

□

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
другого (магістерського) рівня освіти

на тему:

**«ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У ДАЛЬНІЙ
ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ»**

Виконав: студент VI курсу

групи Ен – 61 спеціальності

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

_____ Яворський В. І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник: _____ Левонюк В. Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент: _____ Коробка С. В.
(прізвище та ініціали)

ДУБЛЯНИ 2024

□

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) рівень

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

(підпис)

к.т.н., доцент Левонюк В. Р.

(вч. звання, прізвище, ініціали)

“ _____ ” _____ 202__ року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Яворський Віталій Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження електромагнітних процесів у дальній
електропередачі постійного струму»

керівник роботи к.т.н., доцент Левонюк В. Р.

(наук.ступінь, вч. звання, прізвище, ініціали)

затверджені наказом Львівського НУП № 616 / к - с від 12.09.2024 р.

2. Строк подання студентом роботи 6.12.2024 р.

3. Вихідні дані

технічна документація, науково-технічна і довідкова література

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

Вступ

1. Передача електричної енергії постійним струмом

2. Технічні рішення передачі електричної енергії постійним струмом

3. Аналіз перехідних електромагнітних процесів у лінії електропередачі постійно-
го струму

4. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях

5. Термін експлуатації та окупність HVDC -ліній: економічний ефект від зни-
ження втрат

Висновки

Перелік джерел посилання

Додатки

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

Графічний матеріал подається у вигляді презентації

6. Консультанти розділів

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
4	Городецький І. М., к.т.н., доцент			

7. Дата видачі завдання 12.09.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вивчення питання пересилання електричної енергії постійним струмом</i>	<i>12.09.2024 – 30.09.2024</i>	
2	<i>Вивчення технічних рішень передавання електричної енергії постійним струмом</i>	<i>1.10.2024 – 11.10.2024</i>	
3	<i>Розробка математичної моделі лінії постійного струму. Аналіз перехідних процесів у лінії.</i>	<i>14.10.2024 – 25.10.2024</i>	
4	<i>Розробка логіко імітаційної моделі процесу виникнення травми при обслуговуванні обладнання на підстанції</i>	<i>28.10.2024 – 8.11.2024</i>	
5	<i>Здійснення техніко-економічної оцінки прийнятих рішень</i>	<i>11.11.2024 – 22.11.2024</i>	
6	<i>Завершення оформлення розрахунково-пояснювальної записки та презентації</i>	<i>25.11.2024 – 29.11.2024</i>	
7	<i>Завершення роботи в цілому</i>	<i>2.12.2024 – 6.12.2024</i>	

Студент

Яворський В. І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

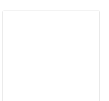
Левонюк В. Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

УДК 621.118:6

Яворський В. І. «Дослідження електромагнітних процесів у дальній електропередачі постійного струму». Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет природокористування, 2024 р. 64 с. текстової частини, 52 рисунки, 32 джерела.

У кваліфікаційній роботі представлено матеріали, які стосуються дослідження електромагнітних процесів у дальній електропередачі постійного струму. Розкрито питання передачі електричної енергії лініями електропередач постійного струму. Представлено технічні рішення для передавання електричної енергії постійним струмом. Зокрема, наведено схеми електричних з'єднань перетворювальних підстанцій, які працюють на електропередачі постійного струму та описано принципи їх роботи. Розроблено математичну модель довгої лінії електропередачі постійного струму для трьох режимів її роботи: режиму активно-індуктивного навантаження, режиму неробочого ходу та режиму короткого замикання. Розроблено алгоритм роботи та написано програмний код алгоритмічною мовою програмування *Visual Fortran*. Представлено просторові, часові та часово-просторові розподіли напруг і струмів у лінії у вигляді рисунків та проведено їх аналіз. На основі середньостатистичних даних, здійснено економічне обґрунтування доцільності впровадження систем передачі електричної енергії постійним струмом.

ПЕРЕХІДНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ЛІНІЯ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ, ПОСТІЙНИЙ СТРУМ.



ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ПЕРЕДАЧА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ПОСТІЙНИМ СТРУМОМ.....	9
1.1 Застосування ліній електропередач постійного струму у світі.....	9
1.2 Переваги застосування ліній постійного струму порівняно із лініями змінного струму.....	11
1.3 Недоліки застосування ліній постійного струму порівняно із лініями змінного струму.....	13
2 ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ПОСТІЙНИМ СТРУМОМ.....	15
2.1 Схеми електричних з'єднань перетворювальних підстанцій, які працюють на електропередачі постійного струму.....	15
2.1.1 Перша група схем.....	18
2.1.2 Друга група схем.....	18
2.2 Паралельне та послідовне увімкнення випрямних вентилів.....	20
2.2.1 Паралельне увімкнення.....	20
2.2.2 Послідовне увімкнення.....	22
2.3 Відбір потужності від лінії постійного струму та вимкнення постійного струму.....	22
3 АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	25
3.1 Розробка математичної моделі лінії електропередачі постійного струму.....	25
3.2 Пошук фіктивних напруг для інтегрування хвильового рівняння..	29
3.2.1 Режим роботи на навантаження.....	29
3.2.2 Режим неробочого ходу.....	30
3.2.3 Режим короткого замикання.....	31
3.3 Розробка алгоритму роботи програмного коду.....	32

3.4 Аналіз результатів комп'ютерної симуляції.....	35
3.4.1 Режим роботи на навантаження.....	35
3.4.2 Режим неробочого ходу.....	38
3.4.3 Режим короткого замикання.....	42
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	49
4.1 Електричний опір тіла людини.....	49
4.2 Залежність опору тіла людини від стану шкіри.....	51
4.3 Модель процесу виникнення та формування виробничих небезпек при обслуговуванні обладнання на підстанції.....	52
4.4 Розробка заходів з питань безпеки у надзвичайних ситуаціях.....	55
5 ТЕРМІН ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ОКУПНІСТЬ <i>HVDC</i> -ЛІНІЙ: ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ ВІД ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ.....	57
5.1 Термін експлуатації <i>HVDC</i> -систем.....	57
5.2 Розрахунок строку окупності <i>HVDC</i> -ліній.....	57
5.3 Довгостроковий економічний ефект від зниження втрат.....	58
5.4 Резюме.....	59
ВИСНОВКИ.....	60
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	61
ДОДАТКИ.....	64
Додаток А Текст розробленого програмного коду мовою <i>Visual Fortran</i> ...	64

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний розвиток енергетичної галузі диктує нові вимоги до систем електропередачі, адже значне зростання попиту на електроенергію супроводжується необхідністю забезпечення надійності та стабільності електропостачання, особливо у великих промислових та густонаселених регіонах. Традиційні системи електропередачі на змінному струмі, попри свою ефективність на коротких та середніх відстанях, не завжди здатні відповідати вимогам сучасного енергетичного ринку, особливо з огляду на підвищені втрати енергії на великих відстанях, а також складність забезпечення стабільності в умовах високих навантажень. Саме тому у сфері електропередачі останнім часом зростає інтерес до технологій постійного струму високої напруги (*HVDC*), які дозволяють не лише мінімізувати втрати на реактивну потужність, але й забезпечують стабільну передачу енергії на великі відстані [1].

Актуальність дослідження перехідних електромагнітних процесів у довгих лініях електропередачі постійного струму обумовлена низкою чинників. Перш за все, це підвищення надійності таких систем. Довгі лінії *HVDC* піддаються суттєвим випробуванням через виникнення перехідних процесів, які можуть викликатися як зовнішніми, так і внутрішніми факторами. До зовнішніх факторів можна віднести різноманітні атмосферні впливи, наприклад, грози та різкі перепади температур, які можуть спричинити короткі замикання або інші нестабільності в мережі. Внутрішні фактори, такі як різкі зміни навантаження або аварійні ситуації, також призводять до виникнення значних перехідних процесів, які впливають на цілісність обладнання та стабільність роботи мережі.

Застосування довгих ліній передачі постійного струму також є ключовим для інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), зокрема вітрових та сонячних електростанцій, які часто розташовані на віддалених територіях. Передача енергії від ВДЕ вимагає забезпечення стабільності та надійності, оскільки такі джерела відрізняються нестабільним характером генерації, що

створює додаткові складнощі для електричної мережі. У зв'язку з цим, дослідження перехідних процесів у системах *HVDC* дозволяє краще зрозуміти, як подібні системи реагують на змінні режими роботи, розробити ефективні методи захисту та управління, що є надзвичайно важливим для сталого розвитку електроенергетики [2].

Метою кваліфікаційної роботи є розробка математичної моделі довгої лінії електропередачі постійного струму та на її основі здійснення аналізу перехідних електромагнітних процесів у лінії.

Завдання, які необхідно виконати для досягнення поставленої мети:

- обґрунтувати актуальність проведення досліджень електромагнітних перехідних процесів у довгих лініях електропередач постійного струму;
- висвітлити, у кваліфікаційній роботі, технічні аспекти передачі електричної енергії постійним струмом;
- розробити математичну модель електротехнічної системи передачі електричної енергії постійного струму, ключовим елементом якої є лінія електропередачі постійного струму;
- розробити алгоритм роботи та програмний код для реалізації побудованої математичної моделі;
- здійснити аналіз перехідних електромагнітних процесів у лінії електропередачі постійного струму;
- здійснити економічне обґрунтування передавання електричної енергії постійного струму на далекі відстані.

Об'єктом кваліфікаційної роботи є перехідні електромагнітні процеси у довгій лінії електропередачі постійного струму.

Методи дослідження: методи побудови математичних моделей; числові методи інтегрування звичайних диференціальних рівнянь; методи розв'язання диференціальних рівнянь з частинними похідними; методи алгоритмізації та створення програмних кодів.

1 ПЕРЕДАЧА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ПОСТІЙНИМ СТРУМОМ

Перехідні електромагнітні процеси у довгих лініях *HVDC* потребують детального аналізу з огляду на те, що вони можуть викликати суттєві перенапруги та струми, що загрожує пошкодженням обладнання і може мати значні економічні наслідки. Відмова окремих компонентів або навіть всієї лінії може призвести до збоїв у постачанні електроенергії, що впливає на роботу критичної інфраструктури і створює ризик для великих промислових підприємств та побутових споживачів. Тому розробка надійних математичних моделей і методів аналізу перехідних процесів є критично важливими для ефективного проектування та експлуатації систем *HVDC* [3].

Дослідження перехідних електромагнітних процесів у довгих лініях передачі постійного струму є не лише науково-технічною задачею, але й має велике практичне значення для всієї електроенергетичної галузі. Це дає змогу підвищити надійність та ефективність роботи електричних мереж, зменшити ризики аварійних ситуацій, знизити витрати на ремонт та обслуговування обладнання, а також забезпечити безперебійне постачання електроенергії споживачам. Результати досліджень у цій сфері мають потенціал для подальшого вдосконалення методів проектування і моніторингу електричних мереж, що є важливим для успішного функціонування енергетичної інфраструктури у світі.

1.1 Застосування ліній електропередач постійного струму у світі

Лінії електропередачі постійного струму високої напруги (*HVDC*) відіграють ключову роль у сучасних енергетичних системах, забезпечуючи ефективну передачу електроенергії на великі відстані та з'єднуючи різні енергосистеми. Нижче наведено перелік деяких діючих *HVDC*-ліній у світі [4]:

➤ лінія «Інга – Шаба» (Inga-Shaba): Демократична Республіка Конго; довжина – 1700 км; напруга – ± 500 кВ; введена в експлуатацію у 1982 році;

- лінія «Ріо – Мадейра» (Rio Madeira): Бразилія; довжина – 2375 км; напруга – ± 600 кВ; введена в експлуатацію у 2013 році;
- лінія «Уест – Сахара» (West Sahara): Марокко; довжина – 1500 км; напруга – ± 500 кВ; введена в експлуатацію у 2016 році;
- лінія «Північний Схід – Китай» (Northeast China): Китай; довжина – 1400 км; напруга – ± 800 кВ; введена в експлуатацію у 2010 році;
- лінія «Південний Захід – Китай» (Southwest China): Китай; довжина – 2090 км; напруга – ± 800 кВ; введена в експлуатацію у 2012 році;
- лінія «Іллінойс – Індіана» (Illinois Indiana): США; довжина – 1300 км; напруга – ± 600 кВ; введена в експлуатацію у 2015 році;
- лінія «Східний Захід – Індія» (East-West India): Індія; довжина – 1500 км; напруга – ± 800 кВ; введена в експлуатацію у 2016 році;
- лінія «Північний Захід – Індія» (Northwest India): Індія; довжина – 1700 км; напруга – ± 800 кВ; введена в експлуатацію у 2018 році;
- лінія «Північний Захід – Бразилія» (Northwest Brazil): Бразилія; довжина – 2500 км; напруга – ± 800 кВ; введена в експлуатацію у 2019 році;
- лінія «Південний Захід – Бразилія» (Southwest Brazil): Бразилія; довжина – 2200 км; напруга – ± 800 кВ; введена в експлуатацію у 2020 році.

Цей перелік не є вичерпним, оскільки технології HVDC постійно розвиваються, і нові проекти реалізуються в різних країнах світу.

Також варто відзначити лінію електропередачі постійного струму «Волгоград – Донбас», яка була збудована у середині 1960-х років, щоб забезпечити передачу електроенергії від Волзької ГЕС до Донбасу. Лінія пропрацювала пів століття. Протяжність лінії становила приблизно 475 км, а напруга досягала ± 400 кВ, що дозволяло передавати до 750 МВт. На момент запуску вона вважалася однією з найпотужніших подібних ліній у світі.

З часом технічний стан лінії погіршився через зношування, і в 2014 році її експлуатація була призупинена, зокрема через зниження напруги до 400 кВ. У 2015 році було прийнято рішення про повне виведення лінії з експлуатації та демонтаж, а обладнання на Волзькій ГЕС було демонтовано.

Таким чином, лінія «Волгоград – Донбас» свого часу відіграла важливу роль в енергетичному забезпеченні, проте через технічні труднощі та зношення була закрита та демонтована.

Наразі в Україні немає масштабних проектів ліній електропередач постійного струму високої напруги. Однак, з огляду на світові тенденції та переваги *HVDC*-технологій, такі як зменшення втрат при передачі на великі відстані та можливість з'єднання різних енергосистем, впровадження подібних проектів може стати актуальним у майбутньому.

1.2 Переваги застосування ліній постійного струму порівняно із лініями змінного струму

До основних переваг передавання електричної енергії постійним струмом порівняно зі змінним належать такі [5]:

- здешевлення та спрощення лінії за рахунок меншої кількості проводів та арматури;
- покращання роботи ізоляції, особливо кабельної, та можливість підвищення напруги до 1500 кВ між полюсами шляхом каскадного увімкнення перетворювальних мостів;
- зниження рівня ізоляції лінії постійного струму до значення $1,7 U_{II}$ (напруга полюса відносно землі) порівняно з $\approx 2U_{\phi}$ на змінному струмі, що досягається завдяки швидкодіючому сітковому регулюванню та захисту перетворювачів;
- велика надійність передачі, що пояснюється можливістю використання двох незалежних напівконтурів;
- залежність межі передаваної потужності лише від економічних міркувань, але не від стійкості, оскільки стійкість передачі визначається в основному інвертором та не залежить від її довжини;
- реалізація несинхронного зв'язку між передавальною та приймальною системами або зв'язку між системами різної частоти;

- можливість використання землі у якості зворотнього проводу;
- здешевлення кабелів для подолання великих водних просторів;
- відносно велика простота здійснення реверсу потоку енергії;
- можливість роботи від ГЕС при змінній швидкості обертання генераторів, що дає економічніше використання турбін за умов водотоку;
- можливість несинхронної роботи генераторів електростанцій за блочною схемою «генератор – трансформатор – міст» без комутаційної апаратури. У якості вимикачів можуть бути самі вентиля;
- відсутність впливу електропередач на потужність короткого замикання приймальної енергосистеми, оскільки найчастіші аварії в інверторі не викликають збільшення струмів короткого замикання приймальної системи, а інвертор у свою чергу не підживлює точку короткого замикання;
- можливість здійснення швидкодіючого програмного управління потужністю, яка передається, що підвищує стійкість суміжних передач змінного струму;
- зменшення втрат на корону;
- застосування ступінчастої ізоляції основного обладнання підстанцій відносно землі, що дає змогу знизити вартість обладнання, встановленого ближче до землі. На змінному струмі все обладнання має однакову ізоляцію відносно землі даного класу ізоляції.

1.3 Недоліки застосування ліній постійного струму порівняно із лініями змінного струму

До основних недоліків передавання електричної енергії постійним струмом порівняно зі змінним належать такі [6]:

- складність улаштування підстанцій, які складаються із великої кількості вентилів та іншої апаратури;

- недостатня надійність роботи вентилів - бувають пропуски запалення та зворотні запалення; останні є важкою аварією як для самих вентилів, так і для силових трансформаторів;
- труднощі із рівномірним розподілом напруги за окремими елементами обладнання через наявність багатьох послідовних елементів;
- подорожчання собівартість передавання енергії, внаслідок споживання значної реактивної потужності інверторною підстанцією – близько 0,5 – 0,6 кВАр на 1 кВт передаваної активної потужності;
- спотворення форми кривої напруги та струму приймальної та передаючої мережі через вищі гармоніки, які генерують перетворювальні установки при роботі передачі;
- нестійкість інвертора при пониженнях напруги у приймальній мережі, особливо при несиметричних пониженнях;
- проблеми відбору потужності, оскільки вимикач постійного струму – дуже громіздкий та складний пристрій;
- ускладнення передачі у зв'язку із великою кількістю громіздких демпфуючих та ділильних RC -контурів на підстанціях;
- збільшена кількість реакторів та трансформаторів на перетворювальних підстанціях: анодні реактори для придушення високочастотних коливань та захисту від радіоперешкод, лінійні реактори для згладжування пульсацій напруги та струму у лінії передачі, індивідуальні та групові трансформатори для живлення власних потреб та передачі імпульсів керування на потенціал вентиля;
- більший вплив пилу, який осідає під впливом постійної напруги на ізоляторах повітряних ліній та апаратів;
- підвищена небезпека виникнення на ізоляторах часткових дуг, які в умовах тривалої експлуатації можуть призвести до зниження розрядної напруги зовнішньої ізоляції;

- погіршення роботи лінійної ізоляції, особливо за поганої погоди, через збільшення струмів витоку та нерівномірного розподілу постійної напруги елементами підвісних або опорних ізоляторів;

- проблеми розробки механізмів захисту від внутрішніх перенапруг у зв'язку з тим, що розрядники постійного струму неспроможні погасити дугу.

Резюмуючи наведені техніко-економічні показники розглянутих електропередач показують, що кожна електропередача має переваги та недоліки. Відповідно до цього, при проектуванні енергосистем, виборі типу передачі, розробці нового електрообладнання слід враховувати особливості кожної електропередачі та об'єктивно встановлювати кращу область її застосування.

Перехідні електромагнітні процеси в довгих лініях постійного струму потребують детального вивчення, адже можуть викликати перенапруги та небезпечні струми, що загрожує пошкодженням обладнання і порушенням постачання електроенергії для критичної інфраструктури та промисловості. Це вимагає розробки надійних математичних моделей і методів для аналізу перехідних процесів, які сприятимуть ефективному проектуванню та експлуатації систем [7].

У світі технології передачі електроенергії постійним струмом високої напруги вже впроваджені у багатьох країнах і з'єднують різні енергосистеми. Приклади таких ліній – «Інга – Шаба» (ДПК), «Ріо – Мадейра» (Бразилія), «Північний Захід – Індія» (Індія) та інші. В Україні проекти такого масштабу поки відсутні, але *HVDC*-технології можуть стати актуальними через їх переваги, зокрема зменшення втрат на великих відстанях і можливість об'єднання різних енергосистем.

