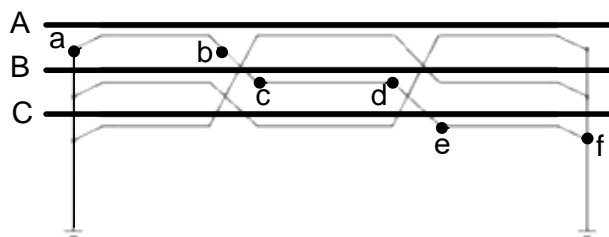


Рисунок 11 – Схема заземлення екранів кабелю з транспозицією екранів

Якщо у системі виникає асиметрія фаз, то загальна ЕРС в екранах кабелю не буде рівною нулю. Це обумовлює виникнення струму, який тече через екран кабелю, спричиняючи його додаткове нагрівання. Таке збільшення температури

може негативно впливати на ізоляцію, знижуючи її ефективність та довговічність.

Висновок до розділу 2

Ефективне проектування високовольтних кабельних ЛЕП вимагає комплексного підходу, який включає вибір якісних матеріалів та застосування спеціалізованих технічних рішень. Особлива увага приділяється обмеженню комутаційних перенапруг через методи, такі як заземлення екранів, що мінімізують втрати енергії та підвищують ефективність передачі. Впровадження заходів з транспозицією екранів, надійна кабельна конструкція, використання ОПН тощо, гарантує безпеку і зменшує ризики, пов'язані з перенапругами, забезпечуючи стабільність системи.

3 АНАЛІЗ КОМУТАЦІЙНИХ ПЕРЕНАПРУГ У КАБЕЛЬНИХ СИСТЕМАХ

3.1 Загальна характеристика перенапруг

Залежно від причини виникнення перенапруг, їх можна класифікувати на зовнішні та внутрішні [11], як наведено в табл 3.

Таблиця 3 – Класифікація перенапруг в залежності від причини виникнення

Види перенапруг	
Зовнішні (грозові розряди)	Внутрішні перенапруги
Прямий удар блискавки Індуктовані перенапруги Набігаючі хвилі	<p>Комутаційні перенапруги виникають при:</p> <ul style="list-style-type: none"> -ввімкненні розімкненої лінії; -автоматичному повторному ввімкненні; -відключенні конденсаторів та ненавантажених ліній; -відключенні великих струмів; -відключенні малих індуктивних струмів; -переміжних замиканнях на землю <p>Квазістаціонарні перенапруги:</p> <ul style="list-style-type: none"> -режимні перенапруги; -резонансні перенапруги; -ферорезонансні перенапруги

Однак, у кабельних системах перенапруги переважно викликані комутаційними операціями, тому комутаційні перенапруги є основною проблемою. Комутаційні перенапруги сильно залежать від довжини лінії і вищі в кабельних системах, порівняно з ПЛ [2].

Математичне виведення комутаційних перехідних процесів (ПП) також корисне для оцінки амплітуди та частоти перенапруг. Проаналізуємо математично послідовно з'єднану RLC-ланцюг з джерелом змінного струму.

Електричне коло можна описати через миттєву напругу на джерелі змінного струму $U_M \sin(\omega t + \theta)$, падіння напруги на резисторі RI , падіння напруги на індукторі, що пропорційне швидкості зміни струму з часом $L \frac{dl}{dt}$, напруга на конденсаторі, яка залежить від інтегралу струму по часу $\frac{1}{C} \int l dt$:

$$U_M \sin(\omega t + \theta) = RI + L \frac{dl}{dt} + \frac{1}{C} \int l dt, \quad (3.1)$$

де U_M - це амплітуда напруги, ω - кутова частота, t - час, а θ - фазовий зсув, I - миттєвим значенням струму в ланцюгу.

Струм є сумою вимушеної та вільної складових:

$$I(t) = I_{\text{вум}}(t) + I_{\text{віль}}(t). \quad (3.2)$$

Вимушений компонент є стаціонарним компонентом, і його легко отримати за допомогою векторів:

$$I_{\text{вум}}(t) = \frac{U_M}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \sin\left(\omega t + \theta - \tan^{-1}\left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}\right)\right). \quad (3.3)$$

Перехідний компонент є результатом обміну енергією між конденсатором і котушкою індуктивності, який зрештою гаситься опором.

Тут характерне рівняння електричного кола є

$$s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC} = 0, \quad (3.4)$$

$$s_1, s_2 = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}, \quad (3.5)$$

$$I(t) = A1 \cdot e^{s_1 t} + A2 \cdot e^{s_2 t}. \quad (3.6)$$

Для знаходження значень $A1$ і $A2$, які мають відношення до початкових умов системи:

$$I(0) = A1 + A2, \quad \dot{I}(0) = s_1 A1 + s_2 A2, \quad (3.7)$$

$$I(0) = 0 \rightarrow I_{\text{віль}}(0) = -I_{\text{вум}}(0) \quad \text{і} \quad \dot{I}(0) = \dot{I}_{\text{вум}}(0) + \dot{I}_{\text{віль}}(0), \quad (3.8)$$

$$\dot{I}_{\text{віль}}(0) = \left[\frac{U_M \omega}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \cos\left(\theta - \tan^{-1}\left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}\right)\right) \right] - \left(\frac{U_M}{L} \sin(\theta)\right). \quad (3.9)$$

Отримаємо $A1$ і $A2$, використовуючи ці початкові умови, і кінцева відповідь $I(t)$ буде

$$I(t) = \frac{U_M}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \sin \left(\omega t + \theta - \tan^{-1} \left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \right) \right) + \frac{i_{в\dot{и}л}(0) + i_{в\dot{и}м}(0)s_2}{s_1 - s_2} e^{s_1 t} + \frac{i_{в\dot{и}л}(0) + i_{в\dot{и}м}(0)s_1}{s_2 - s_1} e^{s_2 t} \quad (3.10)$$

Отже, проаналізувавши коло RLC за допомогою математичних рівнянь помітно, як його поведінка сильно залежить як від моменту комутації, так і від параметрів навантаження. Тут ми можемо побачити, що струм або напруга існують у двох формах: вимушеному та вільному режимах. Вимушений режим включає систему в стані стабільного режиму, тоді як вільний режим є перехідним станом. Загальний струм/напруга є сумою обох режимів.

3.2 Техніки зменшення перехідних комутаційних процесів

Для зниження перенапруги та частоти перехідних відновлюваних напруг можна застосувати резистори перед включенням. У цій техніці два автоматичних вимикача з'єднані паралельно. Один послідовно з резистором. Резистор використовується для обмеження пускового струму в автоматичному вимикачі. Першим замикається автоматичний вимикач із резистором, а потім другий автоматичний вимикач після кількох циклів частоти живлення. Перше спрацювання резистивного вимикача обмежить пусковий струм, що також зменшить перехідний процес.

Комутаційні перехідні процеси значною мірою залежать від інтервалу замикання полюсів вимикача та кута замикання напруги. Використовуючи певну затримку часу для кожного полюса трьох фаз в автоматичному вимикачі, ми можемо мінімізувати перехідні процеси. Ця затримка залежить від типу індуктивного або ємнісного навантаження [22-24].

Для пом'якшення комутаційних ПП можна використовувати метод керованого перемикачання(КП), який є більш ефективним, ніж застосування резисторів перед підключенням. У випадку батареї конденсаторів, використання КП дозволяє уникнути пошкодження обладнання, коливань напруги та чутливих

збурень навантаження. Комбінація захисту конденсаторних установок за допомогою розрядників перенапруги також може знизити рівень комутаційних ПП. Крім того, комутаційні ПП також пов'язані з типом джерела. Також якщо розглядати джерело розподілених параметрів замість джерела зосереджених параметрів, рівень перенапруги буде нижчим [11].

Перенапруги, що виникають при комутаційних діях, можуть бути обмежені до певної міри. Розгляд та аналіз комутаційних перехідних процесів для визначення статистичних збитків, спричинених їхнім негативним впливом на роботу КЛ, є частиною техніко-економічного обґрунтування заходів захисту від аварійних перенапруг. Коли КЛ підключається до шин підстанції, відбувається перехідний процес, який можна розглядати як підключення розімкненої лінії завдовжки l до джерела змінної напруги з внутрішньою індуктивністю $L_{\text{дж}}$. З огляду на криву перехідної напруги $u(l, t)$ і застосовуючи операторний підхід для вираження перехідного процесу, можна сформулювати наступне:

$$u(l, p) = \frac{E(p)}{\text{ch } p\tau + pT \text{ sh } p\tau} \quad (3.11)$$

де $\tau = l/c = \sqrt{L'C'}l$, $T = L_{\text{дж}}/Z_C$, $Z_C = \sqrt{L'/C'}$ – хвильові опори лінії; $E(p)$ – обрана ЕРС джерела;

$$e = E_m \sin(\omega t + \varphi) = E_m (\cos \varphi \sin \omega t + \sin \varphi \cos \omega t) \quad \bullet \bullet \bullet \quad (3.12)$$

$$\bullet \bullet \bullet E_m \left(\cos \varphi \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} + \sin \varphi \frac{p}{p^2 + \omega^2} \right)$$

Під час включення у максимум ЕРС ($\varphi = 90^\circ$) [21]

$$u(l, t) = \frac{E_m}{p} \frac{p^2}{p^2 + \omega^2} \frac{1}{\text{ch } p\tau + pT \text{ sh } p\tau} = \frac{E_m}{p} \frac{H(p)}{F(p)} \quad (3.13)$$

Застосовуючи теорему про розкладання, визначаємо первісну функцію:

$$u(l, t) = A_{\text{сум}} \cos \omega t - \sum_{k=1}^{\infty} A_k e^{-\delta_k t} \cos \omega_k t \quad (3.14)$$

де δ_k – коефіцієнт згасання k -ої гармоніки., ω_k – кутова частота власних коливань; A_k і $A_{вум}$ – амплітуди вільної та вимушеної складових що визначаємо використовуючи наступні формули

$$A_k = E_m \frac{\omega_k^2}{\omega_k^2 - \omega^2} \frac{2}{\cos \omega_k \tau + \frac{\omega_k \tau}{\sin \omega_k \tau}}, \quad A_{вум} = \frac{E_m}{\cos \omega \tau - \omega T \sin \omega \tau} \quad (3.15)$$

Амплітуди вільних коливань формують змінюваний за знаком ряд, де значення кожного наступного члена з порядковим номером k зменшуються по мірі зростання k [23]. При $t = 0$:

$$A_{вум} - A_1 + A_2 - A_3 + \dots = 0 \quad (3.16)$$

З цього слідує, що амплітуда першої вільної складової перевищує амплітуду вимушеної складової, тобто $A_1 > A_{вум}$. Однак, у ситуації з одночастотним коливальним контуром, амплітуда першої вільної складової дорівнює амплітуді вимушеної складової, тобто $A_1 = A_{вум}$ [24]. На рисунку 12 представлений графік напруги перехідного процесу на кінці лінії та його складові.

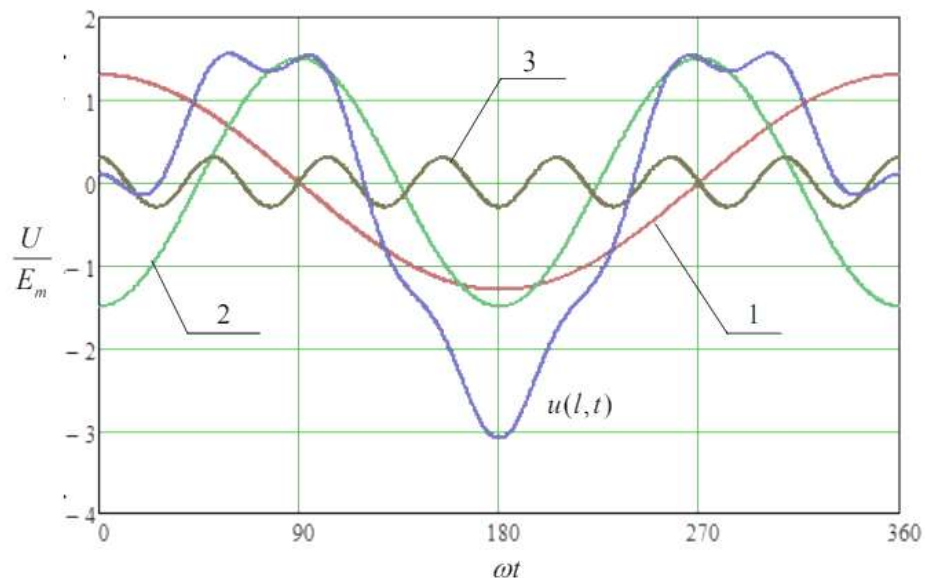


Рисунок 12 – На графіку перехідного процесу напруги на кінці лінії та в його складових представлені: 1 – вимушена складова; 2 – першу гармоніка; 3 – другу гармоніка

В нашому випадку спостерігається, що максимальні значення вимушеної та перших двох вільних складових збігаються в певний момент часу $t = \pi/\omega$:

$$U_{\max} \approx A_{\text{вим}} + A_1 + A_2, \quad (3.17)$$

за умови, що

$$\frac{U_{\max}}{A_{\text{вим}}} \approx \frac{A_{\text{вим}} + A_1 + A_2}{A_{\text{вим}}} = 1 + \frac{A_1 + A_2}{A_{\text{вим}}} > 2. \quad (3.18)$$

Щоб зобразити характер перехідного процесу, можна використати Т-подібну схему заміщення лінії електропередачі (КЛ), із внутрішніми параметрами ємності $C'l$ та індуктивності $L'l$ на одиницю довжини лінії. Цю схему під'єднано до джерела синусоїдальної напруги, яке має внутрішню індуктивність $L_{\text{дж}}$, як показано на рисунку 13 [25].

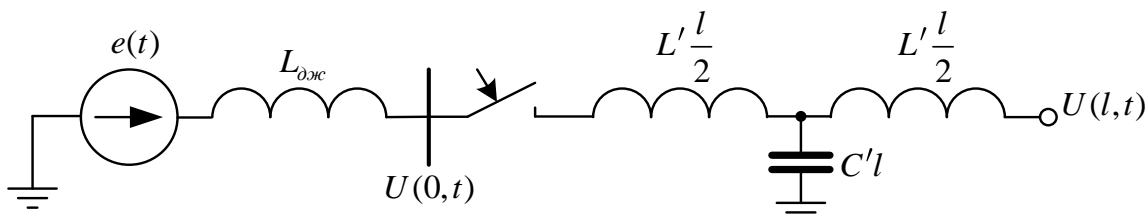


Рисунок 13 – Представлення лінії електропередачі за допомогою Т-подібної схеми заміщення.

Схему заміщення (рис. 13) яка враховує еквівалентні перетворення послідовного підключення ємності $C_e = C'l$ та є індуктивностей $L_e = L_{\text{дж}} + L'l/2$, можна відобразити у вигляді простого коливального контура, як на рисунку 14.

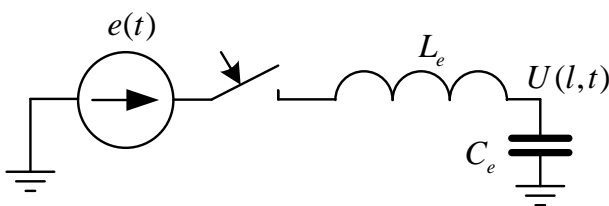


Рисунок 14– Спрощена схема заміщення КЛ

Напруга на кінці лінії відповідає напрузі на ємнісному елементі та включає як вимушену складову, так і першу вільну складову:

$$u(l,t) = u_{\text{вим}} + u_{\text{віль}} = E_m \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 - \omega^2} \times \left[\sin(\omega t + \varphi) - \sqrt{\sin^2 \varphi + \left(\frac{\omega}{\omega_1} \cos \varphi \right)^2} e^{-\delta t} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \right] \quad (3.19)$$

де $\delta = R/2L_e$ – коефіцієнт згасання. ω – частота джерела; $\omega_1 = 1/\sqrt{L_e C_e}$ – частота вільних коливань; $\varphi_1 = \text{arctg}\left(\frac{\omega_1}{\omega} \text{tg}\varphi\right)$.

