

□

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:

**«АНАЛІЗ КОМУТАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ЛІНІЇ
ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ 750 КВ»**

Виконав: студент VI курсу

групи Ен – 61 спеціальності

141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

_____ Розвєзєв О. Д.
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

Рецензент: _____ Сиротюк 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

Розв'язуєву Олександр Дмитровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Аналіз комутаційних процесів у лінії електропередачі 750 кВ»

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. Фізичні процеси дуги та перехідні процеси в електричних мережах

2. Розробка математичної моделі комутаційного пристрою

3. Аналіз комутаційних процесів у лінії електропередачі 750 кВ

4. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях

5. Економічний аналіз втрат від аварійних ситуацій

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>Розкриття теоретичних положень взаємодії фізичних процесів дуги з перехідними процесами у лініях електропередач</i>	12.09.2024 – 30.09.2021	
2	<i>Розробка математичної моделі вимикача для аналізу комутаційних процесів в електричних мережах</i>	1.10.2024 – 11.10.2024	
3	<i>Здійснення аналізу комутаційних процесів у лінії електропередачі надвисокої напруги</i>	14.10.2024 – 25.10.2024	
4	<i>Розробка логіко імітаційної моделі процесу виникнення травми при обслуговуванні механізму переміщення контактів</i>	28.10.2024 – 8.11.2024	
5	<i>Здійснення техніко-економічної оцінки збитків</i>	11.11.2024 – 22.11.2024	
6	<i>Завершення оформлення розрахунково-пояснювальної записки та презентації</i>	25.11.2024 – 29.11.2024	
7	<i>Завершення роботи в цілому</i>	2.12.2024 – 6.12.2024	

Студент _____ Розвєзєв О. Д.
(підпис) (прізвище та ініціали)

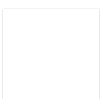
Керівник роботи _____ Левонюк В. Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

УДК 621.752:7

Розвезєв О. Д. Аналіз комутаційних процесів у лінії електропередачі 750 кВ. Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет природокористування, 2024 р. 58 с. текстової частини, 1 таблиця, 36 рисунків, 30 джерел.

У кваліфікаційній роботі представлено результати виконання аналізу комутаційних процесів у лінії електропередачі 750 кВ. Представлено теоретичні аспекти сумісної взаємодії фізичних процесів горіння дуги у вимикачі з перехідними електромагнітними процесами у лінії електропередачі, під час виконання комутацій. Розроблено математичну модель елегазового вимикача, яка призначена для дослідження комутаційних процесів в електричних мережах. Зокрема, на основі підходів аналітичної механіки, розроблено математичну модель механізму переміщення контактів вимикача та укладено еквівалентну схему його заміщення. Розроблено математичну модель фрагмента електричної мережі, ключовими елементами якої є вимикач та лінія електропередачі. Представлено аналіз комутаційних перехідних процесів у лінії електропередачі в аварійних режимах роботи. Розкрито питання впливу електричного струму на організм людини, зокрема розглянуто різні варіанти петель протікання електричного струму через організм людини. Здійснено економічний аналіз втрат від виникнення аварійної ситуації на лінії електропередачі при передачі потужності 1 МВт.

КОМУТАЦІЯ, ПРОЦЕС, ЛІНІЯ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ, ВИМИКАЧ,
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, АНАЛІЗ.



ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ ДУГИ ТА ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ.....	8
1.1 Процеси в електричних мережах.....	8
1.2 Власна перехідна відновлювальна напруга.....	11
1.3 Перехідна відновлювальна напруга у реальних мережах.....	15
2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ КОМУТАЦІЙНОГО ПРИСТРОЮ	19
2.1 Обґрунтування математичної моделі вимикача.....	19
2.2 Математична модель механізму переміщення контактів вимикача	21
2.3 Заступна схема вимикача.....	26
3 АНАЛІЗ КОМУТАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ 750 КВ.....	32
3.1 Розробка математичної моделі фрагмента електричної мережі.....	32
3.2 Аналіз комутаційних процесів у лінії електропередачі.....	34
3.2.1 Прийняті параметри фрагмента мережі.....	34
3.2.2 Перший експеримент.....	34
3.2.3 Другий експеримент.....	38
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	41
4.1 Вплив шляху струму на наслідок ураження електричним струмом	41
4.2 Вплив роду струму і його частоти на наслідок ураження.....	43
4.3 Модель процесу виникнення та формування виробничих небезпек під час обслуговування механізму переміщення контактів вимикача....	44
4.4 Розробка заходів із питань безпеки у надзвичайних ситуаціях.....	48
5 ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ВТРАТ ВІД АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ.....	50
5.1 Аварійні відмикання ліній електропередач.....	50
5.2 Економічна оцінка втрат від аварійних відмикань.....	51
5.3 Рекомендації для мінімізації втрат.....	52
ВИСНОВКИ.....	53
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	54
ДОДАТКИ.....	57
Додаток А Процедура отримання функції $\varphi(\Delta x_{fakt})$ та її апроксимації	57
Додаток Б Програмний код алгоритмічною мовою програмування C++	58