Переваги *DC*-технологій над *AC* (змінним струмом) включають зниження витрат на лінії завдяки меншій кількості арматури, підвищену надійність та можливість несинхронного з'єднання енергосистем. До недоліків відносяться складність обладнання перетворювальних підстанцій, обмежену надійність вентилів, а також труднощі з фільтрацією гармонік та підтриманням стабільності в приймальній мережі [8].

2 ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ПОСТІЙНИМ СТРУМОМ

2.1 Схеми електричних з'єднань перетворювальних підстанцій, які працюють на електропередачі постійного струму

Під час вибору схем зазвичай проводиться порівняння низки варіантів. При порівнянні схем приймаються такі припущення [9]:

- у схемі є лише одноанодні вентиля;
- схема живиться від мережі нескінченно великої потужності;
- ЕРС живильної мережі симетричні та синусоїдальні;
- випрямлений струм ідеально згладжений, що забезпечується включенням згладжуючого реактора, індуктивність якого безперечно велика;
- передбачається, що втратами неробочого ходу, втратами короткого замикання, струмом неробочого ходу та реактансом розсіювання живильного трансформатора можна знехтувати;
- вентиля вважаються ідеальними (нехтують потенціалом запалювання та падінням напруги в дузі вентиля).

Майже усі ці припущення використовуються зазвичай для розрахунку режимів роботи схем перетворювальних установок передачі постійного струму [10].

Передача енергії постійним струмом призначена для постачання великих споживачів, тому схема перетворювальної установки повинна давати досить високу надійність роботи, бути порівняно простою та зручною в експлуатації, забезпечувати найменшу імовірність аварій із вентилями, давати найвищий ККД роботи усієї установки при заданих питомих втратах у вентилях та трансформаторах, мати найменшу кількість вентилів, мати найлегший режим роботи вентилів. Дуже бажано забезпечити досить малу величину амплітуди зворотної напруги та можливо менший стрибок зворотної напруги, а також порівняно малу амплітуду анодного струму кожного вентиля при зада-

них середніх значеннях випрямленого струму та напруги. Швидкість спаду анодного струму перед запалюванням вентиля має бути якомога меншою.

Робота силового трансформатора на випрямляючу установку відрізняється від роботи на трифазне лінійне навантаження тим, що споживаний випрямлячем струм несинусоїдальний навіть у тому випадку, коли напруга мережі змінного струму синусоїдальна, а також тим, що через його обмотки, які живлять випрямляч, струм проходить лише протягом деякої частини періоду, яка залежить від тривалості роботи кожного вентиля [11].

Схема перетворювальної установки повинна забезпечувати відсутність потоку вимушеного намагнічування трансформатора, маючи якомога меншу амплітуду струму зворотного запалювання. Також, схема повинна забезпечувати найменшу хвилястість випрямленої напруги, маючи при цьому форму кривої струму, яка споживається випрямлячем або віддається інвертором, близьку до синусоїди.

Схеми перетворення є різними за складністю. В елементарних дво- та трифазних схемах вентиля діють по чергово (по одному). З елементарних схем складаються складні, які поділяються на нульові та мостові.

Із кількох елементарних схем з трифазними чи двофазними трансформаторами отримують складні багатофазні схеми шляхом увімкнення елементарних схем послідовно чи паралельно із одночасним зсувом по фазі напруг трансформаторів. При каскадному увімкненні N елементарних схем одночасно досягається збільшення випрямленої напруги в N раз при тому ж випрямленому струмі. За паралельного увімкнення n елементарних схем досягається збільшення випрямленого струму в n разів при тій ж випрямленій напрузі.

Якщо між одноіменними фазними напругами трансформаторів, які живлять суміжні p -фазні схеми, забезпечений зсув фаз на кут $\Psi = 2\pi / m$, то кількість фаз m каскадної схеми, яка містить N елементарних p -фазних схем, увімкнених послідовно, або n елементарних p -фазних схем, увімкнених паралельно, виражається так: $m = Np$, або $m = np$. Такі складні каскадні схеми на-

зиваються також Np -фазними схемами. Схеми, які містять каскад мостових схем, називаються каскадно-мостовими [12].

Високовольтні випрямні схеми зазвичай мають кількість фаз m не менше трьох, оскільки здійснюється випрямлення трифазного струму. Збільшення кількості фаз випрямної установки є доцільним з погляду вимог, які ставляться до схеми. Кількість фаз перетворювальної установки зазвичай становить шість або дванадцять.

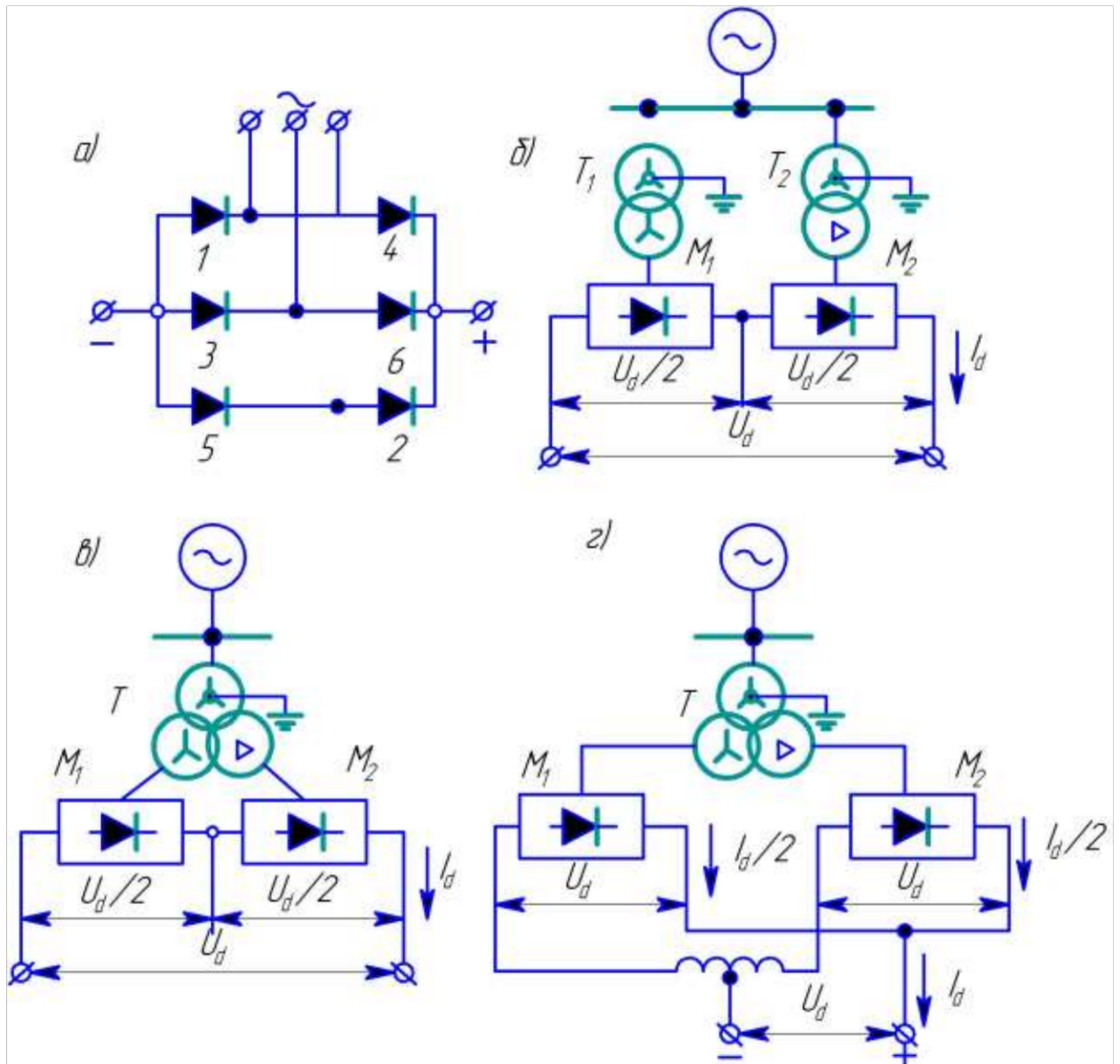


Рисунок 2.1 – Схеми передавання постійного струму [13]

Нині для передавання постійного струму застосовують трифазну мостову схему представлену на рисунку 2.1, а. Вона має просту конструкцію трансформатора, який відрізняється від трансформатора у схемі, який слугує

для передавання змінного струму, тільки тим, що вимагає ізоляції нейтралі вентиляльної обмотки на половину випрямленої напруги між полюсами схеми.

Для малопотужних передач енергії постійним струмом можна застосовувати 6-фазні схеми перетворення. Для потужних передач постійного струму використовуються 12-фазні схеми перетворення, складені з комбінацій 6-фазних схем. Загалом може використовуватися дві групи схем.

2.1.1 Перша група схем. Кількість фаз трансформатора дорівнює трьом, а збільшення кількості фаз випрямлення до 12 досягається комбінацією трифазних мостових схем, увімкнених каскадно зі зсувом напруг вентиляльних обмоток трансформаторів на 30° . Ці схеми, називаються 12-фазними каскадно-мостовими, їх представлено на рисунку 2.1, *б-г* (де M_1 та M_2 – трифазні мостові схеми): *б* – каскадне увімкнення мостів M_1 та M_2 , які живляться від двох двообмоткових трансформаторів T_1 та T_2 ; *в* – каскадне увімкнення мостів, які живляться від одного триобмоткового трансформатора T ; *г* – паралельне увімкнення мостів через зрівнювальний реактор [14].

2.1.2 Друга група схем. До цієї групи відносяться схеми каскадно-з'єднаних 6-кутників, схема 12-кутника із двома групами трансформаторів. У цих схемах збільшення кількості фаз досягається спеціальним з'єднанням обмоток трансформаторів.

Порівняння обох груп 12-фазних схем, виходячи із поставлених вимог, показує, що схема двох 6-кутників та схема 12-кутника вимагають конструктивного ускладнення трансформатора та дають погіршення енергетичних характеристик порівняно із 12-фазною каскадно-мостовою схемою.

Для передавання постійного струму може бути рекомендована лише 12-фазна каскадно-мостова схема з послідовним або паралельним з'єднанням вентилів у середині одного мосту. Ця схема складається із двох трифазних мостових схем M_1 та M_2 (рисунк 2.1, *б*), з'єднаних послідовно, кожна із яких містить 6 вентилів. Напруга на виводах схеми U_d дорівнює сумі напруг кож-

ного моста. Для живлення кожного мосту необхідний один трифазний трансформатор або група однофазних трансформаторів. Для роботи схеми у 12-фазному режимі необхідно, щоб трансформатори T_1 та T_2 живилися від загальних шин системи та мали з'єднання схемних обмоток Y чи Δ (рисунок 2.1). Схема з'єднання обмотки залежить від напруги мережі. Можливе також живлення обох мостів від різних обмоток триобмоткового трансформатора (рисунок 2.1, в). Виводи вентильних обмоток трансформатора мають бути ізольовані один відносно одного на повну напругу вентильної обмотки, відносно землі та мережевої обмотки на повну напругу відповідного моста, яку він має відносно землі [15].

2.2 Паралельне та послідовне увімкнення випрямних вентилів

За необхідності зменшення струму, який протікає через кожен міст вдвічі, при такому ж випрямленому струмі I_d обидва мости вмикаються паралельно через зрівнювальний реактор L (рисунок 2.1, з). Найчастіше застосовується паралельне увімкнення вентилів в середині кожного моста.

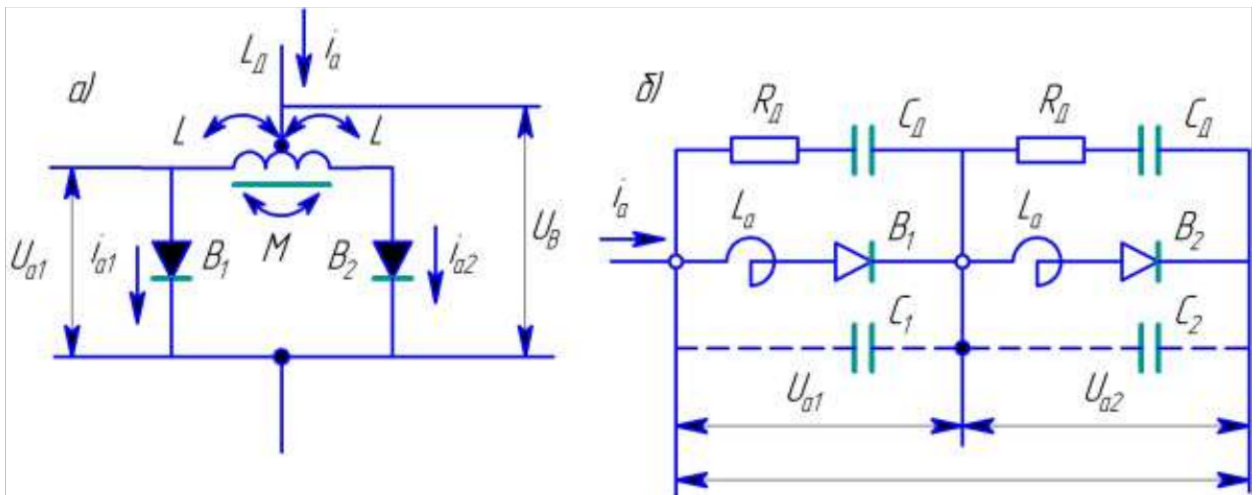


Рисунок 2.2 – Увімкнення вентилів [16]

Увімкнення вентилів у плече моста може бути паралельним (рисунок 2.2, а) або послідовним (рисунок 2.2, б). На рисунку прийнято такі позначення: B_1, B_2 – вентиля; L_d – анодний дільник струму; L_a – анодний реактор, C_1, C_2 – власні ємності вентилів B_1 та B_2 ; C_d – ділительний контур.

2.2.1 Паралельне увімкнення. Якщо величина робочого струму вентилів недостатня, можна подвоїти випрямлений струм при тому ж анодному струмі вентиля, включаючи два вентиля паралельно у кожне плече трифазної схеми. Паралельне увімкнення ртутних вентилів без дільника струму є неприпустимим, оскільки напруга запалювання вентиля значно більша за напругу горіння дуги ΔU_{∂} . За такого увімкнення відмикається той вентиль, напруга запалювання якого є меншою, і відразу ж він шунтує другий паралельно увімкнений вентиль, який відмовитися не зможе. Розподіл та вирівнювання струму паралельно увімкненого вентиля забезпечується увімкненням через анодний дільник струму L_D (рисунок 2.2, а). Анодний дільник струму є однофазним двообмотковим стрижневим сухим трансформатором із зустрічними обмотками, які забезпечують мінімальний реактанс розсіювання при протіканні анодних струмів i_{a1} та i_{a2} по обох обмотках та має коефіцієнт зв'язку

$$K = \frac{M}{L} \approx 1, \quad (2.1)$$

де M – коефіцієнт взаємодукції між обмотками реактора; L – власна індуктивність розсіювання кожної обмотки реактора.

Принцип роботи роздільного реактора можна пояснити так. Нехай $U_{31} < U_{32}$. Тоді при переході анодної напруги через нуль від від'ємних до додатніх значень першим відімкнеться вентиль B_1 , після чого на ньому встановиться напруга $U_{a1} = U_{\partial 1}$. Однак це не дає значного зниження напруги U_{ϵ} , оскільки за відсутності розмагнічу вального струму i_{a2} , струм i_{a1} намагнічування анодного дільника та падіння напруги на ньому буде великим. Для інтервалу часу після відкриття вентиля B_1 та перед відкриттям вентиля B_2 можна записати рівняння [17]:

$$u_{\epsilon} = u_{a1} + L \frac{di_{a1}}{dt}. \quad (2.2)$$

Якщо $U_{31} < U_{32}$, але $L \frac{di_{a1}}{dt} > U_{32} - \Delta U_{\partial 1}$, то вентиль B_2 також відкривається за вентиляем B_1 , як тільки U_{ϵ} зрівняється з U_{32} .

Для інтервалу часу після відкриття вентиля B_2 останнє рівняння запишеться так:

$$u_6 = u_{a1} + L \frac{di_{a1}}{dt} - M \frac{di_{a2}}{dt}, \quad (2.3)$$

де другий та третій члени мають протилежні знаки через зустрічне намотування обмоток реактора. Враховуючи умову $M/L \approx 1$ та вважаючи, що $\frac{di_{a1}}{dt} \approx \frac{di_{a2}}{dt}$ із останнього рівняння отримуємо:

$$u_6 \approx u_{a1}, \quad (2.4)$$

тобто при нормальному режимі реактор вимикається із головного контура та створює індуктивне падіння напруги при комутації вентилів. Зрівняльний реактор (анодний дільник струму) вирівнює струми по вентилях так, що при їх роботі існує рівність [18]

$$i_{a1} = i_{a2} = i_a / 2, \quad (2.5)$$

Таку ж роль відіграють зрівнювальні реактори при паралельному увімкненні мостів.

Тиристри можна вмикати паралельно без дільників струму. При закритому тиристорі потенціали керуючого електрода та анода ніяк не пов'язані між собою, якщо анодна напруга не перевищує пробивну. При відмиканні тиристора пряме падіння напруги на ньому не перевищує 1 В і тиристор проводить струм, якщо анодний струм перевищує утримуючий струм. При паралельному увімкненні, струм через кожен тиристор буде обернено пропорційний його прямому падінню напруги. Тому, якщо прямі вольт-амперні характеристики тиристорів різні, тиристор із меншим падінням напруги візьме на себе більший струм і перегріватиметься. При цьому струм усієї групи доведеться зменшити.

Для забезпечення рівномірного розподілу струму по тиристорах, увімкнених паралельно, їх спеціально підбирають за прямими характеристиками. Якщо такий підбір здійснити не вдається, то застосовують індуктивні анодні дільники струму аналогічно ртутним вентилям. Такі ж дільники стру-

му використовують і при увімкненні тиристорних блоків паралельно, оскільки підібрати однакові падіння напруги у двох тиристорних блоках важко.

В анодні контури вентилів вмикаються так звані анодні реактори L_a , які мають більшу індуктивність ніж анодний дільник струму. Призначення анодних реакторів – замикання коливання звукової частоти, які виникають при комутації вентилів та викликають радіоперешкоди, а також покращення умови запалювання вентилів.

2.2.2 Послідовне увімкнення. При послідовному увімкненні вентилів B_1 та B_2 через них проходить той самий струм, але після замикання вентилів зворотна напруга розподіляється за ними нерівномірно. Ємність катода C_2 вентиля B_1 відносно землі значно більша, ніж власна ємність C_1 вентиля, оскільки до катода кожного вентиля підключено трансформатор власних потреб. Відтак, за відсутності ділительних контурів більша частина зворотної напруги U_a ляже на вентиль B_1 .

Для вирівнювання розподілу напруги по вентилях при послідовному увімкненні, кожен вентиль разом із анодним реактором шунтується контуром $R_D C_D$ (рисунок 2.2, б), який вирівнює розподіл зворотної напруги по вентилях, якщо ємність цього контура обрано з умови [19]:

$$C_D > C_2 \geq C_1. \quad (2.6)$$

Активні опори контура вибираються за умовою обмеження струму розряду ємностей C на індуктивність L_a та на вентиль при його відкриванні. Ділительні контури вирівнюють розподіл зворотної напруги по вентилях:

$$u_{a1} = u_{a2} = U_a / 2. \quad (2.7)$$

При послідовному увімкненні тиристорів для уникнення перенапруг у тиристорному блоці, також застосовують шунтування їх RC -контурами, що особливо важливо при увімкненні.