З рівняння (3.19) випливає, що максимальна напруга на кінці лінії U_{\max} залежить головним чином від кута включення φ та частоти власних коливань лінії ω_1 . Ці два параметри впливають на амплітуду вільних коливань.

$$A = E_m \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 - \omega^2} \sqrt{\sin^2 \varphi + \left(\frac{\omega}{\omega_1} \cos \varphi\right)^2}. \quad (3.20)$$

У реальних КЛ співвідношення між першою власною частотою та промисловою частотою є більшим за одиницю $\omega_1 / \omega > 1$, як зазначено в джерелах [26].

Аналізуючи рівняння (3.20), можна визначити, що коли $\omega_1 / \omega > 1$ амплітуда вільної складової досягає максимуму при кутах включення, близьких до 90° або 270° [24]. В ситуації $\omega_1 / \omega < 1$, коли кут включення наближається до 0° або 180° , амплітуда вільної складової є найбільшою, що зазвичай відбувається у лініях з високою напругою, де послідовне підключення ємностей використовується для компенсації індуктивного опору.

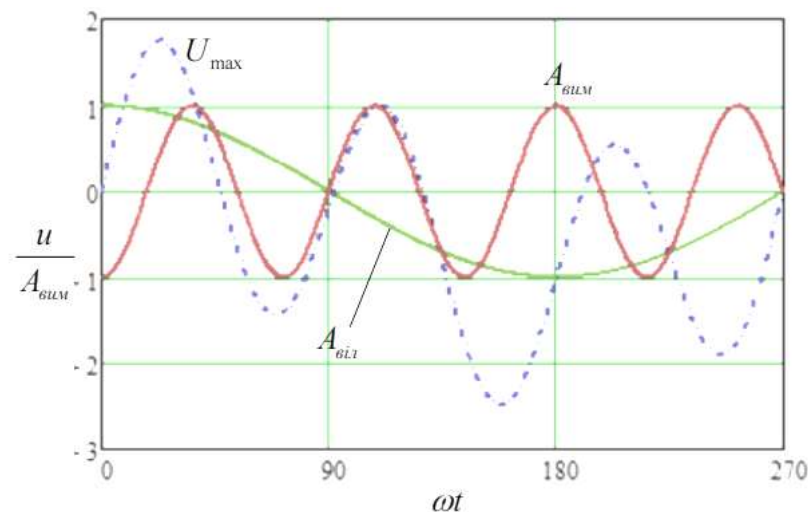


Рисунок 15 – Перехідний процес при з'єднанні КЛ з джерелом ($\omega_1 / \omega = 5$): 1 – вимушена складова; 2 – вільна складова.

В окремих випадках, наприклад для підключення КЛ до джерела за заданих умов $\omega_1 / \omega = 5$ (рис.15) та при певному куті включення, $\varphi = 90^\circ$, розрахувавши амплітуди як вимушеної, так і вільної складової, напруги, видно що у першій половині періоду вільних коливань досягається максимальне значення перехідного процесу, у той час як напруга в режимі вимушених коливань ще не зазнала значних змін у лінії [22, 26].

Коли $\omega_1 / \omega = 2$ найвище значення напруги спостерігається на другому максимумі. Це відбувається через те, що при такому відношенні частот, амплітуди вимушеного режиму та вільної складової складаються разом через півперіоду промислової частоти (рис. 16) [24].

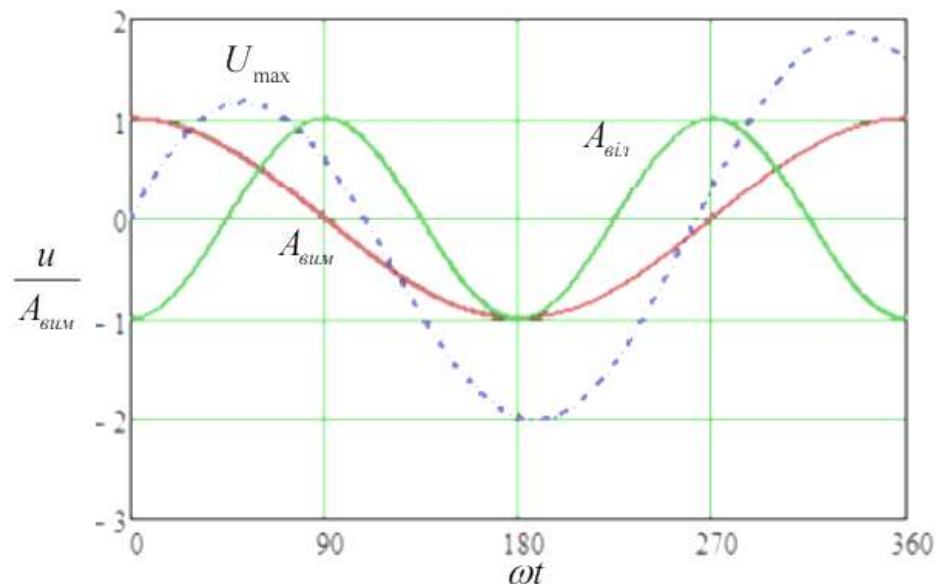


Рисунок 16 – Перехідний процес при з'єднанні КЛ з джерелом ($\omega_1 / \omega = 2$): 1 – вимушена складова; 2 – вільна складова.

У виняткових ситуаціях на промисловій частоті може відбутися резонанс, згідно умови $\omega_1 = \omega$. Тоді в коливальному контурі напруга визначається за допомогою формули.

$$u(l, t) = E_m \frac{\omega L_e}{R} (1 - e^{-\delta t}) \sin(\omega t + \varphi). \quad (3.21)$$

Із виразу (3.21) випливає, що напруга поступово наростає, досягаючи свого піку у межах вимушеного режим, при цьому її максимальне значення може в

кілька разів перевищити ЕРС джерела, що обумовлено високою добротністю коливального контуру реальної лінії

$$E_m \frac{\omega L_e}{R} = (10 \div 20) E_m. \quad (3.22)$$

У простому коливальному контурі описані особливості перехідного процесу також залишаються для лінії з нескінченною кількістю гармонік вільної складової.

Напруга в кінці лінії при $e(t) = A_{\text{вум}} \sin(\omega t + \varphi)$ буде

$$u(l, t) = A_{\text{вум}} \sin(\omega t + \varphi) - \sum_{k=1}^{\infty} A_k e^{-\delta} \sqrt{\sin^2 \varphi + \left(\frac{\omega}{\omega_k} \cos \varphi \right)^2} \sin(\omega_k t + \varphi_k) \quad (3.23)$$

де δ_k – коефіцієнт згасання, $\varphi_k = \arctg \left[\frac{\omega_k}{\omega} \tg \varphi \right]$.

Обчислення коефіцієнта загасання δ_k представляє собою складне завдання, на основі вимірювань на існуючих КЛ середнє значення може бути приблизно встановлене на рівні $0,1 \text{ рад}^{-1}$ що означає зниження амплітуди вільних коливань на 45% за період T промислової частоти [26].

У реальних КЛ відношення власної частоти до промислової перевищує одиницю ($\omega_1 / \omega > 1$). Аналіз показав, що при $\omega_1 / \omega > 1$ максимальну амплітуду вільної складової спостерігають при кутах включення близько 90° або 270° . Тоді як при $\omega_1 / \omega < 1$ максимальна амплітуда вільної складової досягається при кутах включення приблизно 0° або 180° [24].

3.3 Управління комутацією та її вплив на стабільність електричних мереж

Кероване перемикування (КП) застосовується для попередження шкідливих електричних комутаційних перехідних процесів (ПП), що виникають під час вмикання обладнання, особливо конденсаторних батарей, шунтових реакторів та силових трансформаторів. Ця техніка також стає популярною для запуску ЛЕП та кабелів високої напруги, а також як альтернатива традиційним резисторам [27].

Основна мета, управління комутацією в електроенергетичних системах, полягає в контролі ПП при включенні та відключенні електричних ліній і пристроїв, щоб уникнути або пом'якшити негативні наслідки, такі як комутаційні перенапруги та аперіодичні струми [28]. Контроль параметрів через різноманітні сенсори та моніторингові системи дозволяє визначити оптимальний момент для комутації, забезпечуючи ефективне управління реле та вимикачами.

Запобігання аперіодичним складовим струму через КП усуває різні проблеми, включаючи надмірне нагрівання обладнання та втрати енергії. Обмеження комутаційних перенапруг при включенні трифазних КЛ забезпечує стабільність напруги, що зменшує ризики негативних впливів та запобігає пошкодженню обладнання.

Вибір оптимальних умов КП передбачає комплексний підхід, що базується на детальному розумінні теоретичних та практичних аспектів системи. Початковим кроком є визначення цілей комутації, які можуть включати мінімізацію комутаційних перенапруг, зменшення аперіодичних складових струму, та підтримку стабільного функціонування обладнання. Далі проводиться розробка математичних моделей, що описують електромагнітні процеси в системі, що дозволяють прогнозувати поведінку системи та є основою для синтезу ефективних алгоритмів управління. Такі алгоритми враховують різні стратегії, включаючи мінімізацію часу комутації та комутаційних перенапруг, та регулювання роботи обладнання [29].

Наступним кроком є симуляція алгоритму управління, що дозволяє аналізувати різноманітні параметри, такі як напруги, струми, потужності, та температури, що показує ефективність алгоритму та його здатності досягати поставлених цілей. На основі результатів симуляції проводиться оптимізація алгоритму управління.

Експериментальне підтвердження на реальному обладнанні або пілотних установках є останнім етапом перед впровадженням алгоритму в практику. Це дозволяє переконатися практичній придатності обраної стратегії.

У спрощенні та аналізі складних електричних мереж використовують багатополюсні еквівалентні схеми що дозволяє легше розуміти їх поведінку та властивості під різними умовами. Основною ідеєю є заміна складних мереж на спрощені моделі з використанням полюсів, що відображають окремі елементи мережі та їх взаємодію. Ці багатополюсні схеми можуть бути використані як для математичного моделювання, так і для графічного представлення електричних мереж. Основна перевага багатополюсних еквівалентних схем є їх універсальність. Ці схеми можуть бути використані для моделювання різних типів КЛ у різноманітних умовах експлуатації. Застосування каскадного з'єднання багатополюсних схем дозволяє розглядати електричні мережі як послідовність взаємопов'язаних блоків, що полегшує аналіз.

Синхронізація процесів комутації вимагає точної координації моментів включення кожної фази лінії з дотриманням послідовності $A \rightarrow B \rightarrow C$. Цей процес сприяє забезпеченню стабільності системи та мінімізації впливу ПП. Спрямованість фаз $A \rightarrow B \rightarrow C$ використовується стандартно в багатьох системах, допомагаючи уникнути аварійних ситуацій і забезпечуючи надійність електромережі. Синхронізація застосовується для мінімізації часу комутації, що допомагає уникнути пошкодження обладнання та зносу комутаційних пристроїв, зокрема вимикачів та контакторів. Технічно, синхронізація досягається за допомогою спеціалізованих комутаційних пристроїв із електронним керуванням.

Синхронізація фаз забезпечується шляхом точного розрахунку кута для кожної фази, враховуючи встановлену послідовність $A \rightarrow B \rightarrow C$. Це дозволяє кожну фазу включати в ідеальний момент, коли відповідна фаза вхідної напруги перетинає нульовий рівень. Таким чином, включення фази А відбувається на нульовому рівні, за ним слідує фаза В на 120 градусів коливання, а потім фаза С на 240 градусів.

Аналіз індукованих струмів у екранах кабеля, особливо при зміні початкового кута фази під час комутації, дає змогу глибше зрозуміти процеси, які відбуваються всередині самого кабеля, і впливають на його ефективність та надійність. Спочатку проводять збір даних, вимірюючи струми в екранах кабеля

під час різних комутаційних подій і фіксуючи осцилограми цих струмів. Далі використовуються математичні моделі індукції, засновані на законі Фарадея та законі взаємної індукції, для обчислення індуктованих струмів на основі зміни магнітного потоку в екрані кабеля.

Після обчислень, наступним етапом є аналіз форми струмів, з увагою на амплітуди, фазові зміщення та частотні характеристики. Цей аналіз допомагає зрозуміти, як індуктовані струми впливають на роботу кабельної системи та сусідні компоненти електричних мереж. Результати аналізу використовуються для розробки стратегій управління комутацією та заходів з мінімізації впливу індуктованих струмів. Наприклад, розглядають використання додаткових реактивних компонентів або оптимізацію часу комутації. Ще одним етапом є також експериментальна перевірка запропонованих стратегій і заходів через спеціальні випробування та спостереження за роботою кабельної системи.

Розвиток технології КП сприяв накопиченню знань у сфері управління ПП, що дозволяє зменшувати їх негативний вплив у первинних та вторинних колах. Ця техніка дозволяє точно контролювати час відкриття та закриття комутацій, адаптуючи його до типу навантаження. Команди на комутацію відсилаються з належною затримкою та корекцією, аби забезпечити оптимальний момент комутації, (наприклад, при перетині нуля струму або напруги) мінімізуючи тим самим негативний вплив на електричну систему.

Головні переваги використання КП включають:

- підвищення надійності системи через зниження коливань напруги та гармонічного навантаження;
- продовження терміну служби ключового обладнання, такого як вимикачі та ізолятори;
- зменшення перенапруг і пускових струмів;
- можливість замінити складне механічне додаткове обладнання, таке як резистори замикання.

Коли високовольтну КЛ підключають, замиканням вимикача лінії, комутаційні ПП будуть генеруватися як на самій лінії, так і в системі живлення.

Ці ПП залежать від різниці між напругою живлення та напругою на лінії у момент її підключення і є пов'язаними з явищем біжучих хвиль у лінії. Однак, в КЛ, через високу ємність та діелектричні втрати кабелів, біжучі хвилі поширюються з меншою швидкістю та мають більше демпфування, що змінює їх амплітуду та тривалість порівняно з ПЛ. У системах з номінальними напругами 420 кВ і вище, особливо для довгих КЛ, комутаційні ПП є значним чинником, який потребує уваги. Напруга стійкості до комутаційних імпульсів в таких системах становить близько 2–3 р.н., і тому необхідно контролювати комутаційні перенапруги.

Фізичні явища, які керують комутаційною перенапругою лінії, це розповсюдження електромагнітних хвиль уздовж лінії, які зазвичай називаються явищем біжучих хвиль. Розповсюдження хвиль ініціюється дією замикання вимикача, і початкова амплітуда напруги – це напруга перед дугоутворенням вимикача, тобто миттєве значення напруги між контактами вимикача у момент початку заряджання лінії. Як показано на схемі(рис. 17), підключення відбувається у момент з великою різницею між миттєвою напругою живлення та напругою лінії, що спричиняє ін'єкцію великої біжучої хвилі в лінію. Коли ця хвиля досягає відкритого дальнього кінця лінії, вона відбивається, і це ініціює високу перенапругу. Контрольоване перемикачання вимикача має на меті зменшити початкову різницю напруг між джерелом живлення та лінією, і таким чином знизити комутаційний ПП [27].

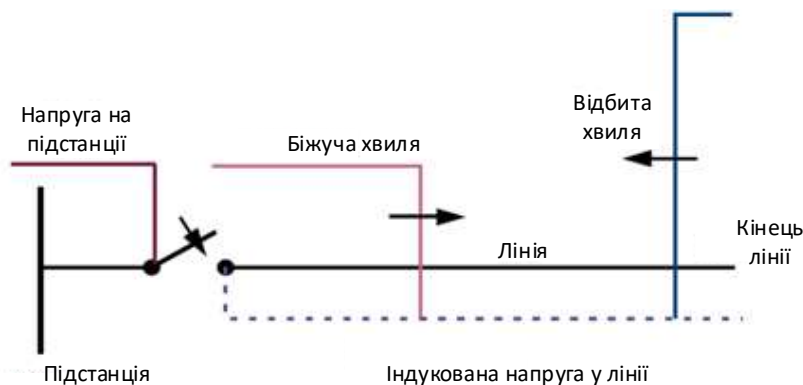


Рисунок 17 – Принцип біжучих хвиль при включенні некомпенсованої лінії в несприятливий момент

У контексті планових операцій замикання високовольтних КЛ, наявність залишкового напруги на лінії зазвичай не є проблемою, оскільки від моменту останнього включення лінії зазвичай пройшло достатньо часу для розсіювання будь-якого заряду. При трифазних операціях повторного замикання, особливо після усунення несправностей, можлива наявність залишкового напруги на справних фазах. Однак, у КЛ, особливо з використанням ємнісних трансформаторів напруги, які мають високий опір до землі, залишковий заряд може зберігатися на лінії значно довше, до кількох секунд. Це вимагає особливої уваги при виконанні операцій замикання або повторного замикання, оскільки наявність залишкового напруги може впливати на умови комутації.