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасні енергетичні системи є основою економічного та соціального розвитку, забезпечуючи надійне та безперебійне постачання електроенергії для промисловості, транспорту та побутових споживачів. В умовах швидкого розвитку енергетичних технологій, а також збільшення попиту на електроенергію, питання надійності та ефективності роботи ліній електропередач стають все більш актуальними. Зокрема, особливу увагу привертають процеси комутації, які виникають під час увімкнення та вимкнення ліній високої напруги, а також у аварійних режимах роботи, таких як короткі замикання чи обриви ліній [1].

Комутаційні процеси є ключовими явищами в електроенергетичних системах, оскільки вони впливають на стабільність та надійність роботи мереж, а також на довговічність електрообладнання. У процесі комутації можуть виникати значні електромагнітні перевантаження, які впливають на елементи лінії електропередачі та інші компоненти енергосистеми. Особливої уваги заслуговують дослідження перехідних процесів, адже вони є основними причинами руйнування ізоляції, виникнення дугових пробоїв та інших негативних явищ, що суттєво впливає на експлуатаційні характеристики обладнання.

Основною кваліфікаційної роботи є детальний аналіз комутаційних процесів у високовольтній лінії електропередачі, зокрема вивчення механізмів виникнення та розвитку перехідних електромагнітних процесів, які відбуваються при комутації. У роботі також ставиться завдання розробки математичної моделі для моделювання комутаційних пристроїв та лінії електропередачі, що дасть змогу більш точно прогнозувати поведінку системи під час комутаційних операцій та аварійних режимів. Розроблена модель буде корисною для оптимізації параметрів комутаційного обладнання, таких як вимикачі та захисні пристрої, що дозволить зменшити ризики аварійних ситуацій та підвищити надійність функціонування енергосистеми. Окрім цього, аналіз комутаційних процесів є важливим інструментом для удосконалення

існуючих методів захисту ліній електропередач та мінімізації збитків, які можуть виникати внаслідок нештатних ситуацій. У кваліфікаційній роботі буде розглянуто ряд факторів, які впливають на комутаційні процеси, зокрема параметри лінії електропередачі, електричне навантаження, конструкцію та характеристики комутаційного обладнання [2].

Таким чином, **метою** кваліфікаційної роботи є аналіз комутаційних процесів у лінії електропередачі на основі розробленої математичної моделі фрагмента електричної мережі, ключовими елементами якої є вимикач та лінія електропередачі.

Щоб досягнути запропонованої мети потрібно виконати **завдання**:

- ✓ розкрити теоретичні аспекти взаємного впливу фізичних процесів під час горіння дуги у вимикачі та перехідних електромагнітних процесів у лінії електропередачі;
- ✓ розробити математичну модель вмикача надвисокої напруги, яка дає змогу враховувати механічні процеси у вимикачі;
- ✓ розробити математичну модель фрагмента електричної мережі, ключовим елементом якої є вимикач та лінія електропередачі;
- ✓ на основі розроблених математичних моделей здійснити аналіз комутаційних процесів у лінії електропередачі;
- ✓ здійснити економічний аналіз втрат від аварійної ситуації.

Об'єктом кваліфікаційної роботи є комутаційні процеси у лінії електропередачі.

Предметом кваліфікаційної роботи є розроблені математичні моделі вмикача надвисокої напруги та лінії електропередачі із зосередженими параметрами.

1 ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ ДУГИ ТА ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Відомо, що для простоти та розширення досліджуваного діапазону умов застосування вимикачів, зв'язок між ними та контурами електричних мереж бажано описувати мінімальною кількістю параметрів, таких як максимальна робоча напруга, струм навантаження та струм короткого замикання.

Не лише вимикач, а й конкретний електричний контур характеризується цими параметрами, і якщо вони знаходяться відносно граничних для вимикача чи мережі значень, то цей вимикач допустимо використовувати у всіх можливих умовах відмикання. Посилення вимог до надійності та економічності вимикачів призвело до необхідності більш ретельної перевірки такого простого підходу та додаткового дослідження граничних характеристик відмикальної здатності. Це вимагає глибшого розуміння процесів у дузі та у мережі. Навіть якщо ці параметри однакові, перехідні процеси у мережі можуть бути різними. Аналогічно, це справедливо і для вимикача. Подібні впливи можуть бути оцінені і для вимикача, якщо досліджуються контури електричних мереж та вимикач, а ще краще їх взаємодія [3].