Послідовне увімкнення низки мостів у загальну схему підстанції дійсно дає змогу підвищити напругу полюса відносно землі у стільки разів, скільки

мостів увімкнено між полюсом та землею. Послідовно увімкнені мости також шунтуються RC -контурами для рівномірного розподілу напруги по мостах при згасанні усіх вентилів. Крім того, кожен міст замикається шунтуючим вентиляем та апаратом, щоякий дає змогу закоротити короткочасно або довгостроково той міст, у якому стався аварійний вихід із ладу вентилів. При збільшенні кількості послідовно увімкнених мостів між полюсом та землею до двох-чотирьох, аварійні процеси у кожному мості локалізуються та мало впливають на роботу усієї передачі.

З необхідності збільшення струму плеча та одночасного підвищення надійності роботи моста, у кожне плече вмикають два або більше вентилі послідовно та два або більше таких контури паралельно. Таке увімкнення називається груповим вентиляем.

2.3 Відбір потужності від лінії постійного струму та вимкнення постійного струму

Відбираючи потужність від лінії електропередачі постійного струму на проміжних підстанціях (аналогічно, як і при змінному струмі), бажано мати вимикачі постійного струму високої напруги. Створення таких вимикачів є проблемним, оскільки постійний струм не проходить через нуль. Доводиться створювати спеціальні пристрої, які переводять постійний струм у коливальний та переривають його у момент переходу через нуль [20].

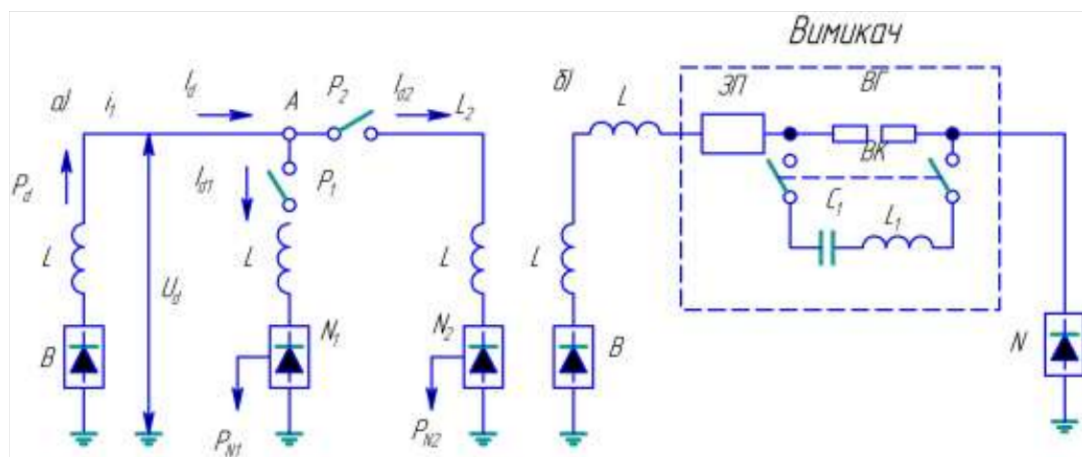


Рисунок 2.3 – Відбір потужності та відмикання постійного струму

Для відмикання постійного струму високої напруги запропоновано дві схеми, які представлено на рисунку 2.3, де B - випрямляч, L – лінійний реактор, I_1, I_2 – інвертори, P_1, P_2 – автоматичні роз'єднувачі, A – точка відгалуження, U_d – напруга на початку лінії, $P_d = U_d I_d$ – потужність на виході випрямляча, $P_{I1}, P_{I2}, I_{d1}, I_{d2}$ – потужності та струми інверторів 1 та 2, l_1, l_2 – довжини ділянок лінії, L_1, C_1 – індуктивність та ємність коливального контура, $BГ$ – контакти головного вимикача змінного струму, $BК$ – контакти допоміжного вимикача [21].

У першій схемі (рисунок 2.3, а) у кожній лінії l постійного струму зазвичай увімкнені роз'єднувачі P_1 та P_2 із автоматичним керуванням. При пошкодженні на одній лінії постійного струму захист замикає сітки випрямляча, всі споживачі знеструмлюються, при цьому відмикається відповідний роз'єднувач. Вмикається лінія також при замкнених сітках випрямляча.

Така система є недостатньо зручна в експлуатації, оскільки при короткому замиканні у будь-якій лінії потрібно на час розмикання роз'єднувача знеструмити обидві лінії. Окрім цього, при нормальній роботі сіткового керування випрямляча роз'єднувачі повинні розривати ємнісний струм розряду лінії через місце короткого замикання, а при відмові сіткового керування випрямляча роз'єднувачі можуть вийти із ладу, оскільки вони відмикатимуть силовий контур.

У схемі, яку використовує вимикач змінного струму (рисунок 2.3, б), головні контакти $BГ$ якого увімкнені у лінію постійного струму, дуга, яка виникає у момент розмикання цих контактів, шунтується паралельно підключеним до них коливальним контуром $L_1 C_1$. Накладання коливального розряду переводить струм дуги через нуль та забезпечує її згасання. Схема дає змогу відключати постійний струм стандартним вимикачем змінного струму. Частота коливань вибирається в діапазоні 500 – 1000 Гц.

3 АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

3.1 Розробка математичної моделі лінії електропередачі постійного струму

На рисунку 3.1 представлено принципову схему фрагмента електричної мережі, який складається із еквівалентованої електроенергетичної системи, яка представлена фазними електрорушійними силами, індуктивностями та активними опорами, випрямляча постійного струму за схемою Ларіонова, який здійснює випрямлення змінного трифазного струму у постійний, довгої лінії електропередачі постійного струму, яка працює на еквівалентне навантаження.

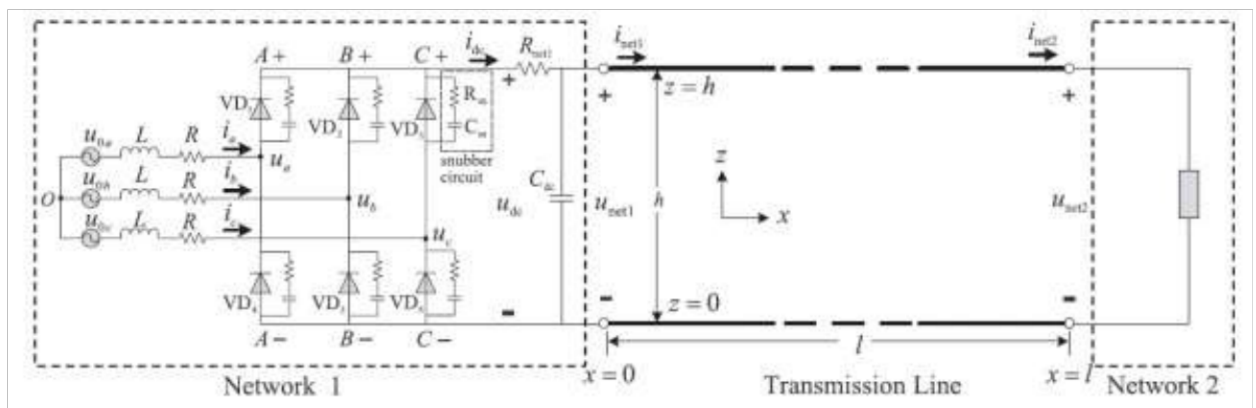


Рисунок 3.1 – Принципова схема фрагмента електричної мережі [22]

Аналізуючи фрагмент мережі (рис. 3.1), цілком очевидно, що найскладнішими об'єктами з точки зору математичного моделювання є трифазний випрямляч постійного струму та довга лінія електропередачі постійного струму. Для спрощення математичної моделі, ми приймаємо, що лінія електропередачі живиться від джерела нескінченної напруги, тобто напруга на початку лінії задана. Відтак, розрахункова схема заміщення досліджуваної довгої лінії електропередачі з розподіленими параметрами представлено на рисунку 3.2.

З курсу теоретичних основ електротехніки відомо, що довгі лінії електропередач потрібно розглядати як системи із розподіленими параметрами. Це означає, що такі лінії не можна описати простою моделлю на основі зосереджених параметрів, де індуктивність, ємність та опір сконцентровані у ви-

гляді окремих елементів. Натомість, ці параметри розподілені уздовж усього провідника, що призводить до значних відмінностей у поведінці електромагнітних хвиль та енергії, особливо при передачі високочастотних сигналів або на значні відстані.

Для адекватного опису процесів у довгих лініях використовують диференціальні рівняння з частинними похідними, відомі як хвильові або телеграфні рівняння. Вони описують зміну напруги та струму вздовж лінії, враховуючи вплив усіх розподілених параметрів: опору R , індуктивності L , ємності C та провідності G . Ці рівняння дають змогу врахувати хвильові процеси, які виникають у лінії, включно з ефектами відбиття, затухання та дисперсії сигналів. Зокрема, хвильові рівняння розв'язуються для вивчення передачі енергії у змінних режимах, коли частота змінного струму зростає або в умовах надвисокої напруги, де навіть незначні параметри стають критичними.

Окрім цього, хвильовий характер процесів у довгих лініях вимагає врахування ефекту затухання, коли частина енергії втрачається через опір, а також ефекту відбиття, коли хвиля, досягнувши кінця лінії, частково повертається назад. Це особливо важливо для ліній зв'язку, де неправильний підбір параметрів може призвести до значних втрат сигналу або його спотворень, що потребує налаштування та узгодження кінцевих опорів. У випадку висковольтних ліній електропередач, де передається потужна енергія, точний розрахунок хвильових параметрів забезпечує стабільність та безпеку системи, зменшуючи втрати енергії та захищаючи обладнання від перенапруг.

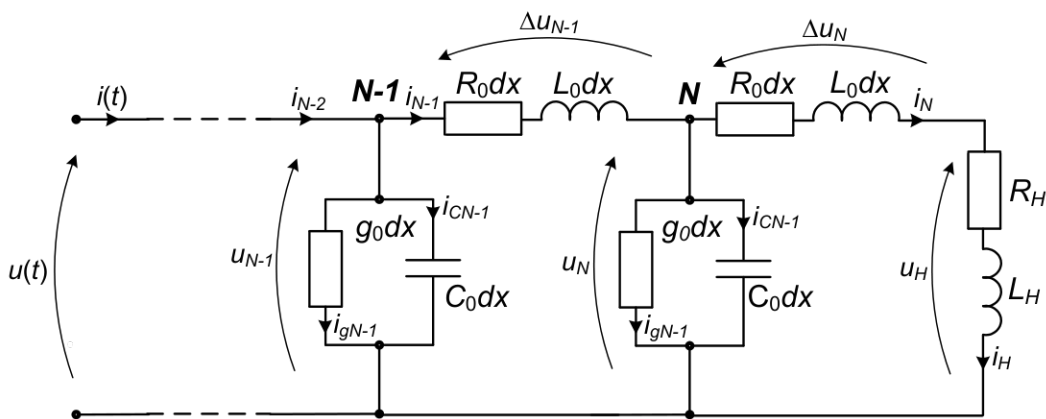


Рисунок 3.2 – Розрахункова схема заміщення довгої лінії електропередачі

постійного струму з розподіленими параметрами

З курсу теоретичних основ електротехніки є відомими два рівняння довгої лінії з частинними похідними [23]:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t}; \quad (3.1)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = g_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t}. \quad (3.2)$$

Фізична суть, яка закладена у ці рівняння є цілком зрозумілою, адже напруга, яка прикладена до початку елементарної ділянки лінії dx зрівноважується спадами напруг на активному опорі $R_0 dx$ та $L_0 dx \frac{di}{dt}$, в результаті чого в кінці елементарної ділянки лінії напруга зміниться. Аналогічно і з рівнянням (3.2), струм на початку елементарної ділянки лінії dx буде відрізнятися від струму в кінці цієї ділянки на величину струмів витоку через недосконалість ізоляції $g_0 u$ та струмів зміщення через наявність у лінії значних ємнісних властивостей $C_0 dx \frac{du}{dt}$. Однак здійснювати розв'язок цих двох рівнянь є недоцільним, адже в алгоритмі будуть фігурувати дві величини, тому ми зведемо цих два рівняння до відомого хвильового рівняння. Продиференціювавши рівняння (3.1) по x , одержимо [24]:

$$-\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = r_0 \frac{\partial i}{\partial x} + L_0 \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial i}{\partial t}. \quad (3.3)$$

Після підстановки у рівняння (3.3) рівняння (3.2), отримаємо:

$$-\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + (L_0 g_0 + r_0 C_0) \frac{\partial u}{\partial t} + r_0 g_0 u. \quad (3.4)$$

Рівняння (3.4) називається хвильовим або телеграфним. Власне наша математична модель і буде ґрунтуватися на цьому рівнянні.

Існує не велика кількість способів для його розв'язування. Ми ж використаємо один із найоптимальніших та найдієвіших з точки зору практики.

Запишемо рівняння (3.4) у такому вигляді:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = (C_0 L_0)^{-1} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - (g_0 L_0 + C_0 R_0) v - g_0 R_0 u \right), \quad \frac{\partial u}{\partial t} = v. \quad (3.5)$$

Проблемою розв'язку рівняння (3.5) є необхідність наявності крайових умов, тобто значень напруг, струмів чи зарядів на початку та кінці лінії електропередачі. Ми пропонуємо використати методику [25], яка дає змогу для розв'язування хвильового рівняння довгої лінії електропередачі використовувати крайові умов другого роду. Ми пропонуємо у якості крайової умови використати рівняння (3.1).

Дискредитуючи рівняння (3.5) та (3.1) за методом прямих, отримаємо:

$$\frac{dv_j}{dt} = (C_0 L_0)^{-1} \left(\frac{u_{j-1} - 2u_j + u_{j+1}}{(\Delta x)^2} - (g_0 L_0 + C_0 R_0) v_j - g_0 R_0 u_j \right),$$

$$u_1 = u(x, t)|_{x=0}, \quad u_N = u(x, t)|_{x=l}; \quad (3.6)$$

$$-\frac{u_{j+1} - u_{j-1}}{2\Delta x} = R_0 i_j + L_0 \frac{di_j}{dt}; \quad (3.7)$$

$$\frac{du_j}{dt} = v_j, \quad j = 2, \dots, N. \quad (3.8)$$

Проаналізувавши рівняння (3.6) – (3.7) легко бачити, що для знаходження значень напруг та струмів у першій ($j = 1$) та останній ($j = N$) дискретних ділянках лінії нам потрібно мати напруги у віртуальних фіктивних вузлах лінії, яких фізично не існує.

У нашому конкретному випадку, напруга на початку лінії є відомою, тому розрахунок ми будемо здійснювати починаючи від другого вузла (див. формулу (3.8)). Натомість у кінці лінії напруги нам не відомі, до того ж, лінія може працювати у таких режимах як: режим неробочого ходу, режим короткого замикання та звичайно режим роботи на навантаження. Запишемо рівняння для останнього дискретного вузла:

$$\frac{dv_N}{dt} = (C_0 L_0)^{-1} \left(\frac{u_{N-1} - 2u_N + u_{N+1}}{(\Delta x)^2} - (g_0 L_0 + C_0 R_0) v_N - g_0 R_0 u_N \right); \quad (3.9)$$

$$-\frac{u_{N+1} - u_{N-1}}{2\Delta x} = R_0 i_N + L_0 \frac{di_N}{dt}, \quad \frac{du_N}{dt} = v_N, \quad (3.10)$$

Бачимо, для розв'язку цих рівнянь нам потрібно мати фіктивну напругу в кінці лінії u_{N+1} . Представимо пошук фіктивних напруг для згаданих режимів.

3.2 Пошук фіктивних напруг для інтегрування хвильового рівняння

3.2.1 Режим роботи на навантаження. Для схеми представленої на рисунку 3.2 запишемо рівняння за другим законом Кірхгофа [26]:

$$L_H \frac{di_H}{dt} = u_H - R_H i_H. \quad (3.9)$$

Аналогічно, для схеми представленої на рисунку 3.2 запишемо рівняння стаціонарних зв'язків на основі законів Кірхгофа:

$$\frac{di_N}{dt} = \frac{1}{L_H + L_0 \Delta x} [u_N - (R_0 \Delta x + R_H) i_N], \quad i_H \equiv i_N. \quad (3.10)$$

Перепишемо рівняння (3.7), яке є записаним для останнього вузла дискретизації так:

$$-\frac{u_{N+1} - u_{N-1}}{2\Delta x} = R_0 i_N + L_0 \frac{di_N}{dt} \Rightarrow \frac{di_N}{dt} = \frac{1}{L_0} \left(\frac{u_{N-1} - u_{N+1}}{2\Delta x} - R_0 i_N \right). \quad (3.11)$$

Тепер, прирівняємо між собою рівняння (3.10) та рівняння (3.11), отримаємо:

$$\frac{1}{L_H + L_0 \Delta x} [u_N - (R_0 \Delta x + R_H) i_N] = \frac{1}{L_0} \left(\frac{u_{N-1} - u_{N+1}}{2\Delta x} - R_0 i_N \right). \quad (3.12)$$

Звідки будемо мати:

$$u_{N+1} = -2\Delta x \left(R_0 i_N + \frac{L_0}{L_H + L_0 \Delta x} [u_N - (R_0 \Delta x + R_H) i_N] \right) + u_{N-1}. \quad (3.13)$$

Підставляючи рівняння (3.13) у (3.9) остаточно запишемо рівняння довгої лінії для N -вузла дискретизації:

$$\frac{dv_N}{dt} = -\frac{g_0 L_0 + C_0 R_0}{C_0 L_0} v_N + \frac{2}{C_0 L_0 (\Delta x)^2} u_{N-1} - \frac{1}{C_0} \left[\frac{2}{L_0 (\Delta x)^2} + \frac{g_0 R_0}{L_0} + \frac{2}{\Delta x (L_H + L_0 \Delta x)} \right] u_N +$$

$$+ \frac{2}{C_0} \left[\frac{R_0 \Delta x + R_H}{\Delta x (L_H + L_0 \Delta x)} - \frac{R_0}{L_0 \Delta x} \right] i_N; \quad (3.14)$$

$$\frac{du_N}{dt} = v_N. \quad (3.15)$$

Для знаходження струму в останній дискретній гілці лінії, можемо скористатися рівнянням (3.10).

3.2.2 Режим неробочого ходу. На рисунку 3.3 представлено розрахункову схему заміщення довгої лінії, яка працює у режимі неробочого ходу.

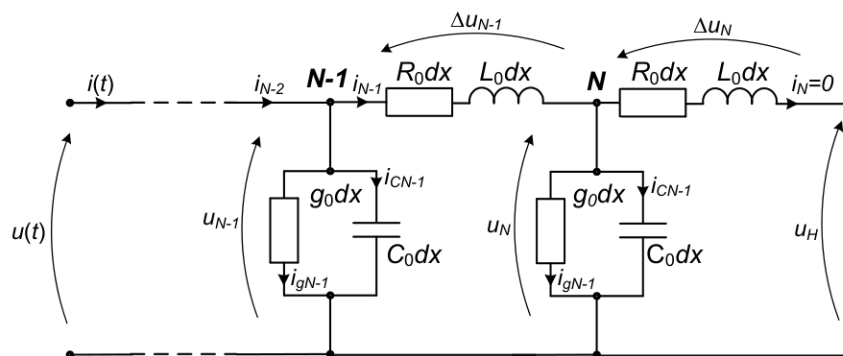


Рисунок 3.3 – Розрахункова схема заміщення довгої лінії для режиму неробочого ходу [27]

У режимі неробочого ходу струм в останній гілці лінії протікати не буде, отже він рівний буде рівний нулю. Перепишемо перше рівняння у (3.10) так:

$$-\frac{u_{N+1} - u_{N-1}}{2\Delta x} = 0. \quad (3.16)$$

Звідки легко можна отримати значення фіктивної напруги для режиму неробочого ходу:

$$u_{N+1} = u_{N-1}. \quad (3.17)$$

Підставивши вираз (3.17) у (3.9) запишемо кінцеве дискретизоване рівняння довгої лінії для останнього вузла

$$\frac{dv_N}{dt} = \frac{2}{C_0 L_0 (\Delta x)^2} u_{N-1} - \left(\frac{2}{C_0 L_0 (\Delta x)^2} + \frac{g_0 R_0}{C_0 L_0} \right) u_N - \frac{g_0 L_0 + C_0 R_0}{C_0 L_0} v_N; \quad (3.18)$$

$$\frac{du_N}{dt} = v_N. \quad (3.19)$$

Струми у всіх дискретних гіляках лінії для усіх режимів можна знайти дискретизуючи рівняння (3.1) використовуючи поняття правої похідної:

$$-\frac{u_{j+1} - u_j}{\Delta x} = R_0 i_j + L_0 \frac{di_j}{dt}. \quad (3.20)$$

З рівняння (3.20) отримуємо:

$$\frac{di_j}{dt} = \frac{1}{L_0 \Delta x} (u_j - u_{j+1}) - \frac{R_0}{L_0} i_j, \quad j = 1, \dots, N. \quad (3.21)$$

Варто відзначити, що використання рівняння (3.21) буде справедливим для усіх режимів роботи лінії.