При операціях повторного замикання високовольтних КЛ із паралельною компенсацією (шунтовий реактор підключений до сторони лінії вимикача), напруга на лінії представлятиме собою поступово затухаючі синусоїдальні коливання, частота яких визначається ємністю КЛ та індуктивністю шунтового реактора. Ця частота, як правило, буде нижчою, ніж частота напруги живлення. Внаслідок цього, через відкритий вимикач протікатиме напруга із амплітудно-модульованими коливаннями, конкретна форма яких визначатиметься ступенем компенсації КЛ (рис. 18).

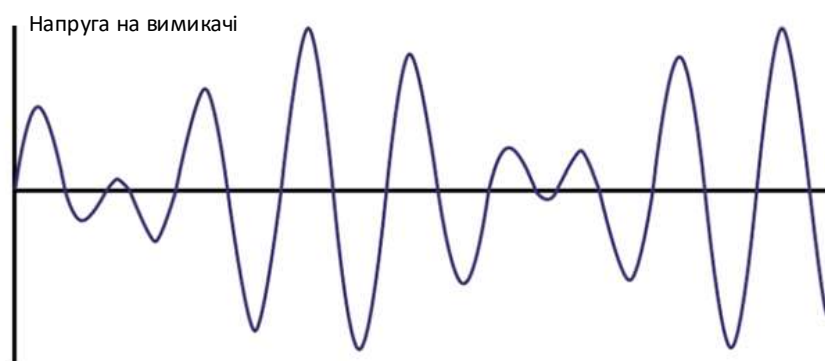


Рисунок 18 – Приклад форми напруги на відкритому вимикачі перед повторним замиканням шунтованої компенсації лінії [27]

Отже, систему керованого перемикачів розробляють, враховуючи наявність компенсаційних реакторів, розташування проводів і фізичні властивості кабелю. Іншим явищем, яке виникає при підключенні КЛ з шунтовою компенсацією, є ефект "непрохідності нульового струму".

Через значну ємнісну реактивну потужність кабелів високовольтних систем змінного струму, необхідне використання шунтових реакторів для компенсації потужності. У випадку ненавантажених кабельних систем струм шунтового реактора майже в протифазі до струму в кабелі, що знижує амплітуду результуючої змінної компоненти, що проходить через вимикач. Через наявність транзитної постійної складової в струмі шунтового реактора, сумарний струм у вимикачі може мати постійну складову, яка перевищує змінну. У такому випадку струм, що протікає через вимикач, не перетне нуль, поки постійна складова не зменшиться порівняно із змінною. Під час підключення навантаження на кабелі немає, а опір системи (кабель плюс шунтові реактори) є дуже малим. Таким чином, постійна складова може затухати протягом декількох секунд, протягом яких відкриття вимикача неможливе.

Що стосується явища "відсутності нульового струму" (рис. 19), величина комутаційної перенапруги залежить від величини напруги під час підключення системи кабель/реактор [27]. Проте, щоб уникнути явища "відсутності нульового струму", підключення слід здійснювати, коли напруга досягає свого піку, в той час як для уникнення комутаційної перенапруги необхідно діяти навпаки. Як було пояснено раніше, постійна складова дорівнює нулю для шунтового реактора, збудженого на піку напруги.

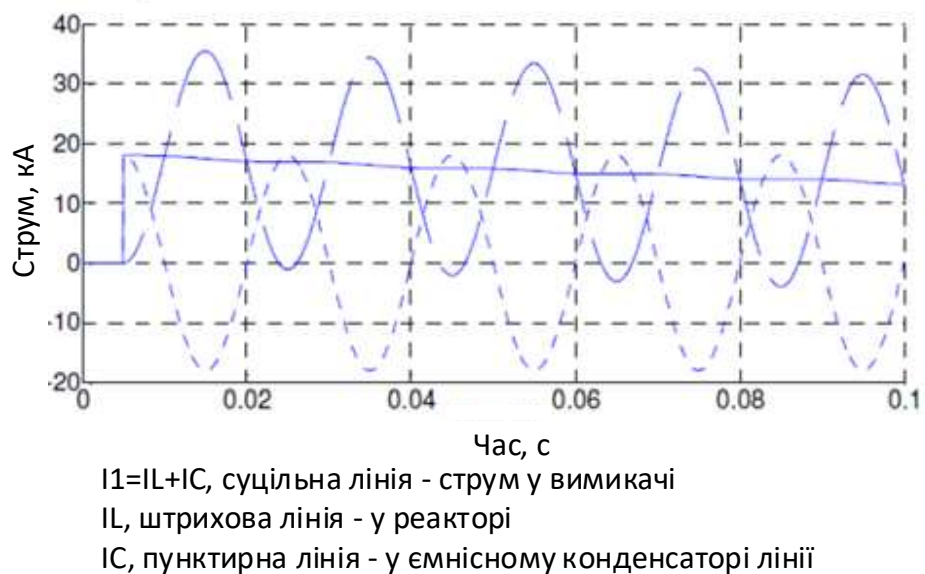


Рисунок 19 – Струм вимикача при явищі "відсутності нульового струму" [27]

Для прямо підключених шунтових реакторів, кабель та шунтові реактори збуджуються одночасно, і цей метод неможливо використати через комутаційну перенапругу. Однак, якщо шунтові реактори підключені через вимикачі, можна підключити кабель, коли напруга дорівнює нулю, а через короткий період підключити шунтові реактори, коли напруга досягає пікового значення.

Для повної ефективності цієї протидії, вимикач, асоційований із шунтовим реактором, повинен працювати в однополюсному режимі та керуватися своєю власною системою керованого замикання.

3.4 Пристрої керованої комутації: принцип дії та основні технічні характеристики.

Контрольована система перемикачів (КСП) стали економічним рішенням і зараз широко використовуються для зниження комутаційних перенапруг у різноманітних комутаційних застосуваннях.

Керовані комутаційні пристрої (ККП) – є інтелектуальним контролером, призначеним для надсилання команд відкриття або закриття вимикача для синхронізації механічних операцій вимикача з електричною цільовою точкою. Рисунок 20 показує схему типової установки ККП з відповідними входами/виходами.

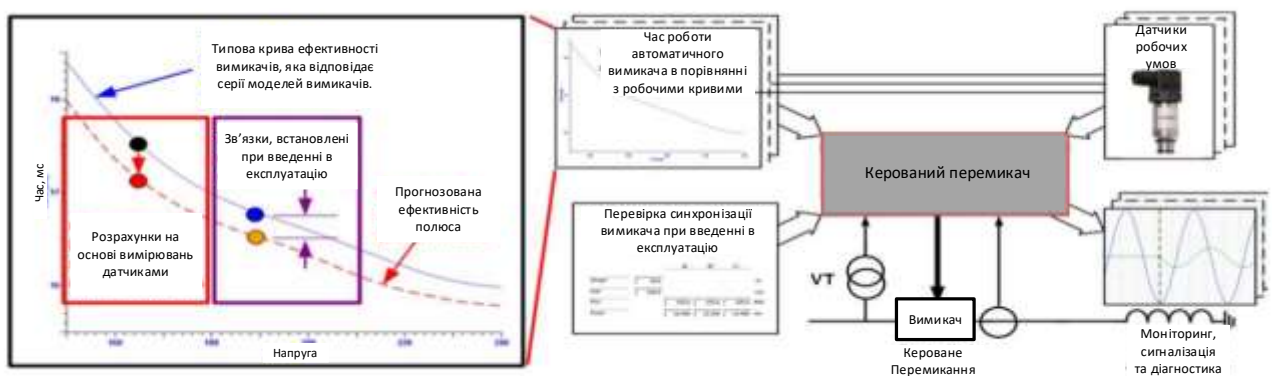


Рисунок 20 – Приклад типової установки ККП

Одним з найбільших викликів системи ККП є надсилання керуючих команд таким чином, щоб контакти вимикача почали рухатися та досягали бажаних електричних та механічних цілей у певний момент. Для цього ККП повинен передбачити необхідний час роботи вимикача за всіх можливих

обставин. Для цього ККП спочатку потрібно налаштувати з впровадженою оптимальною стратегією, належним калібруванням та базовою інформацією, наданою виробником (такою як криві характеристик часу вимикача, характеристики обладнання, RDDS тощо). По-друге, має бути здійснено введення в експлуатацію КСП для перевірки поведінки вимикача і, за необхідності, витягти відсутню інформацію, таку як середній час роботи кожного полюса.

У сучасному ККП зазвичай доступні наступні функції для найширшого спектру використання [27]:

1. Адаптація частоти: Контролери ККП повністю адаптуються до частоти, призначені для роботи при системних частотах від 16 до 66 Гц.

2. Перевірка входу: Контролери зазвичай виконують перевірку вхідної команди перед її обробкою, що триває близько 40 мс.

3. Режими роботи: Багато типів контролерів ККП мають опцію роботи в швидкому або безпечному режимі. У швидкому режимі, після перевірки вхідних даних, контролер приймає перше виявлене нульове перетинання напруги. У безпечному режимі контролер прийме четверте нульове перетинання напруги після завершення перевірки вхідних даних. Час кожного з останніх трьох циклів, перед активацією виходу, має відповідати неперервно вимірюваному часу циклу. Якщо цього не відбувається, розпочинається новий відлік часу для виявлення прийнятної референсної точки. Це забезпечує більш точне визначення остаточної референсної точки перед активацією котушки вимикача.

4. Референція: Зазвичай контролери ККП використовують для референсу сигнал трансформатора напруги шини. Можна використовувати будь-яку фазу-до-землі або фазу-до-фазу напругу. Референсна точка - це нуль референсної напруги з позитивною похідною. Частота референсної напруги постійно контролюється, і автоматично відбувається адаптація до змін частоти. Для спеціальних застосувань, де фазовий зсув між напругою та струмом може не бути постійним, наприклад, при перериванні навантаженого трансформатора

дугової печі, можливо використовувати конвертер струму/напруги та комутувати з референсом на нуль струму, а не на нуль напруги. Це забезпечить фіксовану ціль розмикання контактів щодо форми хвилі струму.

5. Цілі контрольованого перемикачання: Цілі керованого комутування можуть бути як фіксованими, так і визначатися умовами переривання. Деякі ККП використовуються для комутації керованого вимикача у визначені моменти комутації (фіксовані моменти замкнення або контактування та/або фіксовані часи дуги при перериванні). Інші контролери працюють так, що моменти комутації можуть змінюватися. Ці цілі будуть залежати від попередніх умов переривання, а ціль для наступної операції замкнення визначатиметься за допомогою вимірювань напруги на стороні навантаження.

6. Фазові зсуви: Цілі виражаються з урахуванням референсного моменту часу, для контролерів це нуль напруги шини або, у спеціальних випадках, нуль струму.

Для керованого замикання цілі визначаються як певний фазовий зсув щодо референсу.

7. Керування командами: Для керованого розмикання остаточні цілі визначаються як конкретні моменти роз'єднання контактів, що відповідають фазовому зсуву навантажувальних струмів. Оскільки в якості референсу використовується напруга шини, і цілі повинні визначатися з урахуванням цього, передбачається, що існує дійсний фазовий зсув у 90 електричних градусів (з відставанням або випередженням, залежно від індуктивного або ємнісного навантаження) між струмами та фазними напругами відносно землі.

8. Трансформатори напруги та струму (ТН та ТС), які використовуються в ККП: Референсним сигналом має бути постійна напруга з боку подачі (напруга шин). Референсну напругу слід подати не пізніше ніж за 300 мс до команди комутації. Для роботи ККП підійде будь-який існуючий у системі тип ТН. Зазвичай він споживає менше 0.1 ВА потужності. При моніторингу моментів замикання та/або переривання потрібен вторинний сигнал від ТС. Для цього підходить будь-який існуючий у системі ТС, і додатковий

магнітопровід не потрібен. Для визначення залишкового магнітного потоку під час переривання необхідні вимірювання (розрахунки) напруги на боці навантаження (рис. 21).



Рисунок 21 – Спрощена схема керованого перемикачання

Зазвичай ККП налаштовані працювати в наступних режимах:

- одиничний режим: Робота ККП за заздалегідь встановленою програмою;
- комутація декількох навантажень: Робота з декількома навантаженнями у складних розкладках підстанцій із вимикачем-з'єднувачем.
- двостороннє комутування (з боку джерела / з боку навантаження): Керування переключенням джерела і навантаження для синхронізації в розкладці підстанції з вимикачем-з'єднувачем.
- тестовий режим: Дозволяє окремо керувати кожним полюсом вимикача для перевірки проводки та вимірювання часу дії.
- обхід: Операції вимикача виконуються випадково та одночасно через зовнішню обхідну лінію, керовану обхідним реле.

Висновок до розділу 3

У розділі було розглянуто засоби обмеження комутаційних перенапруг у високовольтних КЛ, з акцентом на важливість КП та використання шунтових реакторів як ключових елементів управління цими процесами. Дослідження охопило також інші аспекти, як-от аналіз індукованих струмів у кабельних та стратегії повторного замикання КЛ, особливо з урахуванням унікальних властивостей високовольтних КЛ. Необхідно ретельно планувати та

впроваджувати відповідні технічні рішення для забезпечення ефективного управління в електричних мережах, з метою підвищення їх надійності та стабільності.

4 ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЛ 110 ПС «ФУРСИ» - ПС «РОСЬ»

4.1 Опис проекту та реалізації КЛ 110 кВ

Об'єкт дослідження представляє собою кабельна лінії 110 кВ, яка з'єднує підстанцію ПС 110 кВ «Рось» у зв'язку з будівництвом СЕС підстанцією ПС «Фурси» з сумарною потужністю 54 МВт. Реалізація проекту передбачає виконання дволанцюгової лінії з використанням трьох одножильних кабелів на кожен ланцюг. Кабелі обрані з високоякісної ізоляції зі ЗПЕ марки АПвЭгаПу-110 з перерізом 240 мм² і мідним екраном перерізом 95 мм² [30].

Загальна довжина кабельної траси становить 6580 метрів, з яких значна частина – 2400 метрів – прокладена за допомогою технології горизонтально-направленого буріння, що демонструє використання передових методів будівництва з мінімізацією втручання в природне середовище [31]. Вибір цих рішень є виправданим через ряд таких переваг: немає потреби в постійному обслуговуючому персоналі, завдяки надійності комутаційного обладнання, котре забезпечено повною ізоляцією від зовнішніх чинників, включаючи забруднення, вологість та пил; збільшений період служби обладнання; покращена надійність системи; знижений негативний вплив на довкілля; висока надійність у експлуатації, із можливістю першого капітального ремонту не раніше ніж через 25-30 років за умови нормального використання. Реалізація цього проекту проводилась із дотриманням екологічних стандартів та законодавчих норм України, включаючи охоронні зони (шириною 1 метр з обох сторін кабелів) і вимоги до прокладання інженерних мереж.

Під час спорудження ЛЕП варіант реалізації у вигляді однієї ПЛ напругою 110 кВ від СЕС, яка пролягатиме одним шляхом, не є оптимальною через обмежені можливості підключення до ПС та необхідність відведення земельних ділянок під опори, тому такий підхід було відкинуто.

Прокладається КЛ в землі та залізобетонних лотках у «трикутник» із застосуванням кабельних триймачів. У місцях перехрещення з іншими

інженерними мережами кабелі розташовують «у площину». Глибина укладання кабелів складає 1,5 метра, а на дні траншеї застосовують піщану підкладку товщиною 100 мм. Верхній шар траншеї заповнюють піщано-гравійною сумішшю. В областях, що проходять через населені пункти та поруч із шляхами неелектрифікованих залізниць, КЛ прокладено у залізобетонних лотках.

У процесі облаштування КЛ необхідність встановлення кабельних колодязів виникає в пунктах зміни напрямку траси або через кожні 100 метрів прямої ділянки, що відповідає вимогам технології будівельних та монтажних робіт. Захист КЛ 110 кВ від механічних пошкоджень по всій довжині забезпечується за допомогою залізобетонних плит, крім ділянок, де кабелі розміщені у надземних лотках із кришкою. Де КЛ переходять з залізобетонних лотків в ПЕ-труби, виконано горизонтальне рознесення кабелів із дотриманням необхідних міжкабельних відстаней. В місцях перетину з окремими інженерними мережами кабелі укладаються у двостінні гофровані труби.

Для з'єднань кабелів 110 кВ прокопано котловани розмірами 2x7x1.5 м (рис. 22) [30].



Рисунок 22 – Особливості прокладання кабельної лінії 110 кВ ПС «Фурси» - ПС «Рось» [31]

З'єднання кабелів виконуються в залізобетонних лотках шириною 0,9 м, муфти однієї лінії розміщені на відстані 2 м одна від одної вздовж траси. Другий котлован для з'єднання іншої КЛ розташований на відстані 5 метрів від першого. Застосовано транспозицію екранів кабелів для зниження наведеної напруги. Згідно із нормами, для КЛ загальною довжиною від 5 до 10 кілометрів виконано два цикли транспозиції. Кінці екранів виведені до кабельного колодязя, де

облаштована заземлена шафа транспозиції. Екрани кабелів з обох кінців з'єднані з заземлюючим контуром підстанції.

4.2 Розрахунок параметрів КЛ 110 кВ ПС «Фурси»- ПС «Рось»

Розрахуємо параметри в трифазній групі однофазних кабелів АПвЭгаПу перерізом 240 мм² з мідним екраном перерізом 95 мм²; в ізоляції з ЗПЕ напругою 110кВ з алюмінієвою жилою.

Значення радіусів екрана та жили, можливо отримати у виробника певної марки кабеля, проте в цьому випадку для дослідження геометричних розмірів однофазного кабеля використано розрахункові вирази.

Зовнішній та внутрішній радіус жили, м:

$$r_1 = \sqrt{\frac{F_{ж} / \psi_{ж}}{\pi}} = 8,74 \cdot 10^{-3}, r_2 = r_1 + \Delta_{ж} = 0,024 \quad (4.1)$$

де $F_{ж} = 240 \text{ мм}^2$ -переріз жили, $\psi_{ж} = 1$ - коефіцієнт заповнення жили, $\Delta_{ж} = 15 \text{ мм}$ - товщина ізоляції жила-екран.

Зовнішній та внутрішній радіус екрана, м:

$$r_3 = \sqrt{r_2^2 + \frac{F_E / \psi_E}{\pi}} = 0,025, r_4 = r_3 + \Delta_{об} = 0,031 \quad (4.2)$$

де $F_{ж} = 95 \text{ мм}^2$ -переріз екрана, $\psi_E = 1$ - коефіцієнт заповнення екрана, $\Delta_{об} = 6 \text{ мм}$ - товщина оболонки.

На основі відомих формул визначимо погонні параметри кабеля, для визначення яких прийнято наступні допущення:

1. Геометрія розташування в просторі трифазної системи однофазних кабелів така що $s \gg r_2$.
2. Фази кабеля розташовані у вершинах рівностороннього трикутника.
3. Екран кабеля спрощено вважаємо таким, що $r_3 \gg (r_3 - r_2)$, це дозволяє знехтувати кінцевою товщиною екрана і в розрахунках використати лише його внутрішній радіус r_2 .
4. Нехтуємо струмами зсуву в землі (тобто ємністю землі)

5. Нехтуємо ефектом близькості для промислової частоти, вважаючи активний опір жил та екранів як на постійному струмі.

Активний опір жили та екрана, Ом/м:

$$R_{Ж} = \rho_{Ж} \frac{1}{F_{Ж}} = 1,333 \cdot 10^{-4}, R_E = \rho_E \frac{1}{F_E} = 2,105 \cdot 10^{-4} \quad (4.3)$$

де $\rho_{Ж} = 3,2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\rho_E = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ - питомий опір матеріалів жили та екрана.

Активний опір землі, Ом/м:

$$R_3 = \frac{\pi}{4} \mu_0 f = 4,935 \cdot 10^{-5} \quad (4.5)$$

де μ_0 - абсолютна магнітна проникність вакууму.

Еквівалентна глибина, м:

$$D_3 = 2,24 \sqrt{\frac{\rho_3}{\omega \cdot \mu_0}} = 1,127 \cdot 10^3 \quad (4.6)$$

де $\rho_3 = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ - питомий опір ґрунту, ω - кругова частота напруг та струмів.

Власна індуктивність жили та екрана, Гн/м:

$$L_{Ж} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_3}{r_1}\right) = 2,353 \cdot 10^{-6}, L_E = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_3}{r_2}\right) = 2,154 \cdot 10^{-6}. \quad (4.7)$$

Взаємна індуктивність між жилою (екраном) і сусіднім кабелем, Гн/м:

$$M_K = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_3}{s}\right) = 1,997 \cdot 10^{-6}, \quad (4.8)$$

де $s = 0,052 \text{ м}$ - еквівалентна відстань між осями сусідніх фаз кабеля.

Взаємна індуктивність між жилою та екраном одного і того ж кабеля, Гн/м:

$$M_{ЖЕ} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_3}{r_2}\right) = 2,154 \cdot 10^{-6}. \quad (4.9)$$

Ємність між екраном та жилою (Ф/м):

$$C_{ЖЕ} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = 1,336 \cdot 10^{-10}, \quad (4.10)$$

де $\varepsilon = 2.4$ -відносна діелектрична проникність ізоляції ЗПЕ (у.о), ε_0 - абсолютна діелектрична проникність вакууму.

Ємність між екраном та землею, для кабеля що знаходиться в землі (Ф/м):

$$C_E = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)} = 6,204 \cdot 10^{-10} \quad (4.11)$$

Визначимо власні та взаємні погонні повздовжні опори кабеля. Власний опір жили та екрана(Ом/м):

$$\begin{aligned} \dot{Z}_Ж &= R_3 + R_Ж + j\omega L_Ж = 1,827 \cdot 10^{-4} + 7,394 j \cdot 10^{-4} \\ \dot{Z}_E &= R_3 + R_E + j\omega L_E = 2,599 \cdot 10^{-4} + 6,766 j \cdot 10^{-4}. \end{aligned} \quad (4.12)$$

Взаємний опір жили(екрана) і з'єднувального кабеля, Ом/м:

$$\dot{Z}_K = R_3 + j\omega M_K = 4,935 \cdot 10^{-5} + 6,273 j \cdot 10^{-4}. \quad (4.13)$$

Взаємний опір жили(екрана) між жилою і екраном одного і того ж кабеля, Ом/м:

$$\dot{Z}_{ЖЕ} = R_3 + j\omega M_{ЖЕ} = 4,935 \cdot 10^{-5} + 6,766 j \cdot 10^{-4}. \quad (4.14)$$

Для кабеля $L_K = 6580$ м отримані опори будуть, Ом:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_Ж &= \dot{Z}_Ж L_K = 1,202 + 4,865 j \\ \dot{Z}_E &= \dot{Z}_E L_K = 1,71 + 4,452 j \\ \dot{Z}_K &= \dot{Z}_K L_K = 0,325 + 4,128 j \\ \dot{Z}_{ЖЕ} &= \dot{Z}_{ЖЕ} L_K = 0,325 + 4,452 j. \end{aligned} \quad (4.15)$$

Врахування ємнісних параметрів кабеля падіння напруги вздовж жил $\Delta U_Ж$ та екранів ΔU_E пов'язані з струмами $I_Ж$ та I_E в них системою рівнянь [21]:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{ЖА} &= \underline{Z}_Ж \dot{I}_{ЖА} + \underline{Z}_{ЖЕ} \dot{I}_{ЕА} + \underline{Z}_{КАВ} (\dot{I}_{ЖВ} + \dot{I}_{ЕВ}) + \underline{Z}_{КАС} (\dot{I}_{ЖС} + \dot{I}_{ЕС}) \\ \Delta \dot{U}_{ЖВ} &= \underline{Z}_Ж \dot{I}_{ЖВ} + \underline{Z}_{ЖЕ} \dot{I}_{ЕВ} + \underline{Z}_{КАВ} (\dot{I}_{ЖА} + \dot{I}_{ЕА}) + \underline{Z}_{КВС} (\dot{I}_{ЖС} + \dot{I}_{ЕС}) \\ \Delta \dot{U}_{ЖС} &= \underline{Z}_Ж \dot{I}_{ЖС} + \underline{Z}_{ЖЕ} \dot{I}_{ЕС} + \underline{Z}_{КАС} (\dot{I}_{ЖА} + \dot{I}_{ЕА}) + \underline{Z}_{КВС} (\dot{I}_{ЖВ} + \dot{I}_{ЕВ}) \\ \Delta \dot{U}_{ЕА} &= \underline{Z}_Е \dot{I}_{ЕА} + \underline{Z}_{ЖЕ} \dot{I}_{ЖА} + \underline{Z}_{КАВ} (\dot{I}_{ЖВ} + \dot{I}_{ЕВ}) + \underline{Z}_{КАС} (\dot{I}_{ЖС} + \dot{I}_{ЕС}) \\ \Delta \dot{U}_{ЕВ} &= \underline{Z}_Е \dot{I}_{ЕВ} + \underline{Z}_{ЖЕ} \dot{I}_{ЖВ} + \underline{Z}_{КАВ} (\dot{I}_{ЖА} + \dot{I}_{ЕА}) + \underline{Z}_{КВС} (\dot{I}_{ЖС} + \dot{I}_{ЕС}) \\ \Delta \dot{U}_{ЕС} &= \underline{Z}_Е \dot{I}_{ЕС} + \underline{Z}_{ЖЕ} \dot{I}_{ЖС} + \underline{Z}_{КАС} (\dot{I}_{ЖА} + \dot{I}_{ЕА}) + \underline{Z}_{КВС} (\dot{I}_{ЖВ} + \dot{I}_{ЕВ}) \end{aligned} \quad (4.16)$$

де $\dot{I}_{eA}, \dot{I}_{eB}, \dot{I}_{eC}$ – струми в екранах кабелю для кожної фази A, B, C ;
 $\dot{I}_{жA}, \dot{I}_{жB}, \dot{I}_{жC}$ – струми в жилах кабелю для кожної фази A, B, C ; $\underline{Z}_{ж}$ – повний опір жили; \underline{Z}_E – повний опір екрану; $\underline{Z}_{жE}$ – повний взаємний опір між жилою і екраном одного кабелю; \underline{Z}_K – взаємний опір жили (екрану) і сусіднього кабелю

Висновок до розділу 4

В рамках даного дослідження було вибрано об'єктом аналізу КЛ 110 кВ ПС «Фурси» - ПС «Рось», яка складається з однофазних кабелів АПвЭгаПу з перерізом 240 мм² та мідним екраном перерізом 95 мм² в ізоляції із ЗПЕ. Було розглянуто аспекти проектування та монтажу КЛ, включаючи вибір конфігурації прокладання кабелів та їх захисту. У ході розрахунків було визначено основні геометричні, електричні та індуктивні параметри цієї системи.

5 РОЗРАХУНОК КАБЕЛЬНОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ 110 КВ ТА ЗАСОБИ ОБМЕЖЕННЯ КОМУТАЦІЙНИХ ПЕРЕНАПРУГ

В останні роки в області теорії лінійних електричних кіл набуло популярності представлення будь-якої електричної схеми як комбінації n -полюсних елементів (де $n \geq 2$). Цей підхід сприяв глибшому розумінню та аналізу електричних кіл. Зі зростанням можливостей програмного забезпечення для виконання обчислень, застосування цих методів у рішенні складних математичних задач стало ширшим. Це відкрило нові перспективи та напрямки в топологічних методах аналізу та розрахунку складних електричних кіл, що дало можливість для більш точних та ефективним результатам аналізу [2,23].

5.1 Комп'ютерна модель кабельної лінії електропередачі

Одним із ефективних підходів для моделювання різних робочих станів та аналізу комутаційних перенапруг у високовольтних кабельних лініях (КЛ) є застосування теорії багатополосників [26].

Методика математичного моделювання для складних систем уже добре описана. Розробка специфічної математичної моделі КЛ, адаптованої до конкретних умов експлуатації, дозволяє ідентифікувати потенційно слабкі місця в системі, передбачати і запобігати небажаним або небезпечним станам у системі електропостачання. Також, аналіз усіх можливих робочих станів сприяє виявленню оптимальних параметрів режимів роботи. Наявність точної та адекватної моделі дозволяє вирішувати практичні проблеми, що включають аналіз та розуміння кількісних параметрів, які були отримані в ході процесу моделювання.

Математична модель КЛ представляє собою узагальнену абстракцію, яка спрощує реальний об'єкт для дослідження з використанням математичних інструментів. У процесі розробки цієї моделі ми відсіюємо менш важливі деталі, зосереджуючись на ключових аспектах, щоб перетворити її на систему, яка легше піддається математичному розгляду та аналізу [32, 33].

Основною перевагою математичних моделей можливість перевірити ефективність прийнятих рішень без необхідності фізичної реалізації, що дозволяє уникнути впровадження невдалих рішень.

Однак, використання математичних моделей також має свої обмеження, оскільки вони не завжди повністю відображають реальність. Складність і різноманіття функціонування електропостачальних систем ускладнюють створення абсолютно адекватної моделі. Математична модель враховує лише ключові закономірності, ігноруючи другорядні фактори. Головна мета моделі - надати прогнозну оцінку, адже забезпечити абсолютно точне прогнозування неможливо. Часто складно навіть точно описати вихідні дані для моделювання.

Під час проектування та експлуатації необхідно контролювати поздовжні струми і напруги у екранах КЛ. Неконтрольовані струми в екранах, особливо при двосторонньому заземленні, можуть призводити до надмірних перенапруг, що загрожує електричній міцності та стійкості ізоляції кабелю. Тому слід вдосконалювати математичні моделі для точного обчислення струмів та напруг, які індукуються в екранах КЛ [25, 33].

Щоб зменшити струм у екранах кабелів під час нормальної та аварійної експлуатації, а також для скорочення електричних втрат у КЛ високої напруги 110 кВ, використовуються техніки транспозиції екранів.

В дослідженні для моделювання та аналізу комутаційних перенапруг у високовольтних КЛ була розроблена імітаційна модель лінії. Ця модель була створена за допомогою ланцюгової схеми заміщення, використовуючи пакет прикладних програм для числового моделювання Matlab [33-34]. Цей підхід дозволяє візуалізувати графічні блок-діаграми, імітувати та аналізувати комутаційні перенапруги, як у нормальних, так і в аварійних режимах роботи КЛ. В залежності від потрібної точності та результатів, можна вибрати необхідний метод розв'язання диференціальних рівнянь та задати зміни часових інтервалів моделювання, будь то з фіксованим чи змінним кроком. Моделювання дозволяє спостерігати за процесами, що відбуваються всередині електричної схеми.

На рисунку 23 представлена принципова схема заміщення для ділянки трифазної КЛ однофазного виконання та розглядається як 12-ти полюсна схема заміщення однорідної ділянки лінії [21].

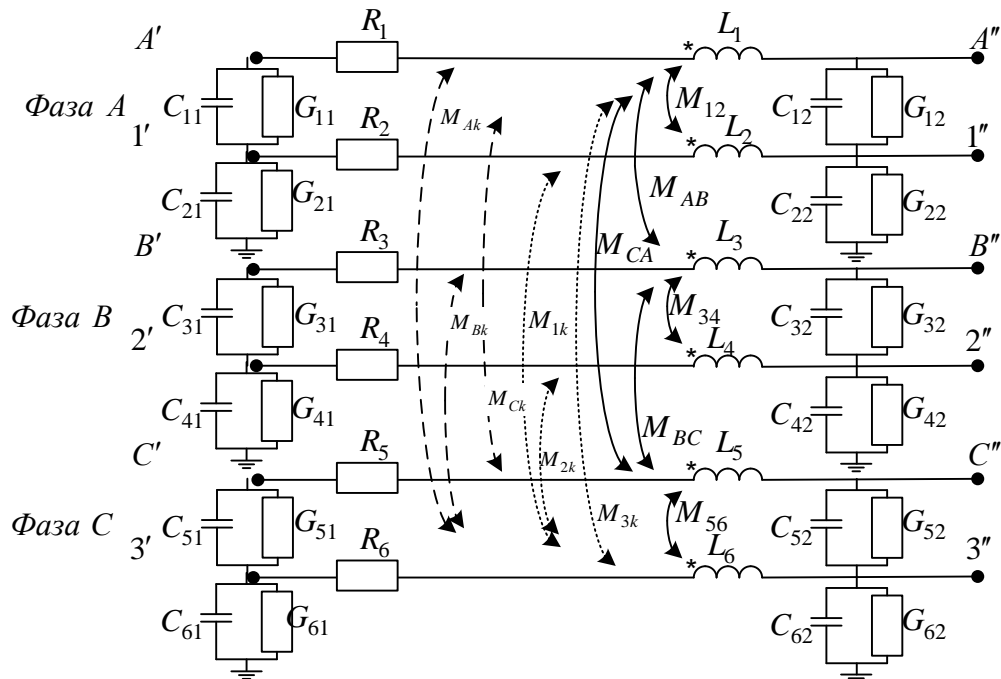


Рисунок 23 – Принципова схема заміщення ділянки трифазної КЛ у вигляді еквівалентного 12-полюсника

На рисунку представлені такі елементи: $C_{11}..C_{62}$ та $G_{11}..G_{62}$ позначають провідності і ємності між фазними проводами, а також між проводами і землею; $R_{1}..R_{6}$ та $L_{1}..L_{6}$ відповідають опорам та індуктивностям ділянок КЛ на одиницю довжини; M_{AB} , M_{AC} , M_{CA} вказують на взаємну індуктивність між жилою (або екраном) одного кабелю та сусіднім кабелем; M_{12} , M_{34} , M_{56} описують взаємну індуктивність між жилою та екраном одного і того ж кабелю; M_{Ak} , M_{Bk} , M_{Ck} , M_{1k} , M_{2k} , M_{3k} представляють взаємні індукції між екранами 1, 2, 3, та фазами А, В, С а також іншими k-ми проводами.