3.2.3 Режим короткого замикання. Цей режим роботи відноситься до аварійних режимів, аналіз яких є також важливою технічною задачею. Маючи інформацію про перебіг перехідних процесів в аварійних режимах можна корегувати умови роботи споживачів; проводити вибір проводів та апаратів, здійснювати перевірку за умовами їх термічної та електродинамічної стійкості, а також здійснювати проектування та налаштування пристроїв релейного захисту і автоматики.

На рисунку 3.4 представлено розрахункову схему заміщення довгої лінії електропередачі постійного струму для режиму короткого замикання.

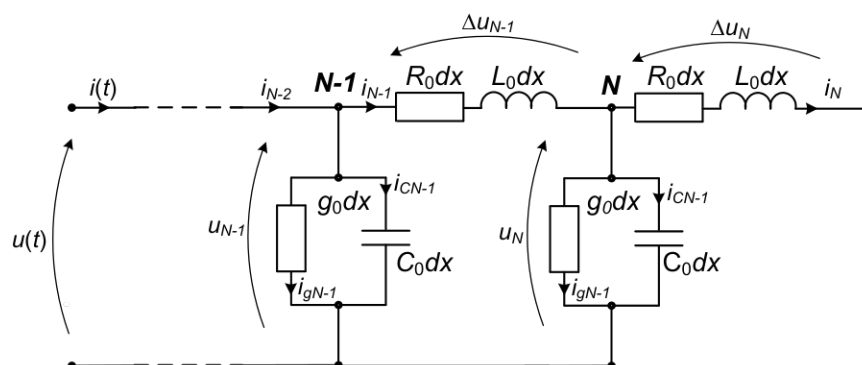


Рисунок 3.4 – Розрахункова заступна схема заміщення довгої лінії електропередачі постійного струму для режиму короткого замикання [28]

За другим законом Кірхгофа для останнього контура лінії запишемо рівняння:

$$\frac{di_N}{dt} = \frac{1}{L_0 \Delta x} (u_N - R_0 \Delta x i_N). \quad (3.22)$$

Аналогічно, як у режимі роботи на навантаження, прирівнюючи між собою рівняння (3.22) та (3.11), отримаємо:

$$\frac{1}{L_0 \Delta x} (u_N - R_0 \Delta x i_N) = \frac{1}{L_0} \left(\frac{u_{N-1} - u_{N+1}}{2 \Delta x} - R_0 i_N \right). \quad (3.23)$$

Звідки можемо отримати вираз для знаходження фіктивної напруги:

$$u_{N+1} = -2 \Delta x \left[R_0 i_N + \frac{1}{\Delta x} (u_N - R_0 \Delta x i_N) \right] + u_{N-1}. \quad (3.24)$$

Підставивши вираз (3.24) у (3.9), остаточно запишемо дискретизоване рівняння довгої лінії для останнього вузла дискретизації:

$$\frac{dv_N}{dt} = -\frac{g_0 L_0 + C_0 R_0}{C_0 L_0} v_N + \frac{2}{C_0 L_0 (\Delta x)^2} u_{N-1} - \left[\frac{4}{C_0 L_0 (\Delta x)^2} + \frac{g_0 R_0}{C_0 L_0} \right] u_N; \quad (3.25)$$

$$\frac{du_N}{dt} = v_N. \quad (3.26)$$

Розроблена математична модель довгої лінії електропередачі постійного струму дає змогу здійснювати аналіз перехідних процесів у лінії електропередачі.

3.3 Розробка алгоритму роботи програмного коду

Для дослідження електромагнітних перехідних процесів у двопровідній лінії у режимі роботи на еквівалентне активно-індуктивне навантаження потрібно одночасно інтегрувати систему диференціальних рівнянь (3.6) – (3.8), (3.10), (3.14), (3.15) та (3.21). У режимі неробочого ходу інтегрувати потрібно (3.6) – (3.8), (3.18), (3.19) та (3.21), а для режиму короткого замикання – (3.6) – (3.8), (3.22), (3.25), (3.26) та (3.21).

Відповідно, для інтегрування вищенаведених рівнянь нами було розроблено алгоритм роботи та написано програмний код алгоритмічною мовою програмування *Visual Fortran*. Алгоритм роботи програмного коду представлено на рисунку 3.5. Фрагмент написаного програмного коду алгоритмічною мовою програмування *Visual Fortran* представлено у Додатку А.

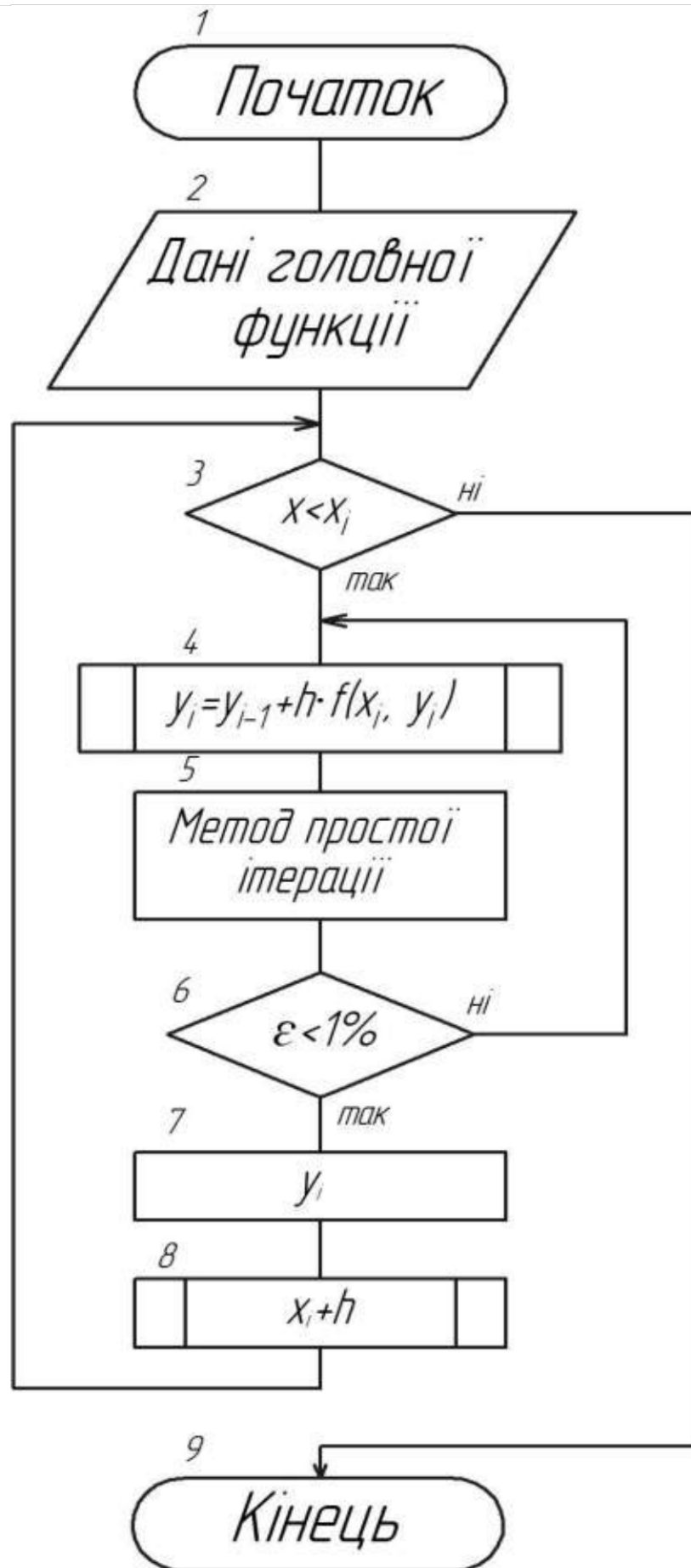


Рисунок 3.5 – Алгоритм роботи розробленого програмного коду

Розроблений програмний код ґрунтується на неявному методі Ейлера, який є стійким чисельним методом для жорстких рівнянь, що обчислює наступне значення функції, використовуючи інформацію на новому кроці.

Основні кроки алгоритму:

1. Задання параметрів моделі та початкових умов:

- ініціалізація змінних, які представляють параметри лінії та початкові умови (наприклад, струми, напруги та їх похідні);
- встановлення кроку інтегрування та кінцевого часу моделювання.

2. Вибір кроку інтегрування та початок ітераційного процесу:

- встановлення значення кроку інтегрування Δt ;
- ініціалізація циклу для ітерацій, який триватиме до досягнення кінцевого часу.

3. Основна схема неявного методу Ейлера:

- для кожного ітераційного кроку обчислюється значення на новому кроці часу $t + \Delta t$ шляхом розв'язування нелінійної системи рівнянь;
- використання попередніх значень змінних (наприклад, струму та напруги), щоб оцінити нові значення через систему рівнянь, яку необхідно розв'язати методом простої ітерації.

4. Ітераційний процес розв'язку:

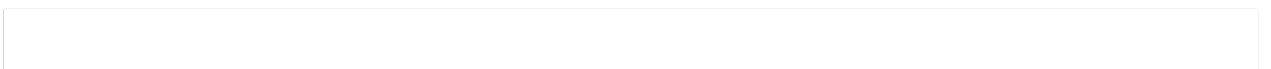
- у межах кожного часового кроку застосовується ітераційний метод для знаходження значень змінних, які задовольняють систему рівнянь;
- перевірка критеріїв збіжності, якщо досягнуто необхідної точності то перейти до наступного часового кроку.

5. Виведення результатів:

- запис значень змінних (напруги, струму тощо) на кожному часовому кроці у файл або виведення їх на екран.

6. Завершення циклу ітерацій:

- після досягнення кінцевого часу, завершення розрахунку та завершення роботи програми.



3.4 Аналіз результатів комп'ютерної симуляції

Комп'ютерне моделювання перехідних процесів проводилося для двовірної лінії, що працює на постійному струмі для режиму роботи на еквівалентне активно-індуктивне навантаження, режиму неробочого ходу та короткого замикання. Для симуляції було прийнято параметри, які відповідали раніше працюючій лінії постійного струму Волгоград – Донбас $R_0 = 0,82 \cdot 10^{-4}$ Ом/м, $L_0 = 0,175 \cdot 10^{-5}$ Гн/м, $C_0 = 0,103 \cdot 10^{-10}$ Ф/м, $g_0 = 3,235 \cdot 10^{-10}$ См/м. Загальна довжина лінії становить $l = 473$ км. До лінії прикладено напругу $u(x, t)_{x=0} = 400$ кВ. Для дискретизації рівнянь довгої лінії використано крок $\Delta x = l / 20 = 23,6$ км. Інтегрування диференціальних рівнянь проводили неявним методом Ейлера із фіксованим часовим кроком $\Delta t = 25$ мкс.

3.4.1 Режим роботи на навантаження. Параметри навантаження: $R_H = 350$ Ом, $L_H = 1$ Гн.

На рисунках 3.6 – 3.9 наведено просторові розподіли струмів та напруг вздовж лінії при активному індуктивному навантаженні.

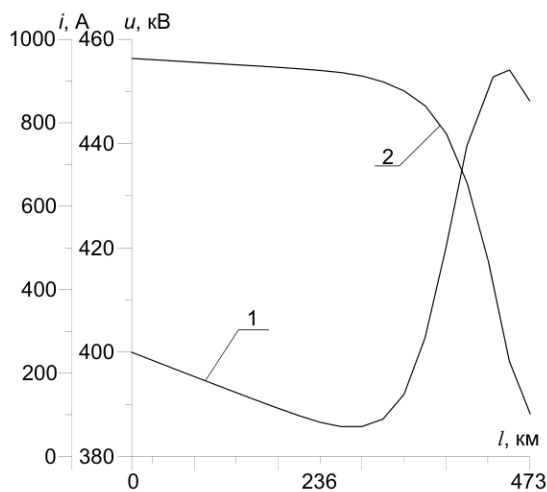


Рисунок 3.6 – Просторовий розподіл напруги (1) та струму (2) вздовж лінії на момент часу $t = 0,002$ с

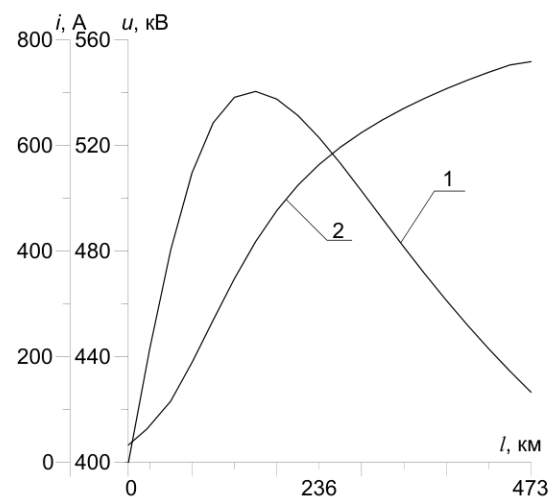


Рисунок 3.7 – Просторовий розподіл напруги (1) та струму (2) вздовж лінії на момент часу $t = 0,007$ с

На момент часу 0,002 с (рисунок 3.6) розподіл напруги вздовж лінії набуває наступного вигляду: напруга знижується до 380 кВ в середині лінії, а

далі різко зростає, досягаючи значення 460 кВ на її кінці. Щодо струму, то початкове значення складає 940 А, поступово знижується до 905 А в середній частині лінії і різко падає до 90 А на її кінці.

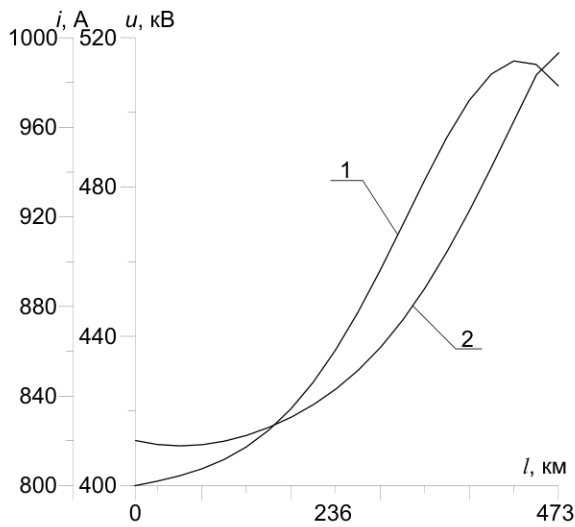


Рисунок 3.8 – Просторовий розподіл напруги (1) та струму (2) вздовж лінії на момент часу $t = 0,01$ с

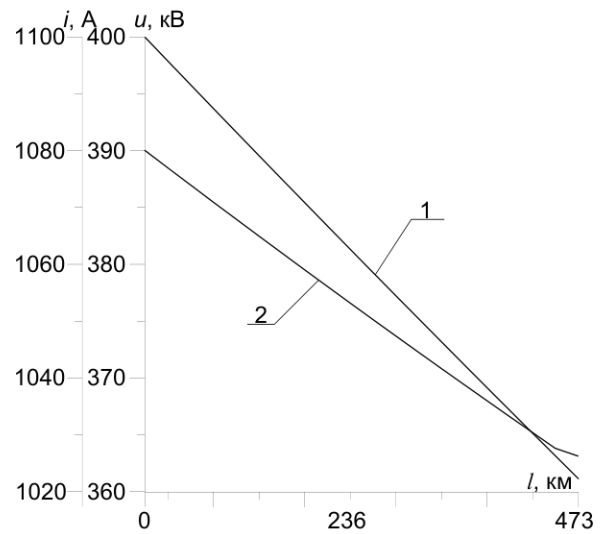


Рисунок 3.9 – Просторовий розподіл напруги (1) та струму (2) вздовж лінії на момент часу $t = 0,1$ с

На рисунку 3.7 показано, що початкова напруга в лінії становить 400 кВ, потім підвищується до 545 кВ ближче до середини і знижується до 425 кВ на її кінці. Струм, починаючи з 35 А на початку лінії, зростає до 760 А ближче до кінця.

На рисунку 3.8 можна побачити, що при напрузі 400 кВ на початку лінії вона досягає 510 кВ на її кінці, а струм при цьому збільшується з 830 А на початку до 950 А на кінці лінії.

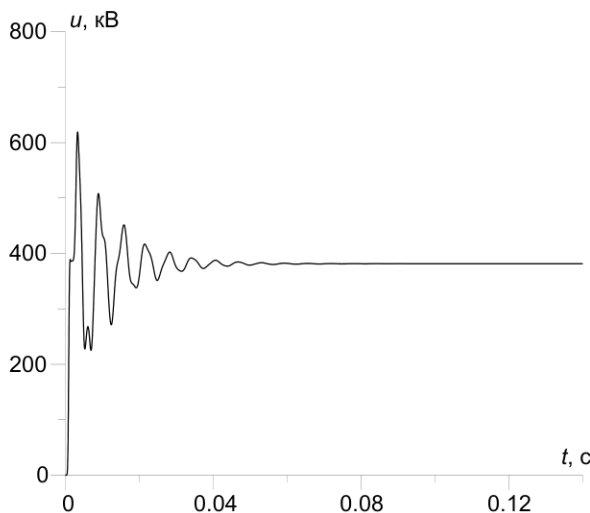


Рисунок 3.10 – Часовий розподіл напруги по середині лінії

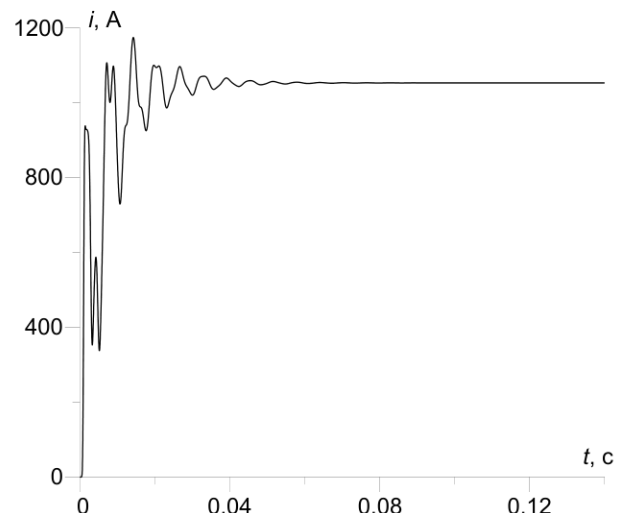


Рисунок 3.11 – Часовий розподіл струму по середині лінії

Загальний аналіз рисунків 3.6 – 3.8 показує, що розподіли струмів та напруг вздовж лінії є нелінійними. Водночас, в усталеному режимі (рисунок 3.9) розподіл напруги демонструє лінійну залежність, а розподіл струму наближається до лінійного. Різниця струмів на початку і у кінці лінії становить 45 А, тоді як напруга змінюється в межах 10 %.

На рисунках 3.10 та 3.11 представлено часові розподіли струмів та напруг у середній точці лінії. Спільний аналіз рисунків 3.6 – 3.8 та 3.10, 3.11 дозволяє зробити висновок, що час поширення електромагнітних хвиль залежить від дисипативних процесів, обумовлених опором навантаження.