На основі наведених даних у середовищі Matlab з використанням доповнення SimPowerSystems створено детальну модель для дослідження роботи трифазної високовольтної КЛ. Схематично ця модель представлена як шестипровідна система, що складається з трьох фазних жил та трьох екранів, з додаванням сьомого проводу, який є заземленням [33].

У розробленій моделі використовуються принципи чисельного моделювання для лінійних систем, що дозволяє автоматично компонувати та розв'язувати складні алгебраїчні та диференціальні рівняння, типові для теорії електричних кіл. Для чисельного розв'язання цих рівнянь обрано однокроковий метод Рунге-Кутта 4-го та 5-го порядків з адаптивним кроком (ode45, Dormand-Prince), який забезпечує достатню точність і ефективність при модерації швидкості розрахунків [34]. Встановлена відносна точність інтегрування становить 10^{-3} , що забезпечує адекватне відтворення реальних комутаційних процесів в системі.

Електрична схема заміщення, що імітує ділянку лінії довжиною 6580 м, представлена у вигляді еквівалентного 12-полюсника рис. 24. Вона враховує взаємні індуктивні зв'язки між фазними жилами та екранами, що дозволяє більш точно моделювати поведінку КЛ в різних режимах роботи.

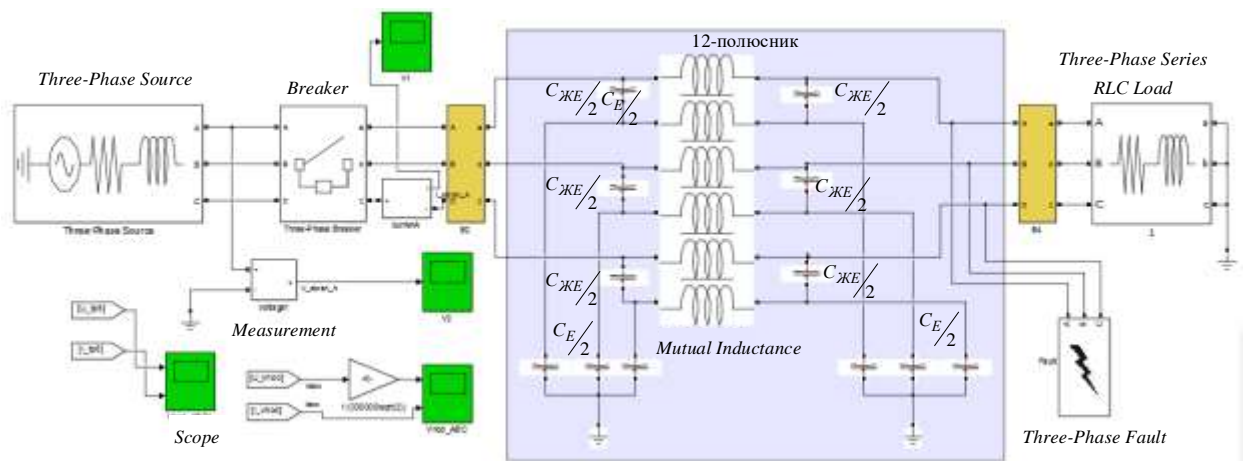


Рисунок 24 – Структурна схема моделі для дослідження комутаційних перенапруг КЛ

На рисунку 24 представлена схема моделі яка має наступні компоненти:

- Трифазне джерело електричного живлення (Three-Phase Source), налаштоване на номінальну лінійну напругу 110 кВ і частоту 50 Гц, імітує як внутрішні параметри самого джерела, так і параметри передачі електроенергії від джерела до КЛ [24].
- 12-полюсник (Mutual Inductance), який відтворює індуктивні взаємозв'язки між елементами лінії. Ці взаємозв'язки представлені у вигляді

матриці, яка визначена за формулою (5.1) і включає як власні, так і взаємні опори на одиницю довжини [21].

$$M_{MI} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{ЖА} & \dot{Z}_{ЖЕ} & \dot{Z}_{13} & \dot{Z}_{14} & \dot{Z}_{15} & \dot{Z}_{16} \\ \dot{Z}_{ЖЕ} & \dot{Z}_{ЕА} & \dot{Z}_{23} & \dot{Z}_{24} & \dot{Z}_{25} & \dot{Z}_{26} \\ \dot{Z}_{31} & \dot{Z}_{32} & \dot{Z}_{ЖВ} & \dot{Z}_{ЖЕ} & \dot{Z}_{35} & \dot{Z}_{36} \\ \dot{Z}_{41} & \dot{Z}_{42} & \dot{Z}_{ЖЕ} & \dot{Z}_{ЕВ} & \dot{Z}_{45} & \dot{Z}_{46} \\ \dot{Z}_{51} & \dot{Z}_{52} & \dot{Z}_{53} & \dot{Z}_{54} & \dot{Z}_{ЖС} & \dot{Z}_{ЖЕ} \\ \dot{Z}_{61} & \dot{Z}_{62} & \dot{Z}_{63} & \dot{Z}_{64} & \dot{Z}_{ЖЕ} & \dot{Z}_{ЕС} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

– Блок активного трифазного навантаження (Three-Phase Series RLC Load), параметри якого налаштовані таким чином, щоб відповідати заданому номінальному струму, що проходить в жилі.

– Компоненти моделі включають конденсатори, розташовані між фазами ($C_{ЖЕ}$) та між фазами і землею (C_E), що інтегровані у послідовне RLC-вантаження (Series RLC Load), з характеристиками визначеними на одиницю довжини.

– В моделі також передбачено можливість дослідження несиметричних та аварійних режимів роботи електричного кола, які можуть виникати внаслідок КЗ, обривів ліній або змін навантаження [32]. Для цього використовуються спеціальні блоки, що імітують роботу комутаційних апаратів (Breaker) та блоки моделювання замикань на землю (Three-Phase Fault).

– Для візуалізації струмів та напруг у моделі використовуються осцилографи (Scope) та трифазні вимірювальні прилади (Three-Phase V-I Measurement), які надають можливість спостерігати за електричними процесами в динаміці та реєструвати осцилограми.

Така модель забезпечує можливість аналізу величин напруги та струму на вході та виході лінії. Для детального вивчення розподілу струму та напруги уздовж лінії, лінію слід представляти як однорідну ланцюгову модель заміщення, яка складається з певної кількості елементарних ділянок. Ці ділянки утворюються шляхом об'єднання еквівалентних багатополюсників, що можуть включати різні типи з'єднань екранів та жил. (рис. 25) [2].

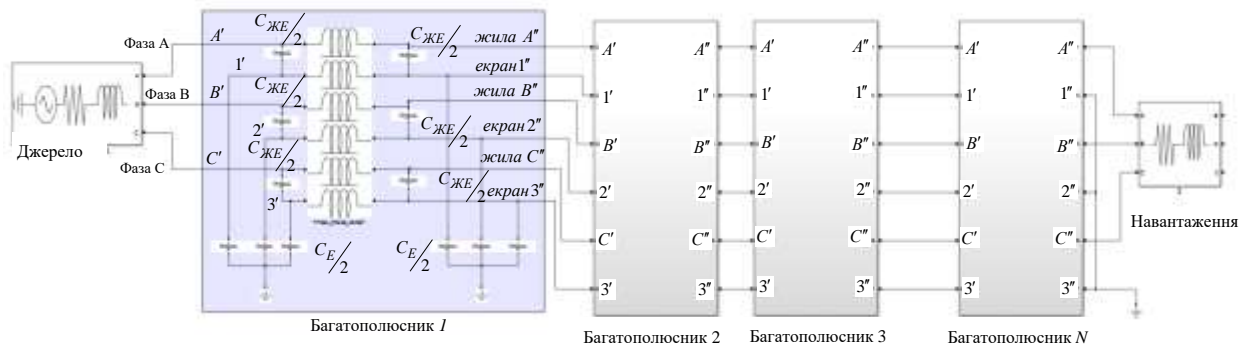


Рисунок 25– Ланцюгова схема заміщення

Запропонована модель є узагальненою, оскільки вона не включає динамічні аспекти поведінки джерел енергії та навантажень. Проте, використання Matlab та адаптивної структури моделі надає можливість швидко адаптувати її топологію та налаштування компонентів для вирішення специфічних завдань. Така структура моделі може бути застосована для аналізу різних аварійних сценаріїв у КЛ, включаючи двофазні та трифазні замикання, а також інші складні несправності. Модель також надає можливості для всебічного дослідження даних з віртуальних вимірювальних приладів, інтегруючи паралельні вітки та навантаження з динамічно мінливими характеристиками, що є ключовим для розрахунків різних робочих режимів енергосистем на етапах їхнього проектування [35].

5.2 Перевірка моделі для аналізу електричних кіл з високовольтними КЛ

Досліджуваний об'єкт являє собою 110 кВ кабельну лінію, яка забезпечує зв'язок між підстанцією ПС "Рось" та ПС "Фурси". Параметри для схеми заміщення цієї лінії визначені з врахуванням геометричних характеристик однофазного кабелю, згідно з методикою, описаною в розділі 4.

Електрична схема кабельної лінії для розрахунку представлена як послідовність ділянок з кабелями зі зшитим поліетиленом (ЗПЕ) як ізоляцією. Кожен кабель має довжину $l=6580$ метрів і наступні геометричні розміри: $r_1=8.74$ мм, $r_2=24$ мм, $r_3=25$ мм, $r_4=31$ мм.

У практичному застосуванні високовольтні КЛ часто використовують різні способи з'єднання екранів [18]. В прикладі, при заземленні екранів кабелю на

обох кінцях, через екрани проходять значні індуковані струми, які можуть досягати 85 А при струмі в фазній жилі 250 А, що призводить до додаткового нагріву екрану та втрат потужності (рис. 26) [26].

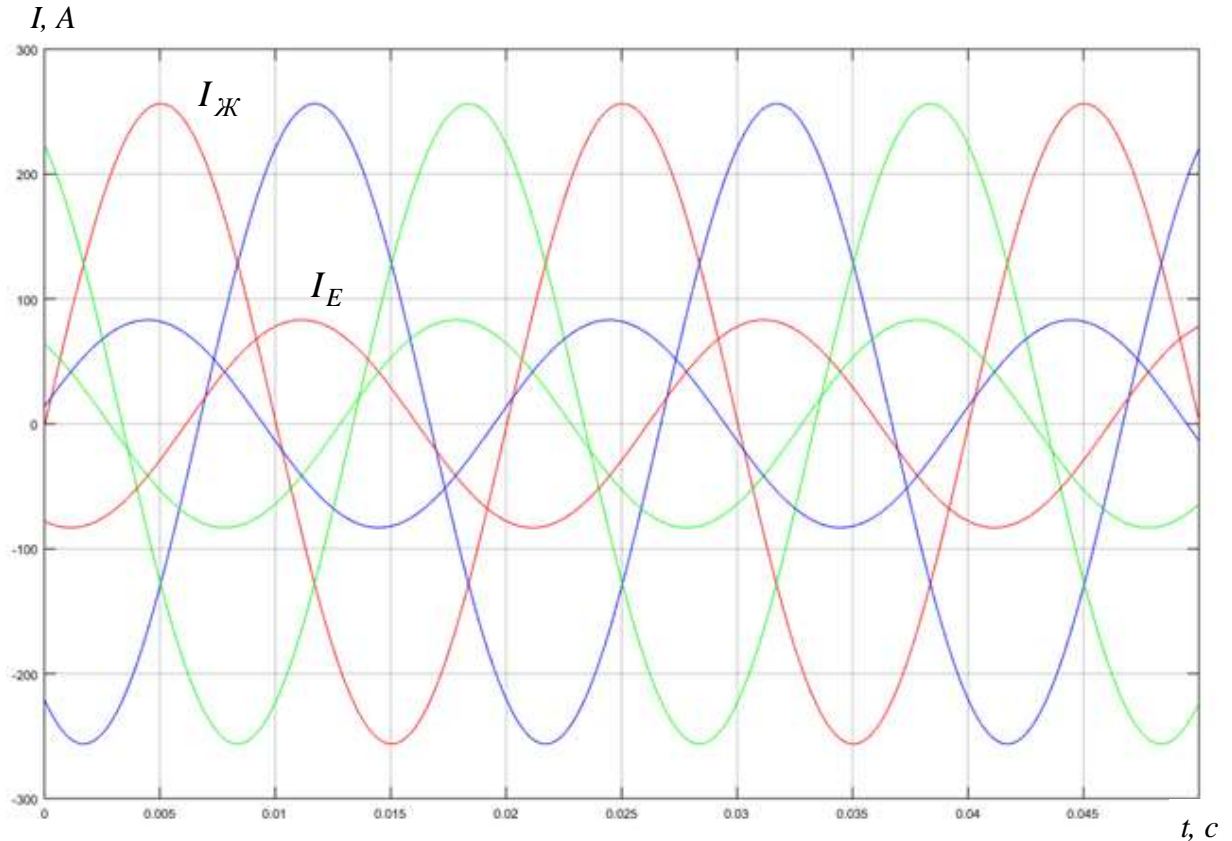


Рисунок 26 – Осцилограма струму в жилі і екрані при заземленні з двох сторін екранів кабелю

Ефективним методом є використання транспозиції екранів [18]. В ідеальному випадку транспозиції, коли всі три ділянки кабелю мають однакову довжину $L_1=L_2=L_3$, струми в екранах не виникають під час нормального режиму роботи (рис. 27). Однак у більшості випадків під транспозицією екранів розуміється ідеалізований сценарій, де кабель розділений на три рівні ділянки за допомогою транспозиційних муфт $L_1=L_2=L_3=L_K/3$. На практиці часто виникають обмеження, які не дозволяють здійснити ідеальну транспозицію через фізичні перепони, такі як інженерні конструкції, річки чи дороги, що впливає на вибір місць для муфт та коробок транспозиції [18].

У результаті, виникає неідеальна транспозиція з різними довжинами ділянок кабелю $L_1 \neq L_2 \neq L_3$, але це не впливає на загальний режим роботи мережі та не змінює струми в жилах кабелю. Реалізація такої транспозиції представляє собою виклик, оскільки потребує уваги до множини змінних, включно з довжиною кабелю, змотаного на барабан, перерізом жили та екрана, кількість можливих місць з'єднань, а також інші перешкоди що виникають при прокладанні кабеля [15-18].