На рисунках 3.12 та 3.13 показано часові розподіли струму через навантаження та напруги на навантаженні. З них видно, що зміна напруги на навантаженні демонструє більш виражений коливний характер порівняно з напругою в середній точці лінії. Щодо струму, то його зміна в кінці лінії виявляє менш коливний характер, ніж у середній точці.

На рисунках 3.14 та 3.15 показано часово-просторові розподіли струмів та напруг в інтервалі часу $t \in [0; 0,02]$ с. Із рисунка 3.14 видно, що під час перехідного процесу із підвищенням напруги на навантаженні зростає амплітуда коливань напруги в середній частині лінії. На рисунку 3.25 можна побачити, що при роботі лінії на еквівалентне активно-індуктивне навантаження коливання струму на початку лінії менш виражені.

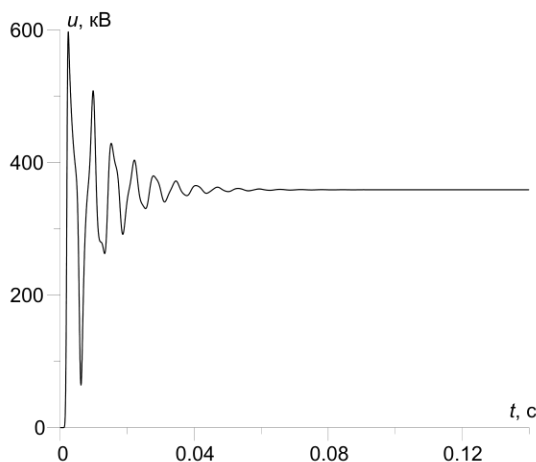


Рисунок 3.12 – Часовий розподіл напруги на навантаженні

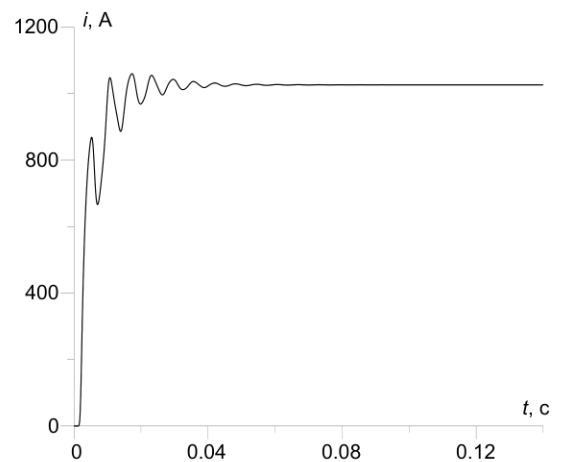


Рисунок 3.13 – Часовий розподіл струму через навантаження

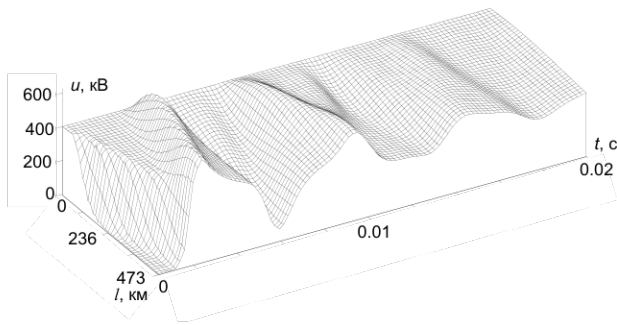


Рисунок 3.14 – Часово-просторовий розподіл напруги в інтервалі часу $t \in [0; 0,02]$ с

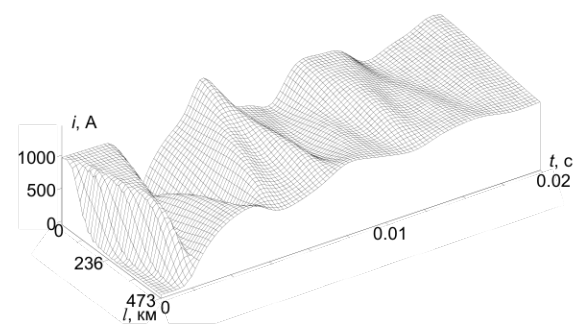


Рисунок 3.15 – Часово-просторовий розподіл струму в інтервалі часу $t \in [0; 0,02]$ с

Підсумовуючи результати комп'ютерної симуляції для режиму роботи лінії постійного струму на еквівалентне активно-індуктивне навантаження, слід зазначити, що час досягнення системою усталеного стану становить 0,05 с, тоді як для стану неробочого ходу цей час дорівнює 0,12 с, що майже у 2,5 рази більше.

3.4.2 Режим неробочого ходу. Комп'ютерна симуляція відбувалася для тих самих параметрів лінії електропередачі, що й у попередньому досліді за відсутності навантаження у кінці лінії.

На рисунках 3.16 – 3.26 представлено просторові розподіли напруг (1) та струмів (2) у лінії електропередачі.

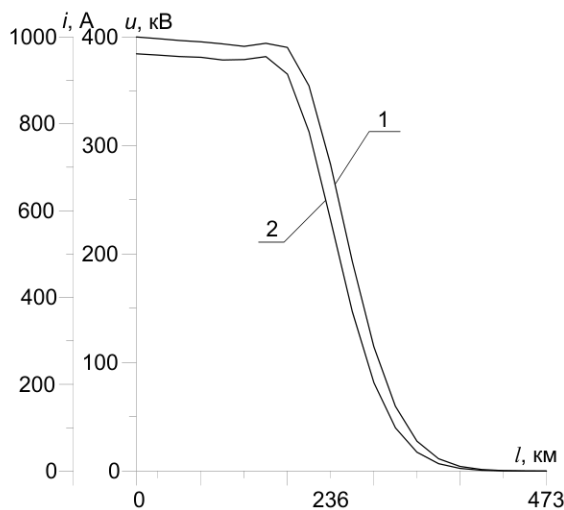


Рисунок 3.16 – Розподіл напруги (1) та струму (2) в лінії у момент часу $t = 0,001$ с

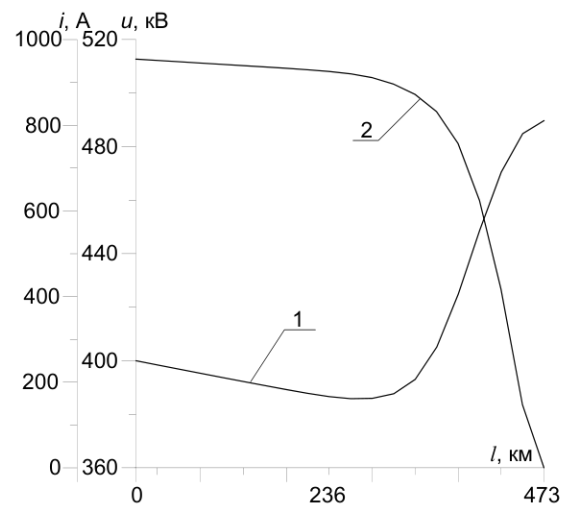


Рисунок 3.17 – Розподіл напруги (1) та струму (2) в лінії у момент часу $t = 0,002$ с

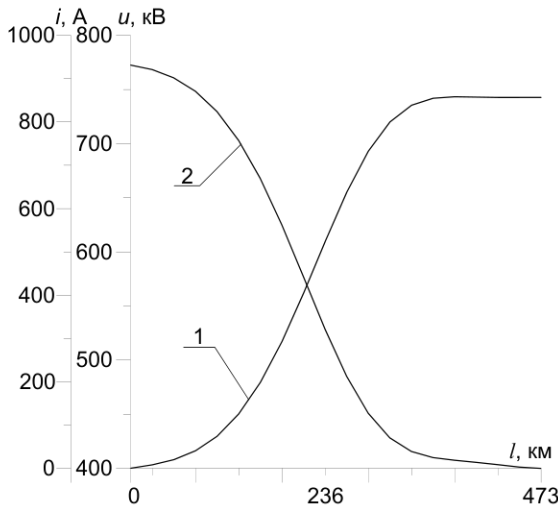


Рисунок 3.18 – Розподіл напруги (1) та струму (2) в лінії у момент часу $t = 0,003$ с

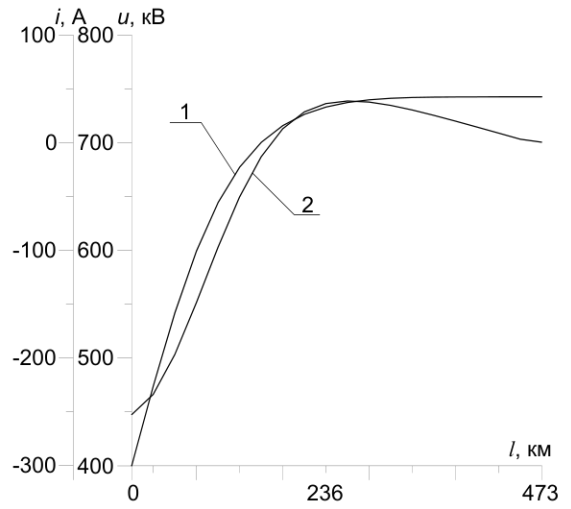


Рисунок 3.19 – Розподіл напруги (1) та струму (2) в лінії у момент часу $t = 0,004$ с

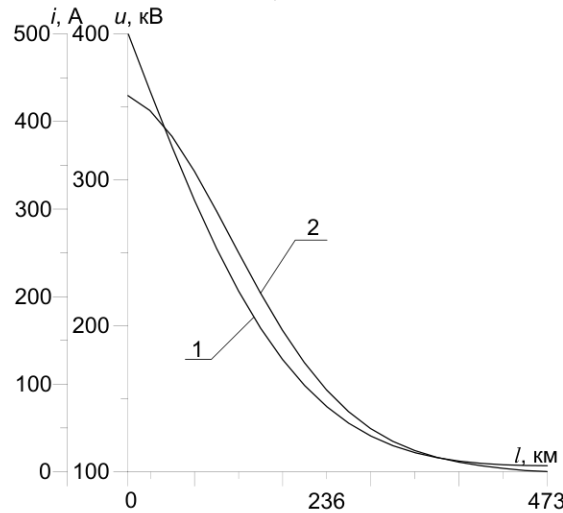


Рисунок 3.20 – Розподіл напруги (1) та струму (2) в лінії у момент часу $t = 0,008$ с

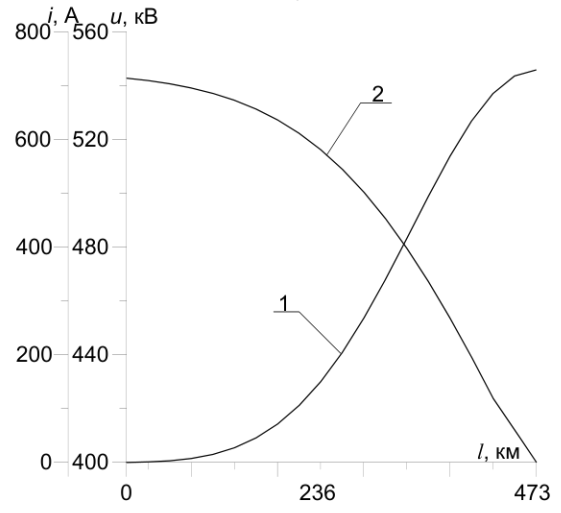


Рисунок 3.21 – Розподіл напруги (1) та струму (2) в лінії у момент часу $t = 0,01$ с

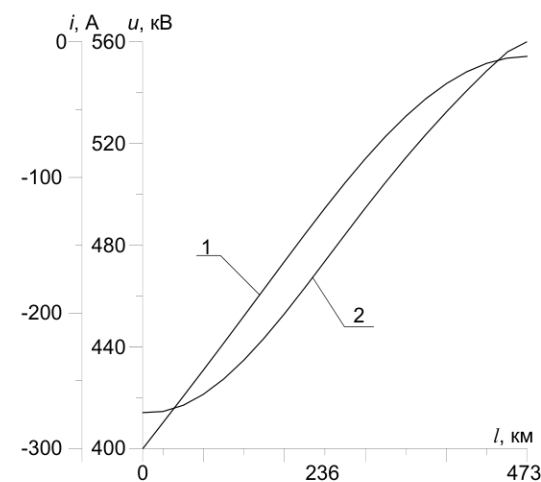


Рисунок 3.22 – Розподіл напруги (1) та струму (2) в лінії у момент часу $t = 0,02$ с

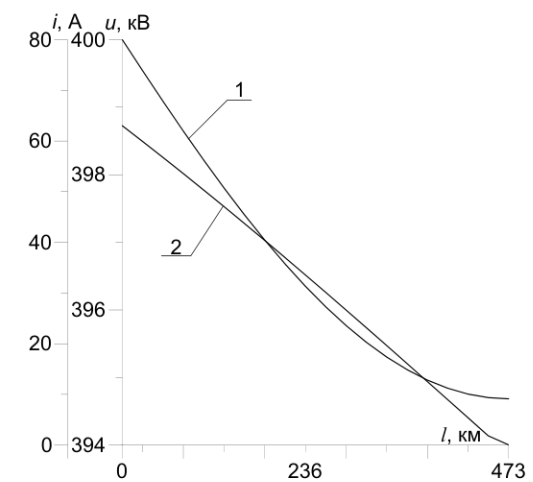


Рисунок 3.23 Розподіл напруги (1) та струму (2) в лінії у момент часу $t = 0,1$ с

Згідно з аналізом рисунка 3.16, можна побачити, що на момент часу 0,001 с після вмикання лінії електромагнітні хвилі тільки починають формуватися. Так, за цей короткий період, на відстані 190 км від початку лінії напруга вже досягла 390 кВ, а струм склав 940 А.

На рисунку 3.17 зображено аналогічну ситуацію, але для моменту часу 0,002 с. Аналізуючи цей рисунок, можна побачити, що функція напруги починає спадати, а в центральній частині лінії різко зростає. У той же час функція струму в цьому місці, навпаки, демонструє спад.

На момент часу 0,003 с (рис. 3.18) у лінії починаються коливальні процеси. Якщо напруга на початку лінії становить 400 кВ, то в середині лінії вона досягає 550 кВ, а на кінці – 760 кВ. Щодо розподілу струму, ситуація дещо відрізняється: на початку лінії струм має значення 910 А, у середині – 400 А, а на кінці він знижується до нуля.

Надзвичайно цікаві результати щодо просторового розподілу напруги та струму на момент часу 0,004 с наведені на рисунку 3.19. Функція напруги поступово зростає, досягаючи максимального значення ближче до середини лінії, і надалі залишається майже стабільною. Щодо струму, то на початку лінії він від'ємний, зі значенням –250 А, а ближче до середини лінії стає практично нульовим.

Якщо на момент часу 0,004 с напруга у кінці лінії становила 760 кВ, то на момент 0,008 с вона знизилася до 110 кВ. Просторовий розподіл струму частково відтворює характер просторового розподілу напруги: на початку лінії струм становить 430 А і поступово зменшується до нуля вздовж її довжини.

Просторовий розподіл напруги та струму в моменти часу 0,01 с та 0,02 с, які відображають перехідний процес, зображено на рисунках 3.21 та 3.22 відповідно. Особливо показовим є рисунок 3.23, де видно, що коливання напруги й струму майже зійшли нанівець, і амплітуда електромагнітної хвилі суттєво знизилася через дисипаційні процеси. Коливальний процес практично згасає. Хоча лінія перебуває в неробочому стані, витікні струми та струми в елемен-

тах лінії не зникають, що зумовлено ємнісними струмами між проводами. Водночас у кінці ненавантаженої лінії струм, як очікується, дорівнює нулю.

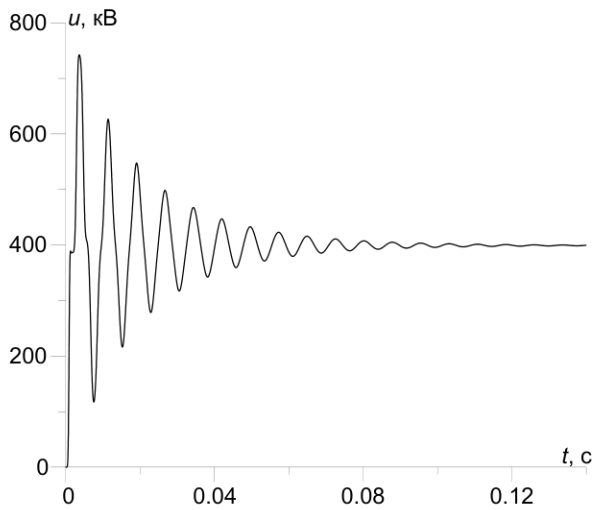


Рисунок 3.24 – Часовий розподіл напруги по центру лінії

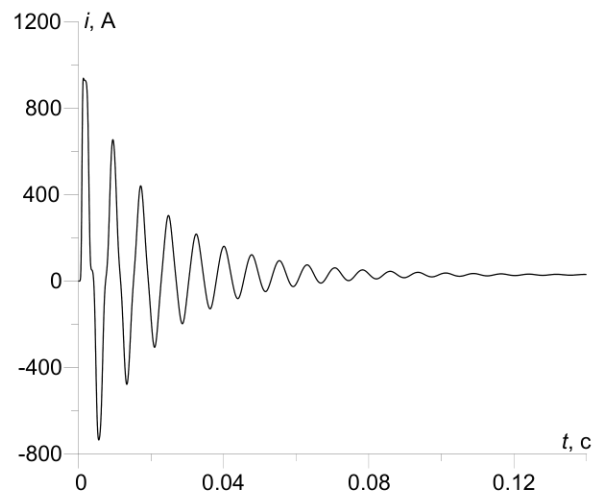


Рисунок 3.25 – Часовий розподіл струму по центру лінії

На рисунках 3.24 – 3.27 представлені часові зміни напруги та струму. Перші два рисунки ілюструють їх зміни в центральній частині лінії, тоді як останні два демонструють аналогічні зміни в кінці лінії.

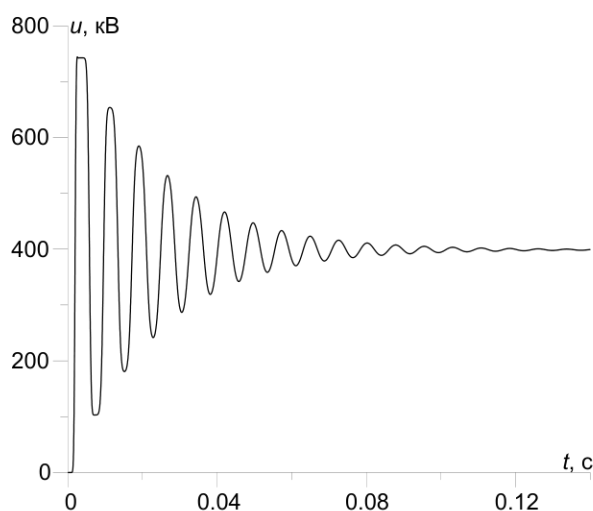


Рисунок 3.26 – Часовий розподіл напруги у кінці лінії

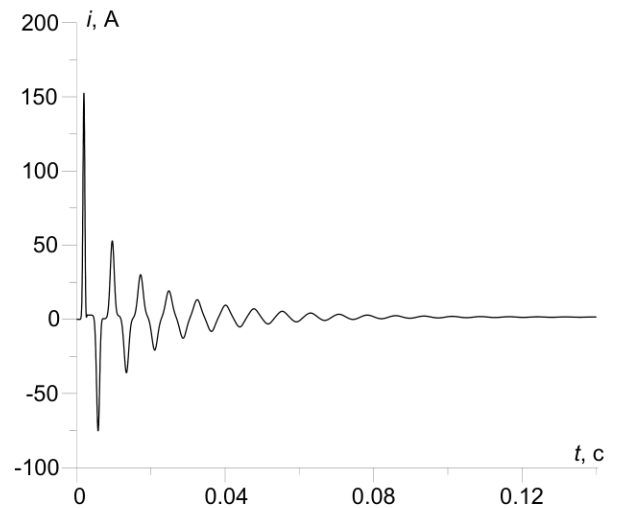


Рисунок 3.27 – Часовий розподіл струму у кінці лінії

Проводячи порівняльний аналіз вищезгаданих рисунків, можна легко помітити, що значення напруги (див. рис. 3.24 та 3.26) залишається практично незмінним. Проте зовсім інша ситуація спостерігається щодо струмів (див. рис. 3.25 та 3.27), де значення струму коливається майже у шість разів. Це

пояснюється тим, що лінія електропередачі перебуває в ненавантаженому стані (неробочий хід).