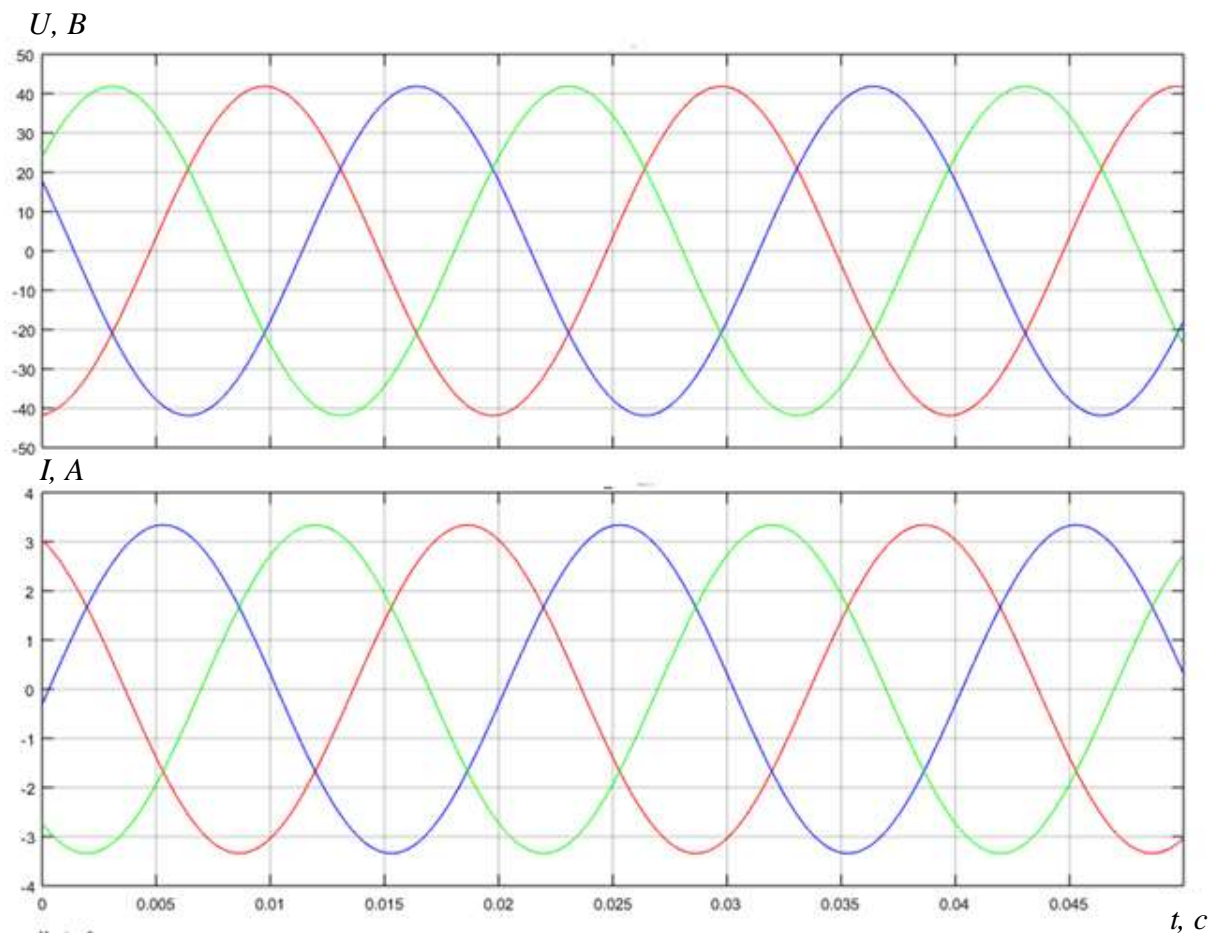


Рисунок 27 – Осцилограми напруги та струму в екрані при ідеальній транспозиції ($L_1=L_2=L_3=L_K/3$)

Дана модель володіє рядом переваг, які роблять її універсальною та ефективною для розрахунків та аналізу електричних кіл, до складу яких входять високовольтні КЛ. Вона оснащена алгоритмами, які дозволяють адаптувати та модифікувати параметри схеми заміщення що забезпечує велику гнучкість у створенні моделей різних електричних кіл, включно з тими, що містять КЛ [36].

Крім того, модель надає можливість змінювати параметри та конфігурацію схеми заміщення протягом усього часового діапазону моделювання, що значно розширює спектр можливих режимів роботи для вивчення. Вона також ефективна для моделювання різних режимів навантаження, здатна легко адаптуватися до різноманітних випадків несиметрії у трифазних кабельних системах [34].

5.3 Обмеження комутаційних перенапруг у високовольтних кабельних лініях електропередачі

Серед передових підходів до підвищення ефективності та безпеки КЛ напруги виокремлюється використання кабелів з зшитою поліетиленовою (ЗПЕ) ізоляцією. Цей матеріал відзначається поліпшеними експлуатаційними властивостями, зокрема, в умовах густої забудови та складних комунікаційних мереж. ПЛ та КЛ мають істотно відрізняються за своїми зосередженими та розподіленими реактивними параметрами, що може призводити до комутаційних перенапруг і явищ, недостатньо вивченим на сьогоднішній день. Також існує обмежена інформація щодо варіацій розподілених характеристик сучасних високовольтних кабелів із ЗПЕ ізоляцією при використанні їх в різноманітних умовах експлуатації.

Зазвичай, коливальні характеристики цих систем не проявляються при нормальних умовах передачі енергії. Однак короткочасні перенапруги або пікові струми у КЛ, що можуть виникати в результаті запланованих або несподіваних комутацій, часто обумовлені нагромадженням електричної та магнітної енергій у реактивних компонентах кіл. Кожне переключення може ініціювати перехідний процес, що потенційно здатний пошкодити ізоляцію [19, 37].

Обмеження різних форм комутаційних перенапруг має первинне значення. Технічні та економічні аспекти розробки захисту передбачають аналітику збитків, викликаних аваріями, простоями чи незапланованими ремонтними роботами на електроустаткуванні КЛ, а також наслідків для технологічних процесів споживачів.

Таким чином, актуальність моделювання та аналізу комутаційних перенапруг, що відбуваються під час підключення та роботи КЛ в високовольтних трифазних електричних колах, є незаперечною [26].

Розглянемо графіки струмів і напруг, які виникають в результаті комутаційних перенапруг у трифазній КЛ з однофазним виконанням під час її підключення до джерела трифазної напруги (рис. 28).

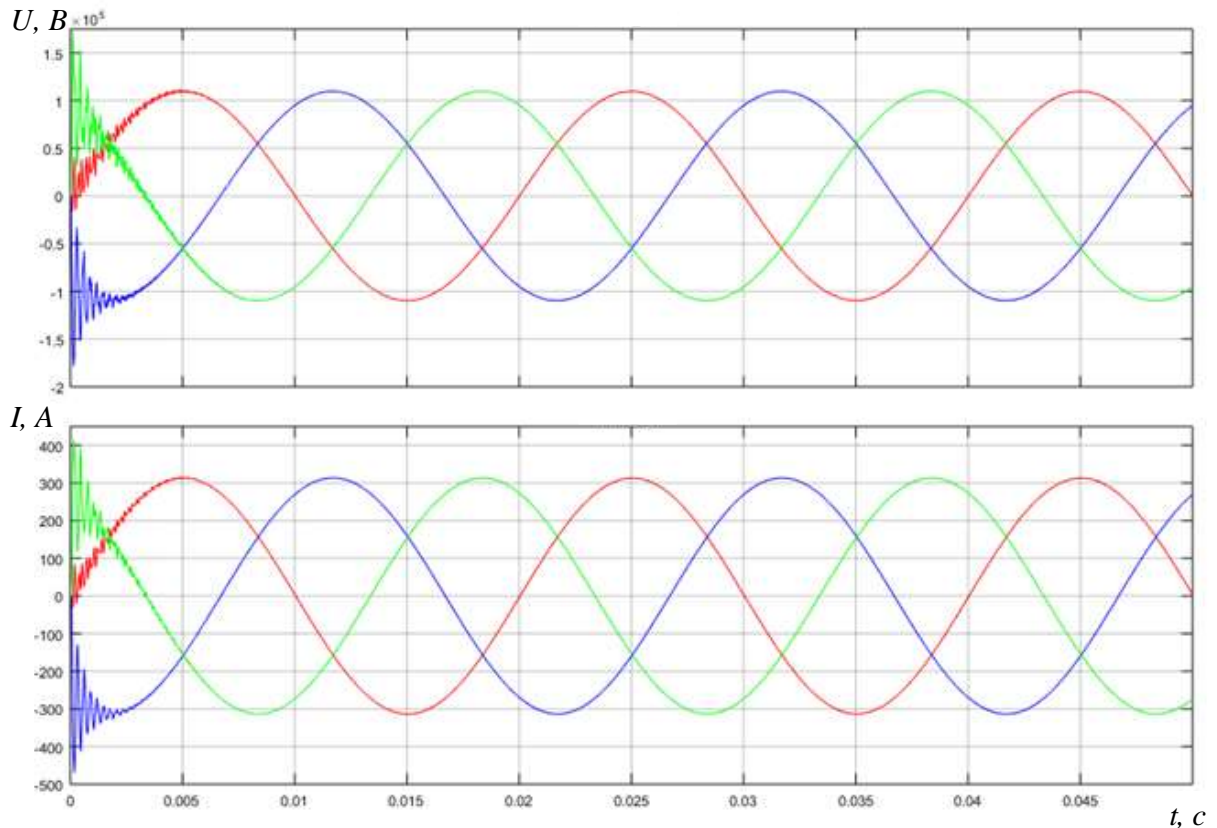


Рисунок 28 – Осцилограми напруги та струмів у трифазній кабельній лінії в момент підключення до джерела живлення

Для зниження комутаційних перенапруг використовується методика вибору оптимальних умов запуску перехідного процесу, яка передбачає мінімізацію амплітуд вільних коливань. Одним із способів є регулювання моменту активації, зокрема, коригування початкових кутів для кожної фази [22, 24,29].

Проаналізуємо осцилограми комутаційних перенапруг струму та напруги в екранах однофазної трифазної КЛ при її підключенні до джерела трифазного напруги, фокусуючись на зміні початкового кута.

Комутація кожної фази була здійснена в різний момент часу, щоб забезпечити початковий кут включення кожної фази на рівні нуля. Як уже зазначалося, амплітуда вільної складової залежить від кута включення. Таким чином, при куті включення $\varphi=0^\circ$, амплітуда фази досягає свого номінального значення, що підтверджується осцилограмами на рисунку 29. Аналізуючи осцилограми на цьому рисунку, ми можемо дійти висновку, що при підключенні кожної фази трифазної КЛ до джерела трифазної напруги з частотою $f=50$ Гц з часовою затримкою $1/150$ секунди, кут включення для всіх фаз буде нульовим. Це дозволяє ефективно обмежити комутаційні перенапруги.

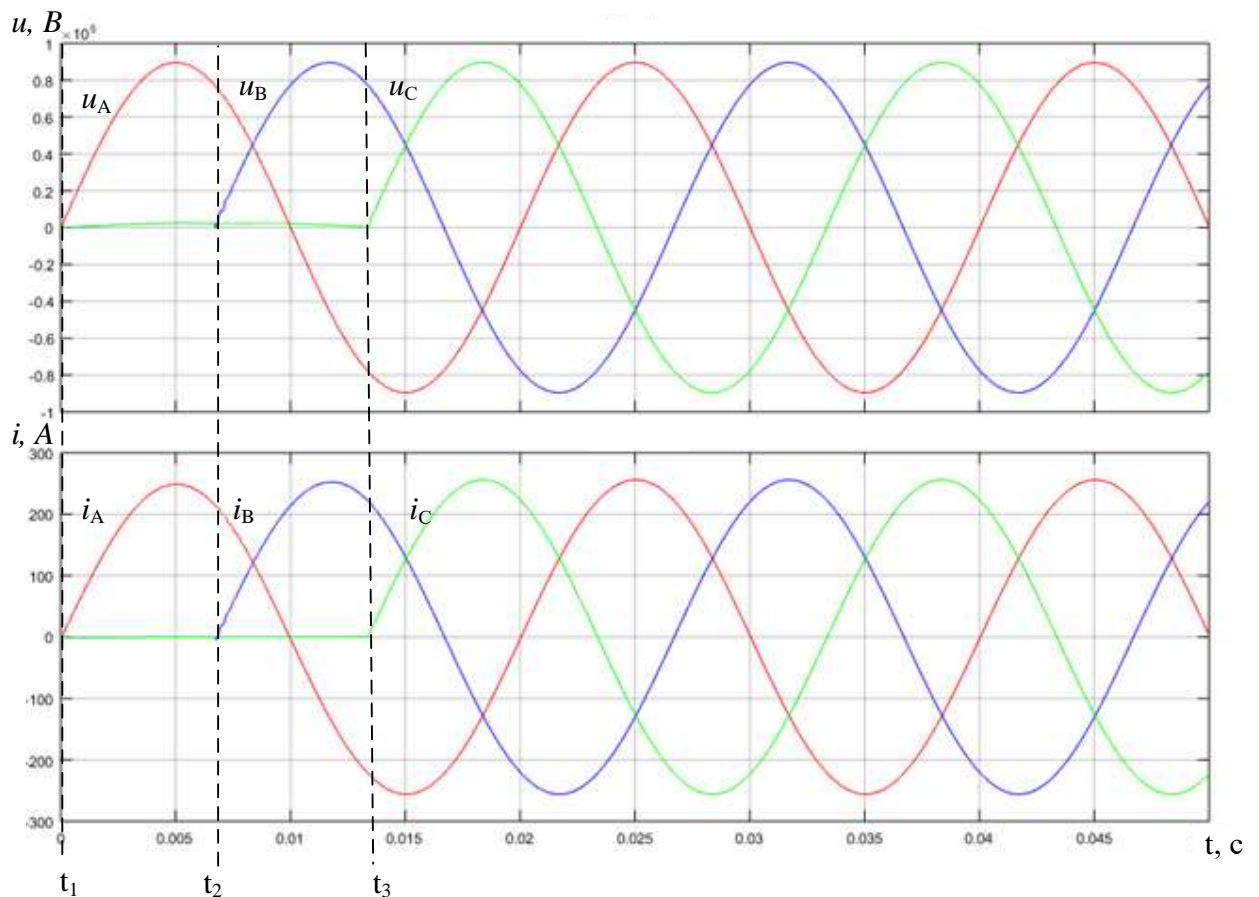


Рисунок 29 – Осцилограми напруги і струмів у трифазній КЛ в момент підключення до джерела живлення при куті включення $\varphi=0^\circ$

Коригування початкового кута кожної фази під час комутації не призводить до зростання напруги на екрані кабелю, як це видно на рисунках 30 та 31. Однак в екранах з'являються індуковані струми (рис. 31), криві перехідного

процесу яких вимагає детального вивчення для глибокого розуміння процесів, що відбуваються всередині екранів кабелю [24].

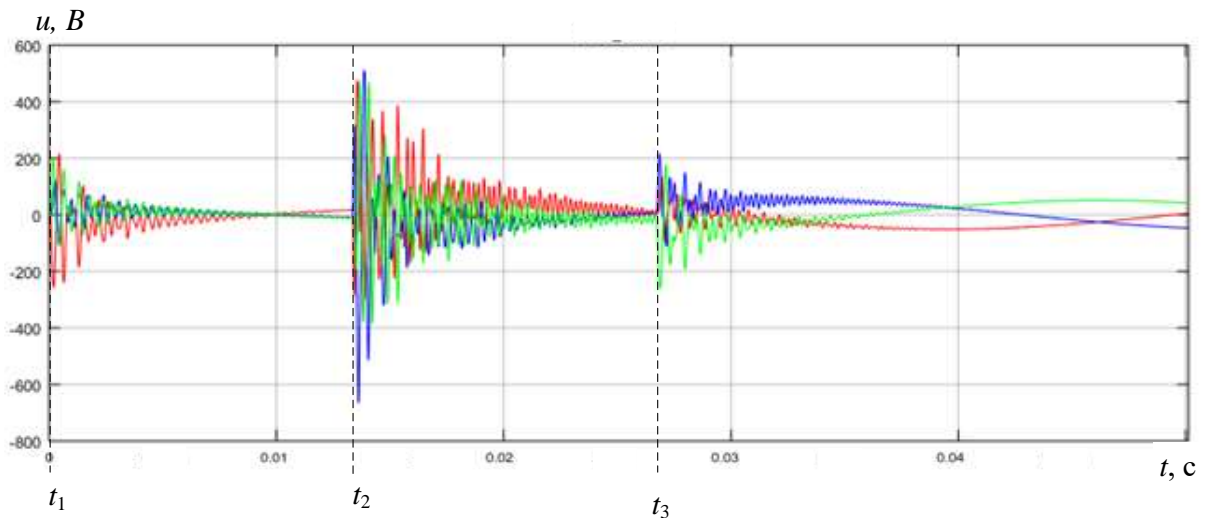


Рисунок 30– Зміна напруги на екранах трифазної кабельної лінії при коригуванні початкового кута кожної фази.

Як показано на рисунках 30 та 31 у момент часу t_1 вмикається фаза А, внаслідок чого через жилу починає протікати струм, створюючи навколо неї змінне магнітне поле. Це, у свою чергу, призводить до індукування струму в екрані, як показано на рис. 31. Індукований струм у екрані спричиняє зниження напруги у відповідній фазі, одночасно впливаючи на зменшення напруги в екранах фаз В і С через механізм магнітної індукції. У фазах В та С, які залишаються вимкненими, спостерігається напруга на екранах, обумовлена електромагнітним взаємозв'язком та ємнісними характеристиками з фазою А.

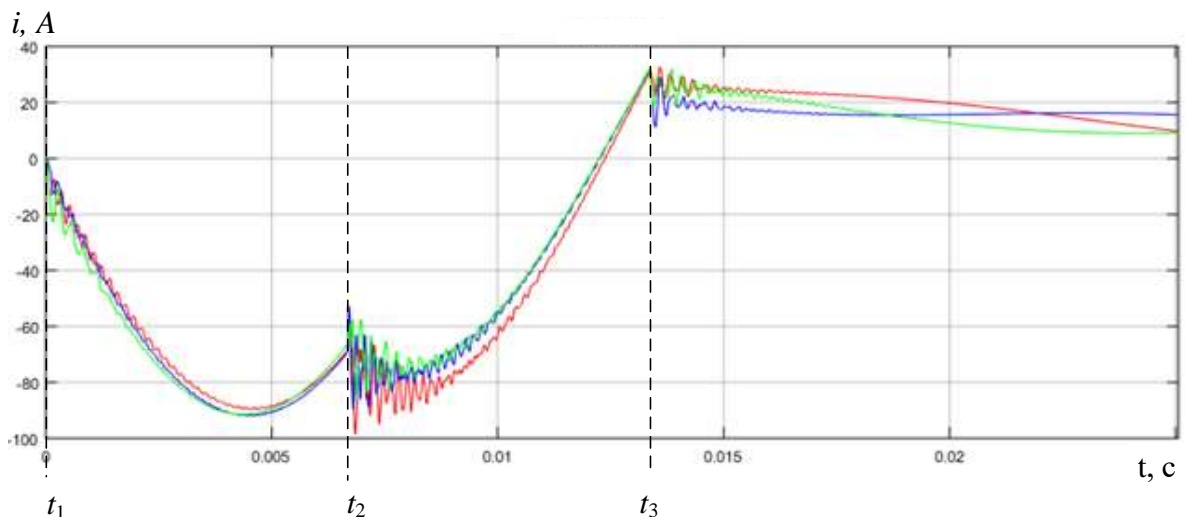


Рисунок 31 – Графік перехідних струмів при зміні початкового кута

При вмиканні однієї фази, індуквані струми починають виникати в екранах усіх фаз. Через те, що в роботі знаходиться тільки напруга фази А, процес транспозиції екранів не забезпечує компенсацію індуктивних ЕРС, що призводить до суттєвого підвищення рівня струму.

В момент часу t_2 , з включення фази В, відбувається зростання ЕРС взаємоіндукції між фазами. Як видно з осцилограм, напруги u_A та u_B мають вищу початкову амплітуду порівняно з неактивною напругою u_C . Виникнення напруги в фазі В, що є результатом транспозиції екранів, врівноважує поздовжні струми, які протікають через екрани, однак це не забезпечує рівномірного розподілу напруг між фазами.

У момент t_3 підключаються всі три фази, внаслідок чого ЕРС взаємоіндукції, індуквана в екранах трьох ділянок транспозиції, стає нульовою через зміщення фаз на 120° та 240° . В результаті, індуквані струми в екранах після короткого перехідного процесу наближаються до нульових значень. Коливання, які виникають у моменти t_1 , t_2 та t_3 під час підключення різних фаз, спричинені процесом перезаряду ємностей та електромагнітною взаємодією між екранами та жилами у трифазних кабельних системах.

Висновок до розділу 5

В розділі доведено, що амплітуда вільних складових напруг залежить від кута включення та частоти власних коливань. Встановлено, що зі збільшенням відхилення початкової фази напруги від 90 градусів, амплітуда власних коливань зменшується. Коли частота власних коливань наближається до частоти джерела, затримка в досягненні пікових значень стабільної та вільної складових веде до підвищення амплітуди максимальних комутаційних перенапруг.

Аналізуючи осцилограми комутаційних перенапруг струму та напруги в екранах однофазної трифазної КЛ при підключенні до джерела трифазної напруги з зміною початкового кута, виявлено, що при активації кожної фази з часовою затримкою $1/150$ секунди, кут включення всіх фаз стає нульовим, що сприяє обмеженню комутаційних напруг. Зміна початкового кута при комутації

не збільшує напругу на екрані кабелю, проте при цьому виникають індуковані струми, аналіз яких важливий для розуміння процесів усередині екранів кабелю.

6 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Розробка стартап-проекту для прокладки високовольтних кабельних ліній (110-500 кВ) у поліетиленових трубах із композитами з наночастинками Al_2O_3 в Україні, основна мета реалізації полягає у впровадженні інноваційних, безпечних та екологічно стійких технологій, що не тільки підвищують надійність, але й сприяють зниженню ризиків перенапруги в кабельних мережах.

6.1 Опис ідеї проекту

Стартап-проект спрямований на впровадження новаторських рішень у сфері електроенергетики, зокрема на використання поліетиленових труб із композитами з наночастинками Al_2O_3 а саме для прокладання кабелів 110-500кВ, основна ідея полягає в тому, щоб зробити процес передачі електроенергії більш ефективним, безпечним та екологічно стійким.

При прокладанні кабельних ліній 110-500 кВ, звичайні поліетиленові труби можуть мати кілька недоліків, які обмежують їхнє застосування. Одним з основних недоліків є недостатня механічна міцність, через яку труби можуть бути пошкоджені під час встановлення або експлуатації, особливо у складних умовах, таких як кам'яністі ґрунти або місця з високою транспортною активністю. Крім того, звичайний поліетилен може бути не достатньо стійким до високих температур, що принципово при прокладанні високовольтних кабелів, які можуть генерувати значне тепло.

Використання поліетилену з композитами, що містять наночастинки Al_2O_3 , може значно вдосконалити ці аспекти. Наночастинки Al_2O_3 збільшують механічну міцність поліетилену, роблячи труби більш стійкими до фізичних пошкоджень, що особливо важливо при укладанні кабелів у складних умовах. Також вони підвищують термічну стабільність матеріалу, що дозволяє трубам витримувати вищі температури, характерні для високовольтних кабелів, без ризику пошкодження чи втрати властивостей.

Проект також уважно ставиться до питань пожежної безпеки та механічної стійкості. Використання поліетиленових труб з композитами забезпечує високий

рівень захисту КЛ від пожеж та інших зовнішніх впливів. Окрім цього, розуміння того, як важливо вибирати термостійкі матеріали, допомагає запобігти перегріву кабелів, що є ключовим аспектом у забезпеченні їхньої надійності та безпеки.

Таблиця 4 – Комплексний огляд проекту: ідея, застосування та користь [38]

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигода для користувачів
<p>прокладання високовольтних кабельних ліній 110-500кВ у ПЕ із композитами з наночастинками Al_2O_3 трубах в Україні</p>	<p>1. Кабельні траншеї: Використання в традиційних кабельних траншеях, де труби забезпечують додатковий захист кабелів від зовнішніх впливів.</p>	<p>1. Підвищена механічна міцність та стійкість до зовнішніх пошкоджень. Це знижує ризик пошкоджень труб під час транспортування, встановлення та експлуатації.</p>
	<p>2. Кабелепроводи: Інтеграція у вже існуючі або нові кабелепроводи, що використовуються для організації мереж.</p>	<p>2. Покращена електрична ізоляція та зменшений ризик перенапруг і електричних пробойів.</p>
	<p>3. Кабельні тунелі: Установка в кабельних тунелях, які проходять під землею чи водою, забезпечуючи надійний захист від води та механічних пошкоджень.</p>	<p>3. Краща стійкість до зовнішніх умов та UV-випромінювання що продовжує термін служби</p>
	<p>4. Безтраншейна прокладка: Застосування технологій безтраншейної прокладки, знижуючи вплив на навколишнє середовище та зменшуючи витрати.</p>	<p>4. Легкість та гнучкість поліетиленових труб з композитами спрощують процес встановлення, зменшуючи витрати на робочу силу та обладнання.</p>
	<p>5. Шляхопроводи та інженерні споруди: Прокладання через мости, шляхопроводи, естакади, тунелі, забезпечуючи безперебійну електропередачу в складних інженерних умовах.</p>	<p>5. Додавання наночастинок до полімерів може підвищити їх вогнетривкість. Особливо Al_2O_3 відомий своєю здатністю підвищувати вогнетривкість полімерних матеріалів.</p>
	<p>6. Відкрита траншейна прокладка: Ефективне використання у відкритих траншеях, особливо в міських та промислових зонах.</p>	<p>6. Поліетилен стійкий до корозії та багатьох хімічних реагентів. Включення наночастинок Al_2O_3 може ще більше покращити ці властивості. Також, поліетилен є відносно екологічним матеріалом, особливо порівняно з традиційними металевими альтернативами.</p>

6.2 Технологічний аудит проекту

Для розробки проекту, потрібно продумати та реалізувати кілька технічних аспектів:

1. Спосіб виготовлення: Для забезпечення поліпшень по всьому об'єму матеріалу, включаючи міцність, термічну стійкість та діелектричні властивості, то під час виробництва поліетилену слід додавати Al_2O_3 в структуру. Для спеціалізованих застосувань, де потрібен високий контроль над поверхневими властивостями можна скористатися методом напилення.

2. Моделювання перенапруг: Використання програмного забезпечення як Matlab для моделювання перенапруг. Matlab дозволяє провести детальний аналіз імпульсних характеристик і впливу перенапруг на кабельні системи. Це необхідно для розуміння та оптимізації системи захисту від перенапруг.

3. Розрахунок параметрів системи: Використання Mathcad для розрахунку ключових параметрів системи, включаючи електричні характеристики кабелів, потреби в матеріалах та розмірах. Mathcad допомагає в точних інженерних розрахунках та візуалізації результатів.

4. Документація та звітність: Використання пакету Microsoft Office, зокрема Excel для управління даними, Word для створення технічної документації, та PowerPoint для презентацій. Важливо забезпечити якісне оформлення та представлення всієї технічної інформації.

5. Нормативні документи та стандарти: Вивчення та дотримання відповідних нормативних документів та стандартів, що регулюють високовольтні кабельні системи. Це включає місцеві та міжнародні стандарти з безпеки, якості та екологічних норм.

6. Архітектурне проектування: Використання спеціалізованих CAD програм (наприклад, AutoCAD), для архітектурного та інженерного проектування кабельних мереж. Це дозволяє детально планувати трасу прокладання кабелів, розташування вузлів з'єднання та інші аспекти інфраструктури.

Можливість технічної реалізації наведена в табл. 5 [38].

Таблиця 5 – Технічна здійсненість проекту

Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
прокладання високовольтних кабельних ліній 110-500кВ у ПЕ із композитами з наночастинками Al_2O_3 трубах в Україні	Спосіб виготовлення шляхом напилення чи додавання в структуру	Розробити	Вимагає спеціалізованих знань
	Використання Matlab для аналізу перенапруг	Доступна	Вимагає спеціалізованих знань
	Використання Mathcad для інженерних розрахунків	Доступна	Вимагає спеціалізованих знань
	Використання пакету Microsoft Office для документування	Доступна	Легко доступний і зрозумілий
	Дотримання відповідних нормативних документів	Доступна	Потребує детального вивчення
	Використання AutoCAD для проектування	Доступна	Вимагає спеціалізованих навичок

6.3 Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї стартапу

Порівняльна таблиця 6 для ПЕ труб з композитами з наночастинками Al_2O_3 , звичайних ПЕ труб та сталевих труб, оцінена за рядом критеріїв на шкалі від 1 (погано) до 5 (відмінно)

Таблиця 6 – Порівняльний аналіз показників конкурентних матеріалів

Критерій	ПЕ з композитами зі наночастинками Al_2O_3 труби	ПЕ труби	Сталеві труби
Міцність	4	3	5
Вага	4	5	2
Корозійна стійкість	5	5	2
Гнучкість	3	5	1
Вартість	3	3	4
Встановлення/Монтаж	3	5	2
Екологічність	4	4	2
Термін служби	4	3	5
Електрична ізоляція	5	3	1
Пожежна безпека	5	3	4

З таблиці 6 видно що поліетилен з композитами з наночастками Al_2O_3 видається досить збалансованим вибором, з хорошою міцністю, високою корозійною стійкістю, відмінною електричною ізоляцією та пожежною безпекою.

Таблиця 7 надає уявлення про різні цільові групи проекту, їхні унікальні потреби та вимоги до продукту. Зрозуміння цих аспектів допоможе проекту ефективно взаємодіяти з різними сегментами ринку, адаптувати свої стратегії та відповідати очікуванням клієнтів [38].

Таблиця 7 – Визначення цільових груп та вимог до продукту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінність у поведінці різних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Модернізація енергетичної інфраструктури	Урядові агенції та комунальні служби	Урядові агенції зосереджені на довгострокових рішеннях з високим рівнем надійності та безпеки. Комунальні служби шукають економічно ефективні та швидко реалізовані рішення.	Висока надійність, тривалий термін служби, легкість установки та обслуговування, відповідність нормам безпеки.
Покращення екологічної безпеки	Екологічні організації та ініціативи	Екологічні організації фокусуються на мінімізації впливу на навколишнє середовище та використанні екологічно чистих матеріалів.	Екологічність матеріалів, низький вплив на довкілля, можливість переробки.
Розширення та модернізація мереж	Приватні енергетичні компанії	Приватні компанії шукають інноваційні рішення, які можуть забезпечити конкурентну перевагу та ефективність.	Висока якість, інноваційність, ефективність у використанні, конкурентоспроможна ціна.
Оновлення застарілої інфраструктури	Забудовники та інженерні компанії	Ця група шукає надійні та технічно прогресивні рішення для інтеграції у нові будівельні проекти.	Технологічність, надійність, сумісність з новітніми будівельними стандартами.

Аналізуючи потенційні техніко-економічні переваги ідеї стартапу, використання поліетилену з нанокompозитами Al_2O_3 у стартап-проекті для прокладання КЛ високої напруги пропонує значні переваги в безпеці та надійності енергетичних систем. Покращені діелектричні властивості та міцність цього матеріалу зменшують ризик електричних пробоїв та механічних пошкоджень, що забезпечує більшу безпеку кабельних мереж та знижує потребу у частих ремонтах. Легкість монтажу та експлуатації таких поліетиленових труб сприяє зниженню трудових витрат і часу, необхідного для установки та ремонту.

Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 8 демонструє ключові фактори, які можуть сприяти або перешкоджати успішній реалізації проекту, і визначає можливі шляхи дій компанії для адаптації та реагування на ці фактори. Врахування цих аспектів допоможе проекту бути гнучким та конкурентоспроможним у складному ринковому середовищі [38].

Таблиця 8 – Фактори сприянь та перешкод реалізації

Фактор	Зміст загрози/можливості	Можлива реакція компанії
Технологічний прогрес	Нові технології можуть відкрити нові можливості для ефективнішої та безпечнішої прокладки кабельних мереж.	Інвестування в дослідження та розвиток, пошук інноваційних рішень.
Конкуренція на ринку	Висока конкуренція може створювати тиск на ціни та маржу, а також вимагати більшої диференціації продукту.	Розробка унікальної цінності пропозиції, поліпшення якості продукції та послуг.
Економічні коливання	Зміни в економіці, такі як рецесія, можуть впливати на інвестиційну спроможність та попит на нові інфраструктурні проекти.	Гнучке ціноутворення, пошук альтернативних ринків, оптимізація витрат.
Доступність ресурсів	Обмеження або коливання в доступності ключових ресурсів може ускладнити реалізацію проекту.	Розробка альтернативних ланцюгів поставок, диверсифікація постачальників.

SWOT-аналіз є ключовим інструментом стратегічного планування та надзвичайно корисним для стартап-проектів. Цей метод допомагає

ідентифікувати Сильні сторони (Strengths), Слабкі сторони (Weaknesses), Можливості (Opportunities) та Загрози (Threats), з якими може зіткнутися новий бізнес [38].