На рисунках 3.28, 3.29, 3.30 та 3.31 показано напруги та струми в лінії у вигляді функції часової та просторової координати. Ці графіки представлені у тривимірному форматі.

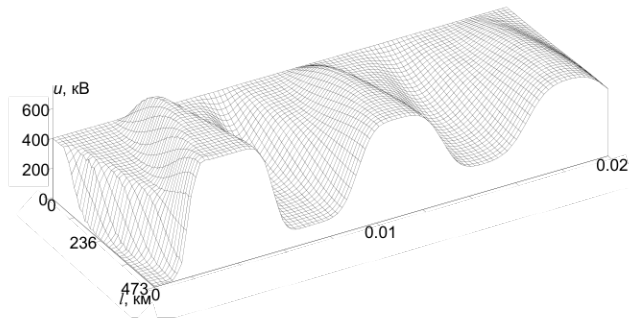


Рисунок 3.28 – Часово-просторовий розподіл напруги в інтервалі часу $t \in [0; 0,02]$ с

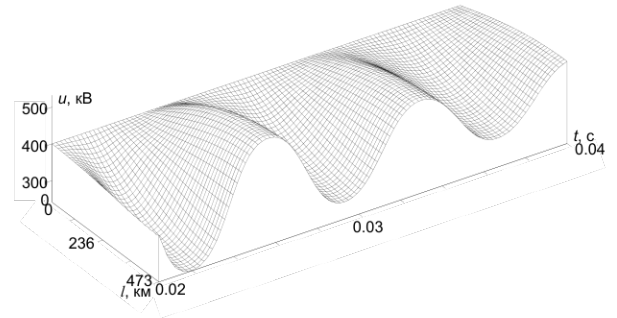


Рисунок 3.29 – Часово-просторовий розподіл напруги в інтервалі часу $t \in [0,02; 0,04]$ с

Як видно, напруга і струм перебувають у протифазі. Це можна пояснити тим, що природа напруги пов'язана з електричним полем, тоді як струм асоціюється з магнітним полем. Таким чином, існує очевидна залежність між цими двома величинами, яка визначається фізичними принципами електромагнітних явищ.

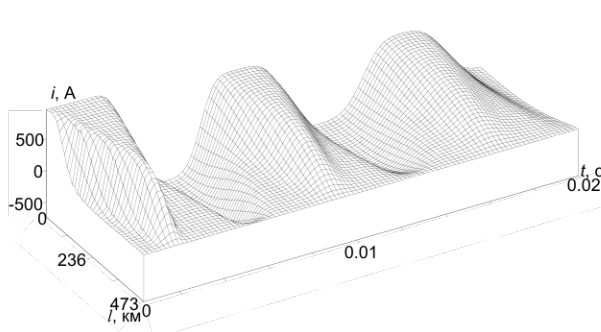


Рисунок 3.30 – Часово-просторовий розподіл струму в інтервалі часу $t \in [0; 0,02]$ с

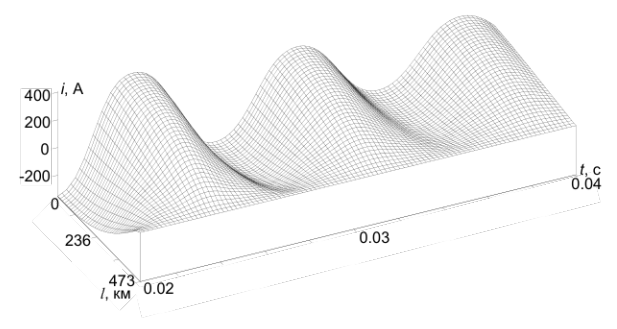


Рисунок 3.31 – Часово-просторовий розподіл струму в інтервалі часу $t \in [0,02; 0,04]$ с

Представлені рисунки доцільно аналізувати разом із рисунками 3.16 – 3.23, 3.25 та 3.27.

3.4.3 Режим короткого замикання. Третій аварійний режим роботи лінії, який ми розглянемо, – це режим короткого замикання. Аналіз перехідних процесів у довгих лініях електропередач в умовах КЗ є надзвичайно важливим технічним завданням. Адже знання про розвиток перехідних процесів в аварійному режимі дозволяє визначити умови роботи споживачів, здійснити вибір апаратів і провідників, а також перевірити їх відповідність вимогам електродинамічної і термічної стійкості; проектувати та налаштовувати пристрої релейного захисту і автоматики тощо.

Що стосується результатів комп'ютерної симуляції, то вона проводилася для двопровідної лінії постійного струму в рамках двох експериментів. У першому експерименті виконувалася симуляція увімкнення ненавантаженої лінії в режимі КЗ (КЗ в кінці лінії). Другий експеримент передбачав аналіз усталеного режиму роботи лінії на активно-індуктивне навантаження з подальшим виникненням КЗ (в момент часу 0,07 с) в кінці лінії. Параметри лінії залишалися незмінними, аналогічно до експерименту в режимі неробочого ходу, тоді як параметри навантаження відповідали умовам роботи лінії на еквівалентне активно-індуктивне навантаження.

Основні результати першого експерименту представлені на рисунках 3.32 – 3.41, а для другого експерименту – на рисунках 3.42 – 3.47.

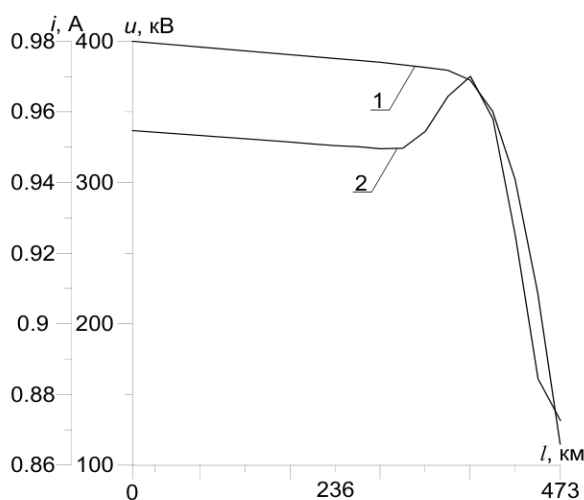


Рисунок 3.32 – Просторові розподіли напруг (1) та струмів (2) вздовж ненавантаженої лінії в режимі КЗ у момент часу $t = 0,002$ с

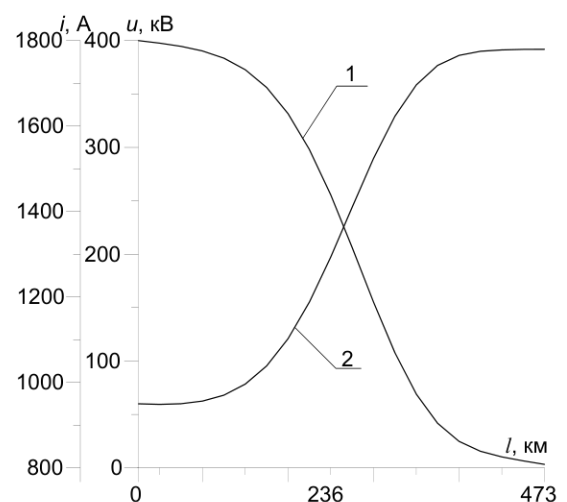


Рисунок 3.33 – Просторові розподіли напруг (1) та струмів (2) вздовж ненавантаженої лінії в режимі КЗ у момент часу $t = 0,003$ с

На рисунку 3.32 представлено просторові розподіли струмів та напруг в момент часу $t = 0,002$ с. Аналізуючи розподіли функцій напруги для режимів роботи лінії в неробочому стані, на еквівалентне активно-індуктивне навантаження та під час короткого замикання (КЗ), можна зазначити, що розподіл функції напруги в цей момент часу залишається практично ідентичним для всіх режимів. Водночас картина розподілу струму уздовж лінії під час КЗ має певні відмінності: зокрема, на відстані 360 км від початку лінії спостерігається невелике підвищення значення струму.

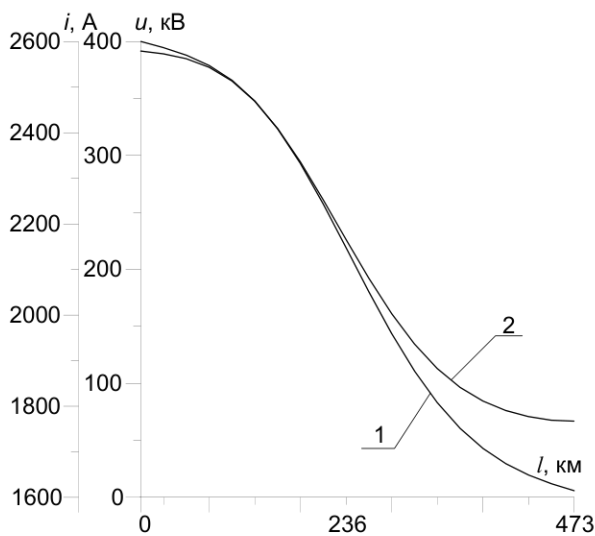


Рисунок 3.34 – Просторові розподіли напруг (1) та струмів (2) вздовж ненавантаженої лінії в режимі КЗ у момент часу $t = 0,005$ с

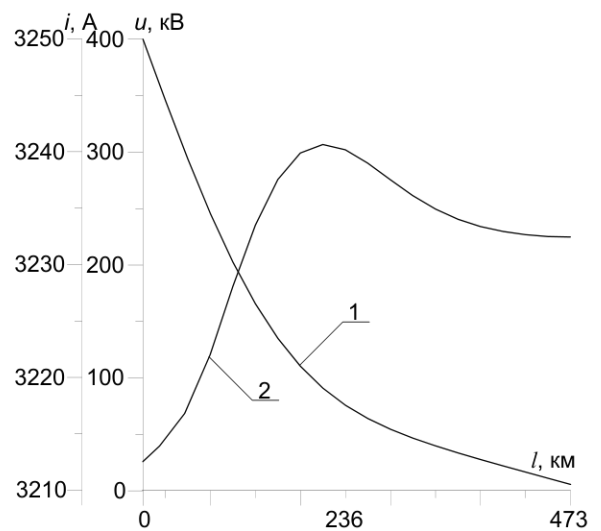


Рисунок 3.35 – Просторові розподіли напруг (1) та струмів (2) вздовж ненавантаженої лінії в режимі КЗ у момент часу $t = 0,008$ с

На рисунку 3.33 представлено, що в момент часу 0,003 с напруга на початку лінії дорівнює 400 кВ, тоді як в кінці лінії вона складає нуль. Це спостерігається також на рисунках 3.34 та 3.35. Якщо на початку лінії струм у момент часу 0,003 с становив 960 А, а в кінці – 1650 А, то в момент часу 0,005 с (див. рис. 3.34) ці значення зросли до 2700 А та 1850 А відповідно.

У момент часу 0,008 с фіксується подальше збільшення струму як на початку, так і в кінці лінії: тепер він становить 3112 А і 3132 А, відповідно. Також спостерігається зміна розподілу напруги в лінії. У режимі короткого замикання проводи функціонують як екран, від якого електромагнітна хвиля відбивається, а її амплітуда варіюється залежно від часу.

На рисунках 3.36 – 3.39 демонструються часові розподіли напруги та струму у середині та в кінці лінії під час режиму КЗ. З рисунка 3.36 видно, що після активації лінії в режимі КЗ по середині відбулося різке зростання напруги до 390 кВ, після чого спостерігається затування перехідного процесу до усталеного режиму, в якому напруга складає 230 кВ.

З рисунка 3.37 видно, що перехідний процес струму в середині лінії має менш коливний характер у порівнянні з напругою. Після затування перехідного процесу (практично аперіодичного) струм досягає значення майже 10 кА.

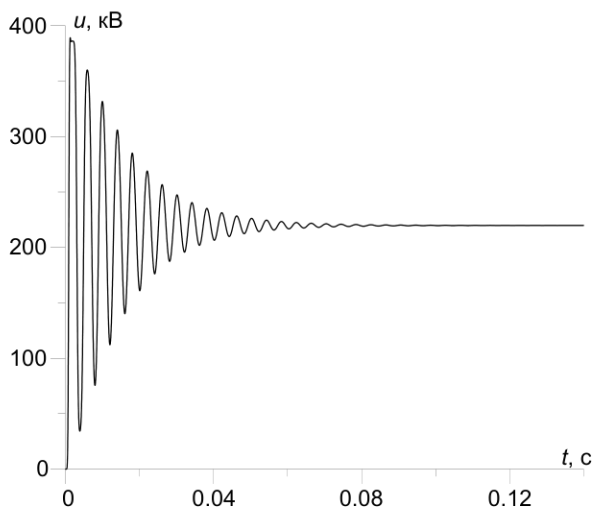


Рисунок 3.36 – Часовий розподіл напруги по середині ненавантаженої лінії у режимі короткого замикання

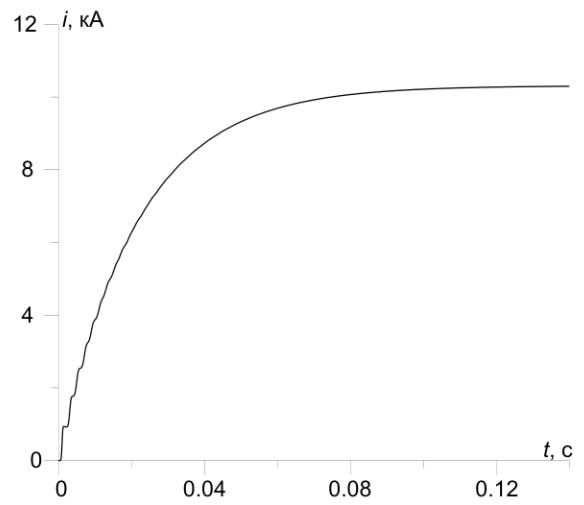


Рисунок 3.37 – Часовий розподіл струму по середині ненавантаженої лінії у режимі короткого замикання

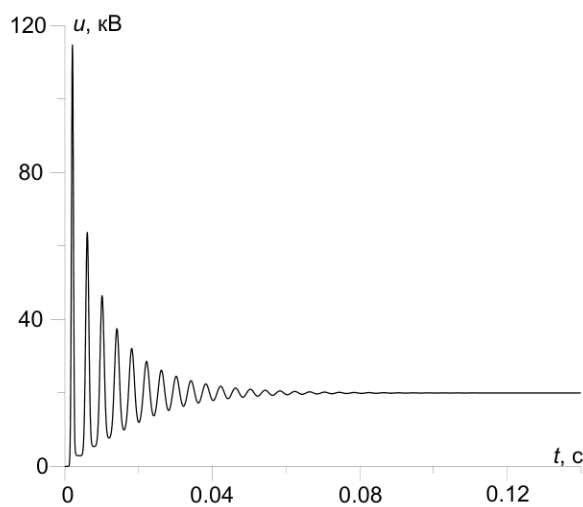


Рисунок 3.38 – Часовий розподіл напруги на N -му вузлі ненавантаженої лінії в режимі короткого замикання

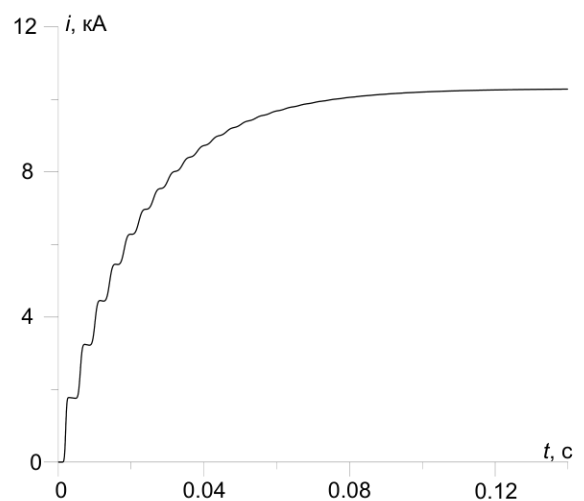


Рисунок 3.39 – Часовий розподіл струму в кінці ненавантаженої лінії в режимі короткого замикання

На рисунку 3.38 видно, що після активації лінії стрибок напруги на N -му вузлі становив приблизно 117 кВ, а усталене значення напруги досягло 21 кВ. Це значне зменшення напруги на останньому вузлі дискретизації порівняно зі значеннями в середині лінії пов'язане з меншою відстанню до місця короткого замикання, яка в даному випадку становила 23 км, в той час як для середини лінії ця відстань дорівнює 236 км.

З рисунка 3.39 видно, що перехідний процес струму в кінці лінії має подібний характер до процесу в середині лінії, але відрізняється дещо більшою амплітудою коливань.

На рисунках 3.40 та 3.41 представлено часово-просторові розподіли напруги та струму для інтервалу часу $t [0; 0,02]$ с уздовж ненавантаженої лінії в режимі короткого замикання.

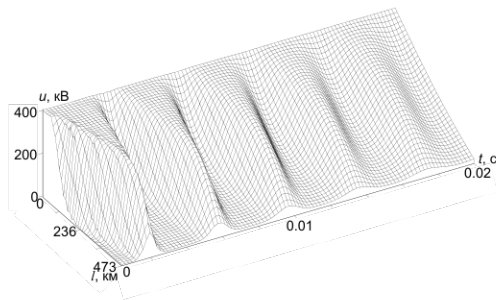


Рисунок 3.40 – Часово-просторовий розподіл напруги вздовж ненавантаженої лінії у режимі короткого замикання для інтервалу часу $t \in [0; 0,02]$ с

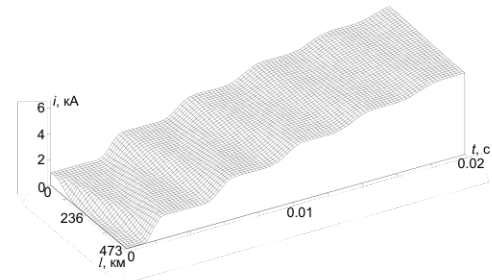


Рисунок 3.41 – Часово-просторовий розподіл струму вздовж ненавантаженої лінії у режимі короткого замикання для інтервалу часу $t \in [0; 0,02]$ с

Аналізуючи представлені рисунки, ми можемо спостерігати, що розподіл напруги демонструє найбільші коливання у середині лінії, тоді як струм має найбільші зміни на початку та в кінці лінії.

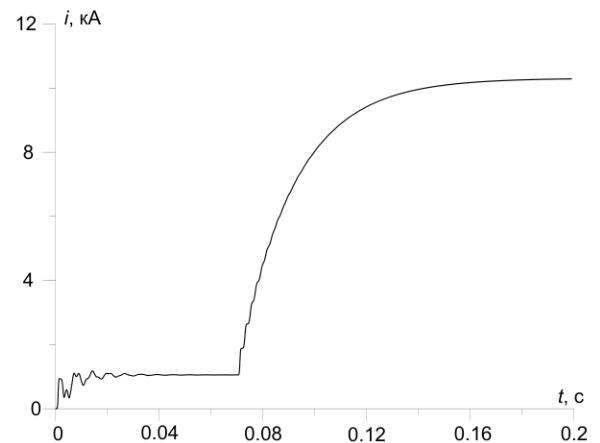
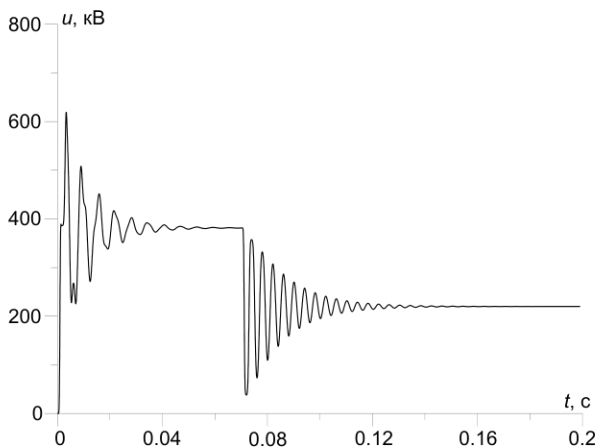


Рисунок 3.42 – Часовий розподіл напруги по середині лінії за увімкнення на навантаження із подальшим коротким замиканням у кінці лінії

Рисунок 3.43 – Часовий розподіл струму по середині лінії за увімкнення на навантаження із подальшим коротким замиканням у кінці лінії

Продовжимо з аналізом отриманих перехідних процесів для другого досліді, результати якого представлено на рисунках 3.42 – 3.47.

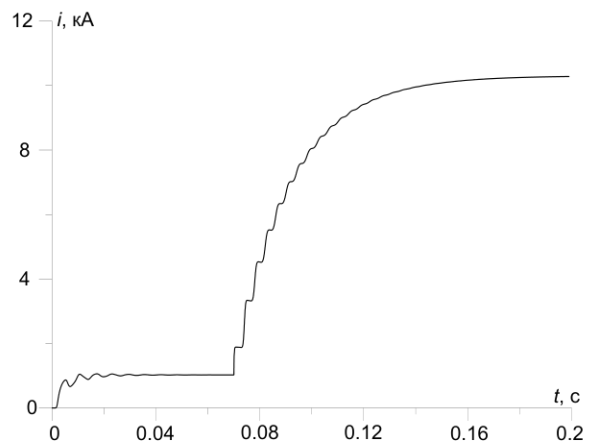
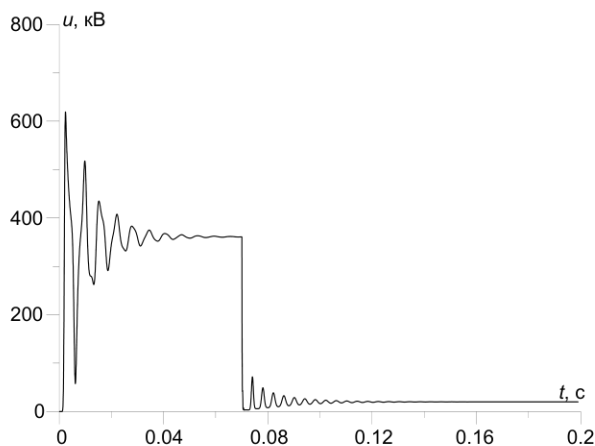


Рисунок 3.44 – Часовий розподіл напруги на N -му дискретизованому вузлі лінії за увімкнення на навантаження із подальшим коротким замиканням у кінці лінії

Рисунок 3.45 – Часовий розподіл струму у кінці лінії за увімкнення на навантаження з подальшим коротким замиканням у кінці лінії

Із рисунка 3.42 видно, що після виникнення короткого замикання напруга в середині лінії демонструє значні коливання. По завершенню перехідного процесу, усталене значення напруги лінії становить 230 кВ.

На рисунку 3.43 спостерігається, що струм по середині лінії після короткого замикання збільшився приблизно у 10 разів, і усталений струм під час короткого замикання досягнув близько 10,5 кА.

З рисунка 3.44 видно, що в кінці лінії, на останньому вузлі дискретизації (за 23 км до місця короткого замикання), напруга з усталеного значення 355 кВ різко знизилась до 15 кВ. Після цього протягом 0,05 с тривав перехідний процес, в результаті якого напруга набула усталеного значення приблизно 25 кВ.

На рисунку 3.45 показано перехідний процес, що супроводжувався незначними коливаннями струму. Як і в попередньому випадку, усталений струм в кінці лінії збільшився приблизно у 10 разів, досягнувши також значення 10,5 кА.

На рисунках 3.46 та 3.47 представлені часово-просторові розподіли напруги та струму в інтервалі часу $[0,064; 0,1]$ с для другого дослідження. З цих рисунків видно, що до виникнення короткого замикання часово-просторовий розподіл напруги та струму мав лінійний характер, а після цього в лінії почалися коливні процеси, що супроводжувалися найбільшими коливаннями напруги в середині лінії та коливаннями струму на краях лінії.

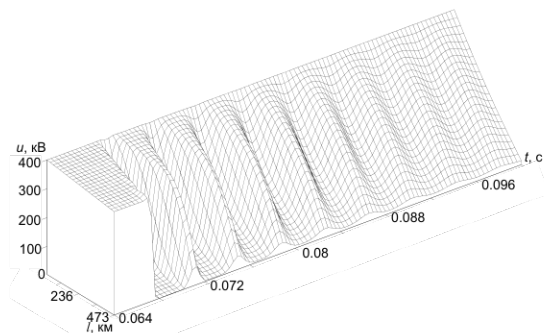


Рисунок 3.46 – Часово-просторовий розподіл напруги в інтервалі часу $[0,064; 0,1]$ с у лінії за режиму навантаження з подальшим коротким замиканням у кінці лінії

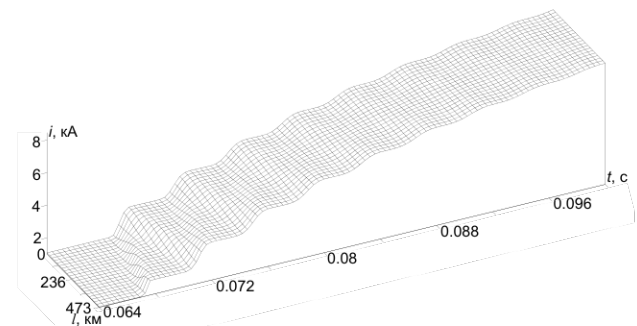


Рисунок 3.47 – Часово-просторовий розподіл струму в інтервалі часу $[0,064; 0,1]$ с у лінії за режиму навантаження із подальшим коротким замиканням у кінці лінії

Очевидно, що під час аналізу перехідних процесів у лініях електропередачі постійного струму необхідно, також, враховувати вплив перехідних процесів у випрямлячах на початку лінії та в інверторах у кінці. Однак це є окремою задачею, яка не була предметом нашого розгляду.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Електричний опір тіла людини

Тіло людини є провідником електричного струму. Однак провідність живої тканини на відміну від звичайних провідників зумовлена не лише її фізичними властивостями, але й дуже складними біохімічними й біофізичними процесами, властивими лише живій матерії. У результаті опір тіла людини є змінною величиною, яка має нелінійну залежність від множини факторів, у тому числі від стану шкіри, параметрів електричного кола, фізіологічних факторів та стану навколишнього середовища. Таким чином, тіло людини можна розглядати як провідник особливого роду, що має змінний опір і володіє якоюсь мірою властивостями провідників першого роду (напівпровідники) і другого роду (електроліти) [29].

Електричний опір різних тканин тіла людини неоднаковий: шкіра, кістки, жирова тканина, сухожилля й хрящі мають відносно великий опір, а м'язова тканина, кров, лімфа й особливо спинний та головний мозок – малий. Наприклад, при струмі 50 Гц питомий об'ємний опір становить:

- суха шкіра – $3 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^4$ Ом/м;
- кістки – $10^4 - 2 \cdot 10^6$ Ом/м;
- жирова тканина – 30–60 Ом/м;
- м'язова тканина – 1,5 – 3 Ом/м;
- кров – 1 – 2 Ом/м;
- спинномозкова рідина – 0,5 – 0,6 Ом.

Із цих даних випливає, що в порівнянні з іншими тканинами шкіра має дуже великий питомий опір, що є головним фактором, який визначає опір тіла людини в цілому.

Опір тіла людини, тобто опір між двома електродами, накладеними на поверхню тіла, у різних людей неоднаковий. Неоднаковим виявляється він і в однієї людини в різний час і в різних умовах вимірювання.

Опір тіла людини можна умовно вважати таким, що складається із трьох послідовно ввімкнених опорів (рисунок 4.1, а, б): двох однакових комплексних опорів зовнішнього шару шкіри, тобто епідермісу $2z_e$ та одного активного опору внутрішніх тканин тіла R_g (який містить у собі два опори – внутрішніх шарів шкіри, тобто дерми та підшкірних тканин тіла).

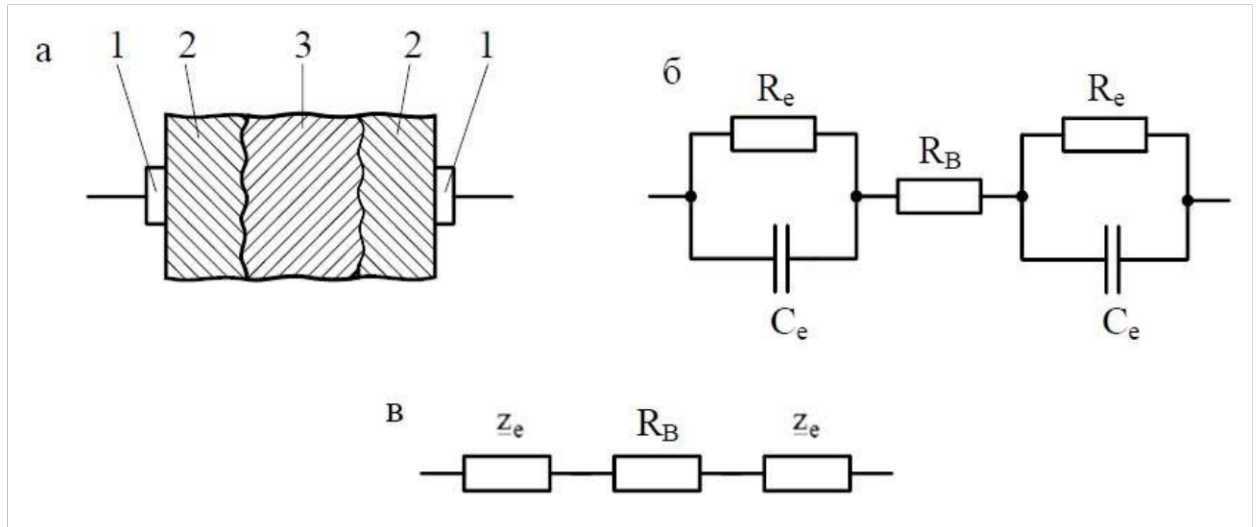


Рисунок 4.1 – До визначення електричного опору тіла людини: а – схема вимірювання опору; б – еквівалентна схема опору тіла людини; в – спрощена еквівалентна схема; 1 – електроди; 2 – зовнішній шар шкіри (епідерміс); 3 – внутрішні тканини тіла (внутрішні шари шкіри й підшкірних тканин); R_g – опір внутрішніх тканин; R_e – активний опір епідермісу; C_e – ємність епідермісу [30].

Опір епідермісу z_e складається із активного R_e та ємнісного $x_c = 1/\omega C_e$ опорів, включених паралельно, де $\omega = 2\pi f$ – кутова частота. Ємнісний опір обумовлений тим, що в місці дотику електрода до тіла людини утворюється немов конденсатор, обкладками якого є електрод і тканини тіла людини, які добре проводять струм, що лежать під зовнішнім шаром шкіри, а діелектриком, що розділяє обкладки, – цей шар (епідерміс) (рисунок 4.1, б). Як показують дослідження, ємність епідермісу C_e коливається від декількох сотень пікофарад до декількох мікрофарад.

$$z_h = 2 \cdot z_e + R_g = 2 \cdot \left(R_e - j \frac{1}{\omega \cdot C_e} \right) + R_g. \quad (4.1)$$

Активний опір епідермісу R_e залежить від його питомого опору ρ_e , значення якого перебувають у межах $10^4 - 10^5$ Ом/м, а також від площі контакту S та товщини епідермісу d_e :

$$R_e = \frac{\rho_e \cdot d_e}{S}. \quad (4.2)$$

Опір внутрішніх тканин тіла вважається суто активним. Значення R_e практично не залежить від площі електродів, частоти струму, а також від прикладеної напруги й дорівнює приблизно 500 – 700 Ом.

При малій ємності епідермісу C_e (коли її можна прийняти рівною нулю) повний опір тіла людини z_h виявляється рівним сумі активних опорів обох шарів епідермісу й опору внутрішніх тканин тіла:

$$z_h = 2R_e + R_g = R_h. \quad (4.3)$$

У розрахунках з електробезпеки опір тіла людини приймають рівним 1000 Ом при напрузі дотику 50 В і більше та 6000 Ом при напрузі дотику меншій 42 В.

4.2 Залежність опору тіла людини від стану шкіри

Опір шкіри, а отже, і тіла в цілому значно зменшується при ушкодженні її рогового шару, наявності вологи на її поверхні, інтенсивному потовиділенні та забрудненні.

Ушкодження рогового шару – порізи, подряпини, садна й інші мікротравми – можуть знизити опір тіла людини до значення, близького до значення опору його внутрішніх тканин, що безумовно, збільшує небезпеку ураження людини струмом.

Зволоження шкіри знижує її опір навіть у тому випадку, якщо волога має значний питомий опір. Так, зволоження сухих рук сильно підсоленою водою знижує опір тіла на 30 – 50 %, а дистильованою водою – на 15 – 35 %. Пояснюється це тим, що волога, яка потрапила на шкіру, розчиняє мінеральні речовини і жирні кислоти, які перебувають на її поверхні, що виведені з організму разом з потом і шкірним салом, і шкіра стає більш електропровідною. При тривалому зволоженні шкіри роговий шар її розпушується, насичується вологою, у результаті чого його опір майже повністю втрачається [29].

Таким чином, робота вологими руками або в умовах, що викликають зволоження яких-небудь ділянок шкіри, створює передумови для більш важких наслідків у випадку потрапляння людини під напругу.

Потовиділення обумовлене діяльністю потових залоз, яких у людини близько 500 на 1 см² шкіри. Піт добре проводить електричний струм, оскільки до його складу входять вода й розчинені в ній мінеральні солі, а також деякі продукти обміну речовин. Виділення поту відбувається безупинно, навіть на холоді, але особливо інтенсивно при високій температурі навколишнього повітря, посиленій фізичній роботі, місцевому нагріванні шкіри, захворюванні людини тощо.

Отже, робота в умовах, що викликають посилене потовиділення, збільшує небезпеку ураження людини струмом.

Забруднення шкіри різними речовинами, що особливо добре проводять струм (металевий або вугільний пил, окалина тощо), супроводжується зниженням її опору, подібно до того, як це спостерігається при поверхневому зволоженні шкіри. Крім того, струмопровідні речовини, проникаючи у вивідні протоки потових і сальних залоз, створюють у шкірі довгостроково існуючі струмопровідні канали, що різко знижують її опір.

Таким чином, особи, у яких руки забруднюються струмопровідними речовинами, наражаються на більшу небезпеку ураження струмом, ніж особи, які працюють чистими сухими руками.

4.3 Модель процесу виникнення та формування виробничих небезпек при обслуговуванні обладнання на підстанції

Методикою оцінки рівня небезпеки робочих місць, машин, виробничих процесів та окремих виробництв передбачено пошук об'єктивного критерію рівня небезпеки для конкретного об'єкта [30]. Таким показником вибрано імовірність виникнення аварії, травми залежно від явища, яке досліджується.

Для побудови логіко-імітаційної моделі процесу, формування і виник-

нення аварії та травми у процесі обслуговування обладнання підприємства оцінюють відповідні небезпечні події. Кожній із них присвоємо імовірність виникнення. Імовірності виникнення представлено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Імовірності виникнення подій

Шифр	Назва події	Імовірність
P_1	Відсутність захисного заземлення	0,02
P_2	Пошкодження захисного заземлення	0,04
P_3	Спрацювання складових захисту	0,1
P_4	Неправильна експлуатація захисту	0,02
P_5	Відсутність профілактичних заходів	0,2
P_6	Відсутність захисного щита	0,12
P_7	Недотримання правил вибору взуття	0,15
P_8	Незнання правил техніки безпеки	0,1
P_9	Відсутність засобів індивідуального захисту	0,2
P_{10}	Легковажність	0,08

На основі представлений у таблиці подій будемо матрицю логічних взаємозв'язків між окремими пунктами, графічна інтерпретація якої представлена на рисунку 4.2.

Розрахуємо ймовірності виникнення подій, які формують логіко-імітаційну модель процесів створення мікрокліматичних умов. Розглянемо травмонебезпечну ситуацію, яка виникає за умови роботи працівників із електронебезпекою.

Для прикладу, підставивши дані ймовірностей базових подій у формулу, отримаємо ймовірність події 13:

$$P_{13} = P_1 + P_2 - P_1 \cdot P_2 = 0,2 + 0,4 - 0,2 \cdot 0,4 = 0,0592.$$

Аналогічним чином визначаємо ймовірності інших подій:

$$P_{11} = P_4 + P_5 - P_4 \cdot P_5 = 0,3 + 0,4 - 0,3 \cdot 0,4 = 0,118;$$

$$P_{12} = P_6 + P_7 - P_6 \cdot P_7 = 0,3 + 0,5 - 0,3 \cdot 0,5 = 0,252;$$

$$P_{16} = P_9 + P_{10} - P_9 \cdot P_{10} = 0,2 + 0,15 - 0,2 \cdot 0,15 = 0,264;$$

$$P_{14} = P_{11} \cdot P_5 = 0,118 \cdot 0,2 = 0,0236;$$

$$P_{15} = P_{12} \cdot P_8 = 0,252 \cdot 0,1 = 0,0252;$$

$$P_{17} = P_{13} + P_{14} - P_{13} \cdot P_{14} = 0,592 + 0,0236 - 0,592 \cdot 0,0236 = 0,0814;$$

$$P_{18} = P_{15} \cdot P_{16} = 0,264 \cdot 0,0252 = 0,0065;$$

$$P_{19} = P_{17} + P_{18} - P_{17} \cdot P_{18} = 0,0065 + 0,0814 - 0,0065 \cdot 0,0814 = 0,0873;$$

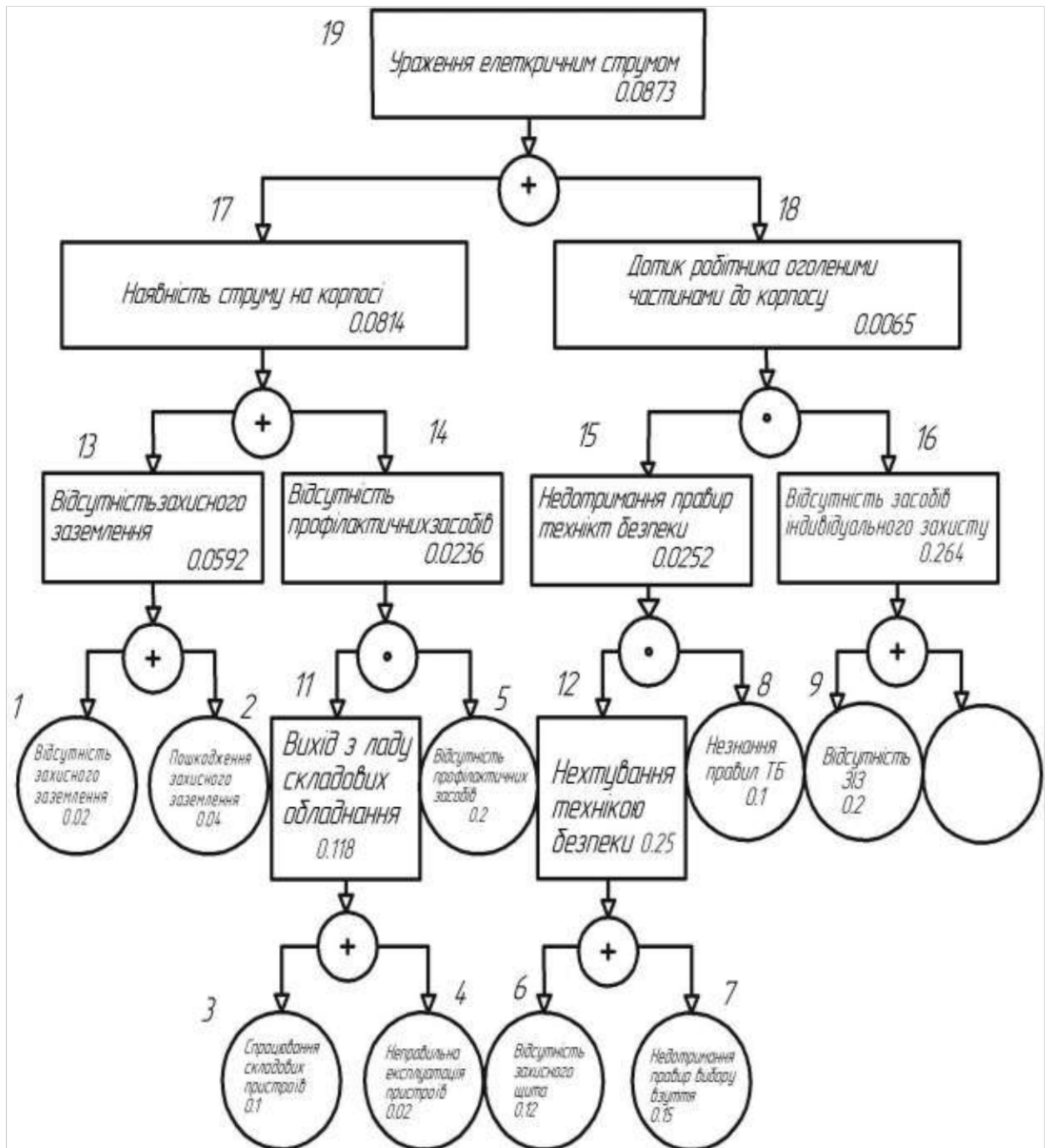


Рисунок 4.2 – Логіко-імітаційна модель процесу виникнення травми при обслуговуванні обладнання на підстанції

Відтак, бачимо, що імовірність ураження електричним струмом працівника є досить малою і становить $P_{19} = 0,0873$.