Таблиця 9 демонструє аналіз ключових факторів, що сприяють та перешкоджають реалізації стартап-проекту

Таблиця 9 – SWOT-аналіз для стартап-проекту

Сильні Сторони (Strengths)	Слабкі Сторони (Weaknesses)
<ol style="list-style-type: none"> 1. Використання новітніх матеріалів забезпечує технологічну перевагу. 2. Зосередженість на екологічно чистих матеріалах та методах відповідає сучасним трендам та очікуванням споживачів. 3. Використання матеріалів, які забезпечують довгий термін служби системи, знижуючи вартість її експлуатації. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Інноваційні технології та матеріали можуть бути дорожчими за традиційні, що підвищує первинні інвестиції. 2. Як новий гравець на ринку, проект може зіткнутися з викликами у встановленні довіри та будівництві репутації. 3. Особливості технологічного виробництва
Можливості (Opportunities)	Загрози (Threats)
<ol style="list-style-type: none"> 1. Суспільне прагнення до зниження впливу на довкілля створює попит на екологічно чисті технології. 2. Урядові ініціативи щодо модернізації енергетичної інфраструктури можуть відкрити нові ринкові можливості. 3. Співпраця з великими енергетичними компаніями може забезпечити додаткові ринкові можливості. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Висока конкуренція на ринку з боку вже встановлених гравців, які використовують традиційні технології. 2. Потенційні зміни у законодавстві можуть вплинути на діяльність проекту та його рентабельність. 3. Нестабільність в економіці може вплинути на інвестиційну спроможність та готовність ринку до нововведень

6.4 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Розробка маркетингової програми для стартап-проекту вимагає інтегрованого підходу, що зосереджується на вивченні цільового ринку, розумінні унікальних потреб потенційних клієнтів та створенні ефективних комунікаційних стратегій.

Ефективна маркетингова програма повинна також акцентувати на унікальності продукту чи послуги, підкреслюючи її цінність для клієнтів та відрізняючи її від конкурентів, а також включати чітку стратегію брендингу, що формує стійке враження про бренд та сприяє його впізнаваності.

Таблиця 10 надає детальний огляд основних вигод використання поліетиленових труб у рамках стартап проекту, порівнюючи їх з іншими типами труб. Цей огляд не лише підкреслює ключові переваги цього вибору, але й допомагає визначити потенційні ринкові можливості та стратегічні позиціонування продукту. Зіставлення з іншими матеріалами дозволяє чітко виділити конкурентні переваги, які можуть бути ефективно використані в маркетингових та рекламних кампаніях [38].

Таблиця 10 – Визначення ключових переваг потенційного товару

Потреба	Вигода послуги	Переваги перед конкурентами
Доцільність використання ПЕ з композитами зі наночастками Al ₂ O ₃ труб	Підвищена міцність та довговічність, кращі діелектричні властивості, екологічність.	Кращі технічні характеристики, висока адаптація до екологічних стандартів.
Аналіз методу прокладання	Ефективність, безпека та економія в процесі прокладання кабелів.	Інноваційний підхід до прокладання, мінімізація зовнішніх впливів.
Технічні рішення	Оптимізація використання матеріалів, підвищення надійності енергосистеми.	Використання передових технологій, фокус на довгострокову стабільність.
Якість розрахунків	Точність у прогнозуванні ризиків, реалістичне планування бюджету.	Висока точність та надійність розрахунків, підвищення довіри клієнтів.
Оцінка вартості проекту	Конкурентоспроможність за вартістю, економія на довгостроковій експлуатації.	Ефективність інвестицій, зниження експлуатаційних витрат.

Висновок до розділу 6

Враховуючи аналізовані аспекти, стартап-проект з прокладання кабельних ліній високої напруги в поліетиленових трубах з композитами, що містять наночастинки Al₂O₃, відкриває значні перспективи в енергетичній галузі. Інноваційний підхід до використання матеріалів з підвищеною міцністю не тільки забезпечує безпеку та надійність кабельних систем, але й сприяє зниженню загальних експлуатаційних витрат завдяки зменшенню потреби у ремонтах та заміні. Додатково, тривалий термін служби матеріалів та можливості переробки відповідають сучасним вимогам сталого розвитку, що є суттєвим

фактором для енергетичних компаній та інвесторів тому стартап має всі шанси на успіх. Проте, необхідно також враховувати можливі виклики, такі як високі початкові інвестиції, потреба в технічній експертизі та ринкова невизначеність. Ефективне управління цими аспектами та зосередження на унікальних перевагах продукту можуть допомогти забезпечити довгостроковий успіх проекту.

ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації роботі було проведено детальне дослідження комутаційних перенапруг у високовольтних кабельних лініях (КЛ) електропередачі. Основний об'єктом дослідження є кабельна лінія 110 кВ, що забезпечує зв'язок між підстанціями "Рось" та "Фурси", вона має три одножильні кабелів на кожен ланцюг з високоякісною ізоляцією зі зшитого поліетилену (ЗПЕ), марки АПвЭгаПу-110 з перерізом 240 мм² та мідним екраном перерізом 95 мм². Загальна довжина кабельної траси становить 6580 метрів, частина з яких прокладена за допомогою технології горизонтально-направленого буріння.

Було розроблено модель КЛ, яка вирізняється високою геометричною точністю, дозволяючи детально враховувати геометричні розміри кабелів, включно з радіусами їх різних шарів, що є ключовим для точного моделювання їхніх електричних властивостей. Модель здатна аналізувати індуковані струми в екранах кабелю, особливо в умовах, коли вони заземлені на обох кінцях, допомагаючи виявити потенційні ризики зайвого нагріву та втрат потужності. Також вона дозволяє досліджувати вплив транспозиції екранів, техніки, яка може значно зменшити проблеми пов'язані з індукованими струмами, навіть з урахуванням обмежень, які можуть виникнути в реальних умовах.

Докладно було розглянуте питання комутаційних перенапруг, з аналізом методи їх обмеження та їх впливом на безпеку та ефективність електричних мереж. Окремо зосереджується увага на коригуванні початкових кутів фаз під час комутації, для зниження ризику перенапруг.

Було розроблено стартап-проект у сфері прокладання високовольтних кабельних ліній (110-500 кВ) у ПЕ трубах з композитами, зокрема з наночастинками Al₂O₃ що забезпечують підвищену механічну міцність, термічну стабільність та збільшують час експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Fotis G. Risks in the european transmission system and a novel restoration strategy for a power system after a major blackout [Electronic resource] / Georgios Fotis, Vasiliki Vita, Theodoros I. Maris // Applied sciences. – 2022. – Vol. 13, no. 1. – P. 83. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/app13010083>.
2. Modeling analysis and measurement of power frequency overvoltage distribution of long-distance transmission cable [Electronic resource] / Kai Yi [et al.] // 2023 8th international conference on power and renewable energy (ICPRE), Shanghai, China, 22–25 September 2023. – [S. l.], 2023. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/icpre59655.2023.10353605> (date of access: 12.01.2024).
3. План розвитку розподільних електричних мереж на 2016- 2025 роки, розроблений у контексті заходів щодо реалізації положень Закону України «Про засади функціонування ринку електричної енергії України»/Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. – 2015 р. – Т.1. – 67 с.
4. Tziouvaras D. A. Protection of mixed overhead and underground cable lines [Electronic resource] / D. A. Tziouvaras, J. Needs // 12th IET international conference on developments in power system protection (DPSP 2014), Copenhagen, Denmark. – [S. l.], 2014. – Mode of access: <https://doi.org/10.1049/cp.2014.0132>.
5. Звіт про результати діяльності Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, у 2019 році. Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг 27 травня 2020 року № 975.
6. Energy Charter Secretariat. Ukrainian Energy Sector Damage Assessment Report – X, 2023. URL: https://www.energycharter.org/fileadmin/Documents-Media/Occasional/2023_05_24_UA_sectoral_evaluation_and_damage_assessment_Version_X_final.pdf
7. Popeski R. European power companies make permanent link with Ukraine. Reuters, 2023. URL:<https://www.reuters.com/business/energy/european-power-companies-make-permanent-link-with-ukraine-2023-11-28/>

8. Zubkova D. Ukrenergo completes construction of 330 kV high-voltage line in Western Ukraine. Ukrainian News, 2022. URL: <https://ukranews.com/en/news/849996-ukrenergo-completes-construction-of-330-kv-high-voltage-line-in-western-ukraine>
9. Erëza Vela. Ukraine energy support fund procures first mobile high voltage laboratories. Energy Community, 2023. URL: <https://www.energy-community.org/news/Energy-Community-News/2023/11/22.html>
10. Прасад. А. Україна запустила лінію електропередачі з Польщею після модернізації. Forbes, 2023. URL: <https://forbes.ua/news/ukraina-zapustila-liniyu-elektroperedachi-z-polshcheyu-pislya-modernizatsii-02052023-13418>
11. Василюк С. В. Техніка високих напруг [Електронний ресурс] : навч. посіб. / С. В. Василюк, К. С. Василюк. – 19-те вид. – Рівне : НУВГП, 2018. – 187 с. – Режим доступу: <https://core.ac.uk/download/pdf/297135059.pdf>.
12. Tziouvaras D. A. Protection of mixed overhead and underground cable lines [Electronic resource] / D. A. Tziouvaras, J. Needs // 12th IET international conference on developments in power system protection (DPSP 2014), Copenhagen, Denmark. – [S. l.], 2014. – Mode of access: <https://doi.org/10.1049/cp.2014.0132> .
13. СОУ-Н МЕВ 40.1-37471933-49:2011 Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ. Настанова (у редакції наказу від 26.01.2017 № 82).
14. Правила улаштування електроустановок. вид. – К.: Міненерговугілля України, 2017 – 793 с
15. Increasing the ampacity of underground cable lines by optimising the thermal environment and design parameters for cable crossings [Electronic resource] / Bojan Perović [et al.] // IET generation, transmission & distribution. – 2022. – Mode of access: <https://doi.org/10.1049/gtd2.12448> (date of access: 12.01.2024)
16. Кабельні системи високої напруги 110-500кВ. Nexans, 2009. – 42 с.
17. Моделювання захисної дії нелінійного обмежувача перенапруг з урахуванням робочої напруги мережі / Є. Троценко [та ін.] // Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". – 2019. – С. 588–591.

18. Lobodzinskiy V. Transient analysis in three-phase cable lines with the transposition phase cables conductive screens during short circuit fault [Electronic resource] / Vadim Lobodzinskiy // 2021 IEEE 3rd ukraine conference on electrical and computer engineering (UKRCON), Lviv, Ukraine, 26–28 August 2021. – [S. 1.], 2021. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/ukrcon53503.2021.9575468>.
19. Jiayang, W. U. Effects of transients on high voltage cable insulation. Delft University of Technology, 2020.
20. Schött-Szymczak A. Impact of cable configuration on the voltage induced in cable screen during work with one-sidedly ungrounded cable screen [Electronic resource] / Aleksandra Schött-Szymczak, Krzysztof Walczak // Energies. – 2021. – Vol. 14, no. 14. – P. 4263. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/en14144263> .
21. Лободзинський, В. Ю. Перехідні процеси в представлених багатополосниками трифазних колах із розподіленими параметрами та електромагнітними зв'язками: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.05 – теоретична електротехніка / Лободзинський Вадим Юрійович. –Київ, 2019. –27с.
22. Галушко В.В., Олійник В.Є., Лободзинський В.Ю., Бурик М.П. Аналіз перехідних процесів при зміні початкової фази включення високовольтної кабельної лінії. Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики», м. Київ. 2023. С. 1-3
23. Optimization of lumped parameter models to mitigate numerical oscillations in the transient responses of short transmission lines [Electronic resource] / Jaimis S. L. Colqui [et al.] // Energies. – 2021. – Vol. 14, no. 20. – P. 6534. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/en14206534> (date of access: 12.01.2024).
24. Martinez-Velasco, J.; Martin-Arnedo, J. Switching Overvoltages in Power Systems. Power System Transient, Encyclopaedia of Life Support Systems (EOLSS), 2019.
25. Saeed I. Modeling features of a single phase-to-earth fault in a medium voltage overhead transmission line [Electronic resource] / Ismael Saeed, Kamal Sheikhyounis // UKH journal of science and engineering. – 2020. – Vol. 4, no. 2. – P. 127–138. – Mode of access: <https://doi.org/10.25079/ukhjse.v4n2y2020.pp127-138> .

26. Computation of transient profiles along nonuniform transmission lines including time-varying and nonlinear elements using the numerical laplace transform [Electronic resource] / Nuricumbo-Guillén [et al.] // *Energies*. – 2019. – Vol. 12, no. 17. – P. 3227. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/en12173227>.

27. Controlled switching device: application, use and maintenance problems. ENTSO-E, 2022. URL: https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/SOC%20documents/CONTROLLED_SWITCHING_DEVICE_APPLICATION__USE_AND_MAINTENANCE_PROBLEMS.pdf

28. Halushko V. , Lobodzynsky V. Switching control and its impact on the stability of electric power systems. Рівне, III Міжнародна наукова конференція «Інноваційні тенденції сьогодення в сфері природничих, гуманітарних та точних наук», 2023. С. 90-91 URL: <https://archive.mcnd.org.ua/index.php/conference-proceeding/issue/view/29.09.2022>

29. Halushko V., Savichenko P., Lobodzynskyi V., Spinul L., Illina O. Calculation methods of branched circles with distributed parameters and between phase connections. Технології, інструменти та стратегії реалізації наукових досліджень: матеріали VI Міжнародної наукової конференції, м. Дніпро, 2023. С. 107-108. URL: <https://archive.mcnd.org.ua/index.php/conference-proceeding/issue/view/04.08.2023/35>

30. Громадська думка. Білоцерківська міськрайонна газета, м. Біла Церква, 2019. URL: https://new.bc-rada.gov.ua/miska_rada/hromadianske_suspilstvo/4_zasoby_masovoi_informatsii/hromadska_dumka/hromadska_dumka_9_7_98__13796-13797__06_hrudnia_2019_r___prohrama_telebachennia/65178.pdf

31. КЛ 110 кВ: ПС «Рось» - ПС «Фурси». Південний Енерготехнічний Завод, 2021. URL: <https://petz.energy/tpost/osxbyvrbcl-kl-110-kv-ps-ros-ps-fursi>

32. Lebedka S. M. Discrete models of the electric grid elements, obtained with using the second-order formula of implicit gear method [Electronic resource] / S. M. Lebedka, M. V. Petrovskyi, Yu N. Veprik // 2017 IEEE first ukraine conference on electrical and computer engineering (UKRCON), Kiev, 29 May – 2 June 2017. – [S. l.], 2017. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/ukrcon.2017.8100309>

33. Ramos-Leaos O. An advanced transmission line and cable model in matlab for the simulation of power-system transients [Electronic resource] / Octavio Ramos-Leaos, Jose Luis, Jose Alberto // MATLAB - A fundamental tool for scientific computing and engineering applications - volume 1. – [S. l.], 2012. – Mode of access: <https://doi.org/10.5772/48530> (date of access: 12.01.2024)

34. Influence of operation mode on HGIS fast transient overvoltage and enclosure overvoltage [Electronic resource] / Peng Lu [et al.] // 4th international conference on information science, electrical and automation engineering (ISEAE 2022), Guangzhou, China, 25–27 March 2022 / ed. by M. (. Cen, L. Wang. – [S. l.], 2022. – Mode of access: <https://doi.org/10.1117/12.2640282> .

35. Kropotin O. Mathematical model of XLPE insulated cable power line with underground installation [Electronic resource] / Oleg Kropotin // Przegląd elektrotechniczny. – 2019. – Vol. 1, no. 6. – P. 79–82. – Mode of access: <https://doi.org/10.15199/48.2019.06.14> (date of access: 12.01.2024).

36. Time-Domain hybrid method for the coupling analysis of power line network with curved and multidirectional segments [Electronic resource] / Zhihong Ye [et al.] // IEEE transactions on electromagnetic compatibility. – 2022. – P. 1–9. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/temc.2022.3222208> (date of access: 12.01.2024)

37. Statistical analysis of switching overvoltages in UHV transmission lines with a controlled switching [Electronic resource] / Fan Zhang [et al.] // IET generation, transmission & distribution. – 2019. – Vol. 13, no. 21. – P. 4998–5004. – Mode of access: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1072> (date of access: 12.01.2024).

38. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс]: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.