4.4 Розробка заходів із питань безпеки в надзвичайних ситуаціях

Для отримання достовірної інформації про стан довкілля, необхідно проводити постійний моніторинг навколишнього середовища. Це питання особливо гостро стоїть у період виникнення надзвичайних ситуацій (НС), коли треба надати необхідну інформацію населенню та органам влади для адекватних дій. Оцінка становища проводиться з метою своєчасного визначення необхідних заходів захисту та обґрунтованих рішень на проведення рятувальних та інших невідкладних робіт (РНР), а в разі потреби і евакуації населення з районів надзвичайних ситуацій [31].

Радіаційне становище – це сукупність наслідків радіоактивного забруднення (зараження) місцевості, які впливають на виробничу діяльність об'єктів господарської діяльності, дії сил (формувань) цивільної оборони при проведенні рятувальних та інших невідкладних робіт та життєдіяльність населення. Тобто основним уражаючим фактором при радіаційних аваріях є підвищені рівні радіації, що негативно можуть вплинути на здоров'я населення. Радіаційне становище характеризується масштабами (розмірами зон) і характером радіоактивного забруднення місцевості (рівнем радіації). Розміри зон радіоактивного забруднення та рівні радіації є основними показниками ступеня радіаційної небезпеки. Інтенсивність іонізуючого випромінювання на забруднених територіях залежить від кількості радіоактивної речовини, що осіла на місцевості в результаті аварії на АЕС та її ізотопного складу. Хімічне становище – це сукупність умов, які виникають на території міста, району або ОГД внаслідок аварії на хімічно-небезпечному об'єкті (ХНО) з викидом небезпечних хімічних речовин (НХР), які негативно впливають на довкілля і потребують проведення відповідних заходів для захисту населення. Характер становища при аваріях на ХНО з витіканням небезпечних хімічних речовин (НХР) і можливі наслідки залежать від масштабів і виду аварії, кількості викинутої речовини, її фізико-хімічних і токсичних властивостей, метеорологічних умов, умов зберігання та рельєфу місцевості. Основним ура-

жаючим фактором при хімічних аваріях є токсичний вплив небезпечних речовин. Методика прогнозування наслідків впливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті призначена для довгострокового (оперативного) і аварійного прогнозування масштабів зараження місцевості і приземного шару атмосфери небезпечними хімічними речовинами (НХР) при аваріях на хімічно-небезпечних об'єктах (ХНО) і транспорті, а також для визначення ступеня хімічної небезпеки ХНО і адміністративно-територіальних одиниць (АТО). Довгострокове (оперативне) прогнозування здійснюється заздалегідь для визначення можливих масштабів зараження, сил і засобів, які залучатимуться для ліквідації наслідків аварії, складання планів роботи та інших (довідкових) матеріалів. Прогнозування наслідків аварій на ХНО і транспорті здійснюється розрахунковим методом з нанесенням прогнозованих зон хімічного зараження на топографічну карту відповідного масштабу. Аварійне прогнозування здійснюється під час виникнення аварії за даними розвідки для визначення можливих наслідків аварії і порядку дій в зоні можливого зараження. Інженерне становище характеризується ступенем руйнування будівель, споруд, комунально-енергетичних мереж, обладнання на об'єкті або території внаслідок дії таких вражаючих факторів надзвичайних ситуацій, як ударна хвиля при вибухах, сейсмічні хвилі при землетрусах, гідравлічна хвиля при повені, швидкісний натиск при ураганах, тепловий вплив при пожежі і т. п. Ударна хвиля – зона стиснутого повітря, яка поширюється у всі сторони від центру вибуху з великою швидкістю, вище швидкості звуку.

Надлишковий тиск у будь-якій точці залежить від відстані до центра вибуху і маси продуктів вибуху. Ударна хвиля руйнує інженерні споруди, комунікації, дерева, завдає людям травм різного ступеня важкості. Пожежа – це неконтрольований процес горіння, наслідками якого можуть бути загибель людей і знищення матеріальних цінностей [31].

5 ТЕРМІН ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ОКУПНІСТЬ *HVDC*-ЛІНІЙ: ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ ВІД ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ

5.1 Термін експлуатації *HVDC*-систем

HVDC-системи зазвичай мають довгий термін експлуатації – від 40 до 50 років, залежно від їх умов експлуатації та обслуговування. Основні фактори, які забезпечують таку довговічність, включають [32]:

- зменшений вплив реактивних навантажень: завдяки прямій передачі постійного струму відсутні втрати на реактивну потужність, що знижує навантаження на конвертори та трансформатори;

- відсутність необхідності у постійному регулюванні частоти: оскільки *HVDC*-системи не залежать від синхронізації з частотою мережі, компоненти системи піддаються меншому навантаженню, що подовжує їхній строк служби.

Розрахунок загального терміну експлуатації таких систем може базуватися на показниках тривалості служби основних компонентів, до яких входять конвертори та трансформатори. Термін служби конверторних станцій, при належному обслуговуванні, становить близько 25 – 30 років до першої заміни чи капітального ремонту, що значно подовжує термін безперервної експлуатації.

5.2 Розрахунок строку окупності *HVDC*-ліній

Обчислимо строк окупності *HVDC*-систем на основі початкових капітальних витрат, щорічної економії на втрати енергії та витрати на обслуговування. Здійснити це можна використовуючи формулу [32]:

$$P = \frac{C_{\text{ПОЧ}}}{E_{\text{РІЧН}}}, \quad (5.1)$$

де $C_{\text{ПОЧ}}$ – початкові капітальні затрати, наприклад, 800 млн доларів для 1000 км лінії; $E_{\text{РІЧН}}$ – щорічна економія, яка включає зменшення втрат енергії та зниження експлуатаційних витрат.

Згідно даних представлених у доповідях, працях Міжнародної Ради з велики електричних систем *CIGRE*, за середньостатистичними оцінками зниження втрат у лініях постійного струму відбувається в середньому на 5% (економія близько 100 млн доларів на рік), а зниження витрат на обслуговування на 2 млн доларів щороку.

Відтак, здійснюємо наближене обчислення строку окупності:

$$P = \frac{800}{100 + 2} = 7,8 \text{ років.}$$

Бачимо, що капітальні витрати окуплюються приблизно за 8 років, після чого економія сприяє подальшому доходу.

5.3 Довгостроковий економічний ефект від зниження втрат

Після завершення строку окупності *HVDC*-система продовжує генерувати дохід завдяки економії на втраті енергії. Для прикладу, річна економія при потужності лінії 3000 МВт зі зменшенням втрат на 5 % складає близько 100 млн доларів на рік, або 3 – 4 млрд доларів за весь термін служби. Формула для обчислення загальної економії на втраті енергії виглядає так [32]:

$$E = L_{PICH} \cdot r \cdot T, \quad (5.2)$$

де L_{PICH} – щорічні втрати енергії у системі змінного струму на аналогічну відстань, наприклад, 200 млн доларів; r – зменшення втрат у *HVDC* порівняно з мережами змінного струму (5 %); T – загальний термін експлуатації (40 років).

Обчислимо значення загальної економії на втраті електроенергії:

$$E = 200 \cdot 0,05 \cdot 40 = 400 \text{ млн. дол.}$$

Така економія дає змогу значно знизити загальні витрати на енергетичну інфраструктуру.

Відомі *HVDC*-проекти, такі як «Інга – Шаба» та «Ріо – Мадейра», підтвердили економічну ефективність таких систем на великих відстанях. В обох

випадках окупність була досягнута завдяки економії на втраті енергії та зниженню витрат на обслуговування.

5.4 Резюме

Досвід впровадження *HVDC*-систем у світі підтверджує, що ці системи можуть бути економічно вигідним рішенням для передавання енергії на великій відстані. Завдяки високій ефективності, зниженим втратам енергії та меншій потребі в обслуговуванні, такі системи здатні забезпечити значну економію протягом десятиліть. Після досягнення окупності, що зазвичай займає 8 – 12 років, *HVDC*-системи приносять стабільний дохід та знижують ризики аварійного постачання енергії.

Довговічність *HVDC*-ліній дає змогу амортизувати капітальні витрати, забезпечуючи постійний фінансовий прибуток протягом десятиліть експлуатації. Чергово, це сприяє зниженню навантаження на енергетичні компанії, оскільки менша частина коштів спрямовується на обслуговування та відновлення мереж. До того ж, зниження втрат на передачу зменшує загальний обсяг виробленої енергії, що має позитивний вплив на екологію та сприяє збереженню природних ресурсів, особливо у випадках, коли джерела енергії є не відновлюваними.

Зважаючи на вищезгадані аргументи, *HVDC*-системи є стратегічно важливими для сучасної енергетики. Вони дають змогу енергетичним компаніям підтримувати баланс між витратами та ефективністю, сприяють стабільності постачання та допомагають оптимізувати інфраструктуру для зменшення економічних витрат. Цей економічний ефект робить *HVDC*-лінії вигідними для розвитку як промислових, так і віддалених споживачів, забезпечуючи їм якісне та стабільне енергопостачання протягом усього терміну експлуатації.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі представлено матеріали, які стосуються дослідження електромагнітних процесів у дальній електропередачі постійного струму. Отримані у роботі результати можна узагальнити такими висновками.

1. Розкрито питання передачі електричної енергії лініями електропередач постійного струму. Наведено конкретні приклади діючих дальніх електропередач у світі. Описано переваги та недоліки застосування ліній постійного струму порівняно із лініями змінного струму.

2. Представлено технічні рішення для передавання електричної енергії постійним струмом. Зокрема, наведено схеми електричних з'єднань перетворювальних підстанцій, які працюють на електропередачі постійного струму та описано принципи їх роботи. Також, викладено теоретичні основи увімкнення випрямних вентилів та відбору електричної потужності від ліній електропередач постійного струму.

3. Розроблено математичну модель довгої лінії електропередачі постійного струму для трьох режимів її роботи: режиму активно-індуктивного навантаження, режиму неробочого ходу та режиму короткого замикання. Розроблено алгоритм роботи на написано програмний код алгоритмічною мовою програмування *Visual Fortran*.

4. З допомогою розробленого програмного коду здійснено аналіз перехідних процесів у довгій лінії електропередачі для режиму навантаження, режиму неробочого ходу та режиму короткого замикання. Представлено просторові, часові та часово-просторові розподіли напруг і струмів у лінії у вигляді рисунків та проведено їх аналіз.

5. На основі середньостатистичних даних, здійснено економічне обґрунтування доцільності впровадження систем передачі електричної енергії постійним струмом. Також, у роботі розкрито питання охорони праці та захисту населення у надзвичайних ситуаціях.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Мілих В. І., Павленко Т. П. Електропостачання промислових підприємств: підручник для студентів електромеханічних спеціальностей. Харків: ФОП Панов А. М., 2016. 272 с.
2. Шкрабець Ф.П. Електропостачання: навч. посіб. Донецьк: НГУ, 2015. 540 с
3. Давиденко Л. В., Коменда Н. В., Давиденко В. А., Євсюк М. М. Електропостачання промислових об'єктів: практикум. Луцьк: ВІП ЛНТУ, 2022. 244 с.
4. <https://uk.wikipedia.org/wiki/>
5. Жежеленко І. В., Півняк Г. Г., Трофімов Г. Г., Папаїка Ю. А. Реактивна потужність в електричних мережах: монографія. Дніпро: НТУ«ДП», 2020. 72 с.
6. Аниськов О. В. Електропостачання промислових підприємств: конспект лекцій. Кривий Ріг: КТУ, 2010. 95 с.
7. Казанський С. В. Надійність електроенергетичних систем. Київ: КП, 2020. 67 с.
8. Іноземцев Г. Б., Козирський В. В. Оптимізаційні задачі в енергетиці сільського господарства. Київ: Видавничий центр НУБіП України, 2014. 172 с.
9. Шестеренко В. Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств. Вінниця: Нова книга, 2004. 656 с.
10. Базюк Т. М., Блінов І. В., Буткевич О. Ф., Денисюк С. П. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. 400 с.
11. Чабан А. В., Левонюк В. Р., Дробот І.М., Герман А.Ф. Математичне моделювання перехідних процесів у лінії Лехера в стані неробочого ходу. Електротехніка і електромеханіка. 2016, № 3. С. 30 – 35.
12. Клименко Б. В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Харків: Вид-во «Точка», 2012. 340 с.
13. <http://energetika.in.ua/ua/books/book-4/section-2/section-2/2-4>

14. Оцінка стану та реалізації концепцій розвитку «інтелектуальних» електромереж у світовій практиці [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/3.-SmartGrid.pdf>
15. Кирик В. В. Методи організації гнучких електричних систем Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 47 с.
16. Чорний О. П., Луговой А. В., Родькін Д. Й., Сисюк Г. Ю., Садовой О. В. Моделювання електромеханічних систем: підручник. Кременчук, 2001. 410 с.
17. Лазарев Ю. Ф. Моделювання динамічних систем у Matlab: електронний навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2011. 421 с.
18. Журахівський А. В., Кінаш Б. М., Пастух О. Р. Надійність електричних систем і мереж: навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. 280 с.
19. Новотарський М. А., Нестеренко Б. Б. Штучні нейронні мережі: обчислення. Київ: Ін-т математики НАН України, 2004. 408 с.
20. Вербицький Є. В. Мережі постійного і змінного струму з альтернативними джерелами енергії: навчальний посібник. Київ: 2022, КПІ ім. Ігоря Сікорського. 101 с.
21. Михайленко В. М., Терейковська Л. О., Терейковський І. А., Ахметов Б. Б. Нейромережеві моделі та методи розпізнавання фону в голосовому сигналі в системі дистанційного навчання: монографія. Київ: Компрінт, 2017. 252 с.
22. Жуйков В. Я., Денисюк С. П. Електричні процеси в електричних колах з ключовими елементами. Київ: ТЕКСТ, 2010. 264 с.
23. Соловей О. І., Розен В. П., Лега Ю. Г., Ситник О. О. Енергетичний аудит: навчальний посібник. Черкаси, 2005. 299 с.
24. Бардик Є. І., Лукаш М. П. Електрична частина станцій та підстанцій. Синхронні генератори: навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2008. 100 с.

25. Chaban A., Popena A., Szafraniec A., Levoniuk V. Including shield wires in the analysis of transient processes occurring in HVAC transmission lines. *Energies*. 2023. Vol. 16. Is. 23. P. 7870 – 7889.
26. Маляр В. С. Теоретичні основи електротехніки. Електричні кола : навч. посібник. Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2012. 312 с.
27. Чабан В. Електромагнетнеї кола: навч. посіб. Львів: Вид-во Тараса Сороки, 2011. 234 с.
28. Бойко В. С., Бойко В. В. Теоретичні основи електротехніки: підручник. Київ: ІВЦ Видавництво “Політехніка”, 2004. 272 с.
29. Панченко С. В., Акімов О. І., Бабаєв М. М. Електробезпека: підручник. Харків: УкрДУЗТ, 2018. 295 с.
30. Пістун І. П., Березовецький А. П., Тимочко В. О., Городецький І. М. Охорона праці (гігієна праці та виробнича санітарія). Львів: Тріада плюс, 2017. 620 с.
31. Касьянов М. А., Ревенко Ю. П., Тищенко Ю. А. Захист населення в умовах надзвичайних. Луганськ: Вид-во Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля., 2003. 183 с.
32. Федішин Б. П. Економіка енергетики: навчальний посібник. Тернопіль, 2003. 182 с.

ДОДАТКИ

Додаток А Текст розробленого програмного коду мовою Visual Fortran

```

PROGRAM TransmissionLine
  IMPLICIT NONE
  REAL :: dt, t, t_end
  REAL :: U, I ! Змінні для напруги і струму
  INTEGER :: iter, max_iter
  REAL, PARAMETER :: tol = 1.0e-6 ! Допустима похибка

  ! Ініціалізація початкових умов
  t = 0.0
  t_end = 10.0 ! Приклад кінцевого часу
  dt = 0.01 ! Крок інтегрування
  U = 0.0 ! Початкова напруга
  I = 0.0 ! Початковий струм

  ! Основний цикл інтегрування
  DO WHILE (t < t_end)
    ! Неявний метод Ейлера
    CALL ImplicitEulerStep(U, I, dt, tol, max_iter)

    ! Оновлення часу
    t = t + dt
    ! Запис результатів (опціонально)
    PRINT *, "t =", t, "U =", U, "I =", I
  END DO

  CONTAINS

  SUBROUTINE ImplicitEulerStep(U, I, dt, tol, max_iter)
    REAL, INTENT(INOUT) :: U, I
    REAL, INTENT(IN) :: dt, tol
    INTEGER, INTENT(IN) :: max_iter
    INTEGER :: iter
    REAL :: U_new, I_new

    ! Ініціалізація ітерацій
    U_new = U
    I_new = I

    ! Основний ітераційний процес
    DO iter = 1, max_iter
      ! Розрахунок значень для нового кроку
      ! (реалізація системи рівнянь методом Ньютона)

      ! Перевірка збіжності
      IF (ABS(U_new - U) < tol .AND. ABS(I_new - I) < tol) EXIT

      ! Оновлення значень для ітерації
      U = U_new
      I = I_new
    END DO
  END SUBROUTINE ImplicitEulerStep
END PROGRAM TransmissionLine

```