1.1 Процеси в електричних мережах

Однією із операцій, для яких призначений вимикач, є відмикання тієї частини електричного контура, у якому відбулося КЗ, наприклад лінії (рисунок 1.1). Після сигналу від пристрою захисту, контакти вимикача розмикаються і виникає електрична дуга. За відповідних умов у дузі при проходженні струму через нуль відбувається його відмикання. Під час відмикання, у мережі виникає перехідний коливальний процес, внаслідок чого на вимикач впливає так звана перехідна відновлювальна напруга (ПВН). Якщо ця напруга занадто велика, то вимикач не зможе відімкнутися [4].

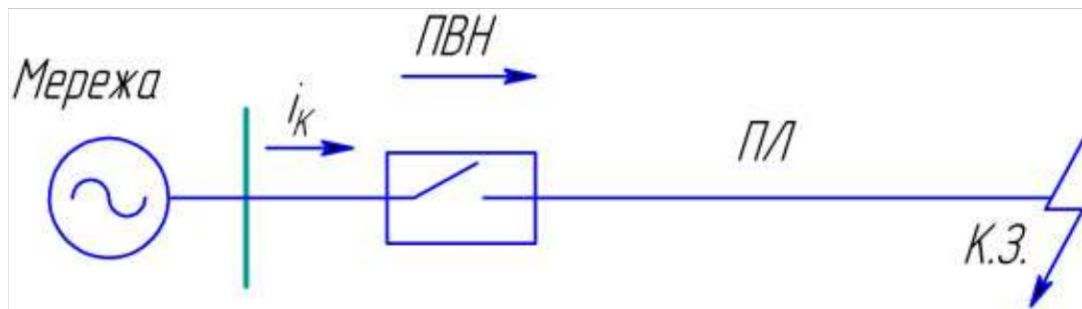


Рисунок 1.1 – Аналізований фрагмент мережі, у якому відбулося КЗ

Для сучасних вимикачів потрібно розрізняти два типи відмов, які істотно відрізняються одна від одної. Якщо відразу після переходу струму через нуль швидкість зростання перехідної відновлювальної напруги більша, ніж деяке критичне значення, дуговий канал, що розпадається, формується заново шляхом нагрівання при протіканні струму. Цей тип відмови вимикача, що характеризується балансом енергії у дузі, називається тепловим пробоем. Цей тип відмови ілюструється на рисунку 1.2, на якому представлено осцилограми напруги для елегазового вимикача в процесі відмикання струму 72 кА. Швидкість зростання перехідної відновлювальної напруги після переходу струму через нуль дорівнює приблизно 2 кВ/мкс.

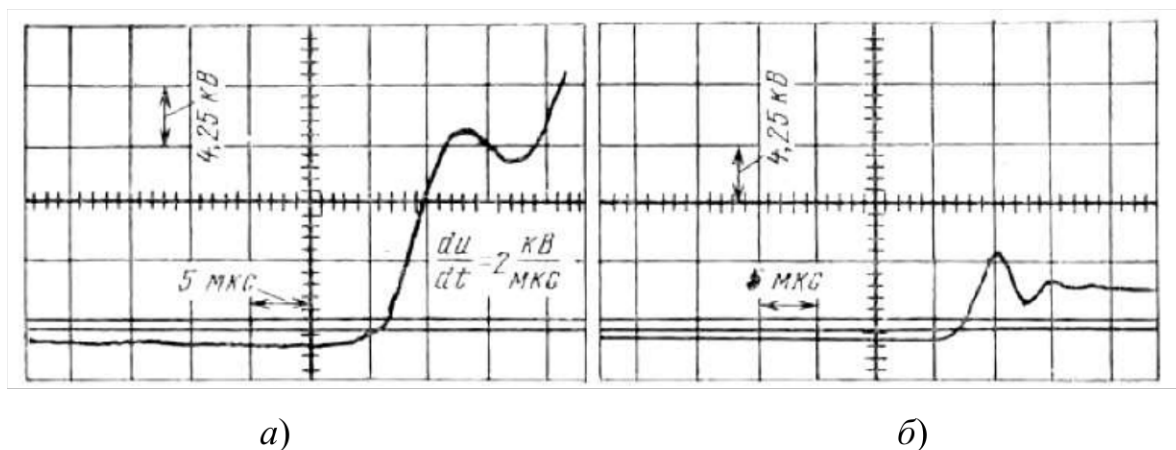


Рисунок 1.2 – Осцилограми напруг на контактах елегазового вимикача при відмиканні струму 72 кА [5]

На осцилограмі представлений на рисунку 1.2, а представлено успішне відмикання, а на рисунку 1.2, б – тепловий пробій. Приблизно через 2 мкс після переходу струму через нуль, крива напруги у другому випадку відхиляється від кривої перехідної відновлювальної напруги для випадку успішного відмикання, зменшуючись та досягаючи протягом кількох мікросекунд значення напруги горіння дуги.

Після успішного проходження тієї стадії процесу відмикання, на якій можливий тепловий пробій, перехідна відновлювальна напруга може досягти такого великого значення, що відмова відбудеться внаслідок електричного пробою проміжку.

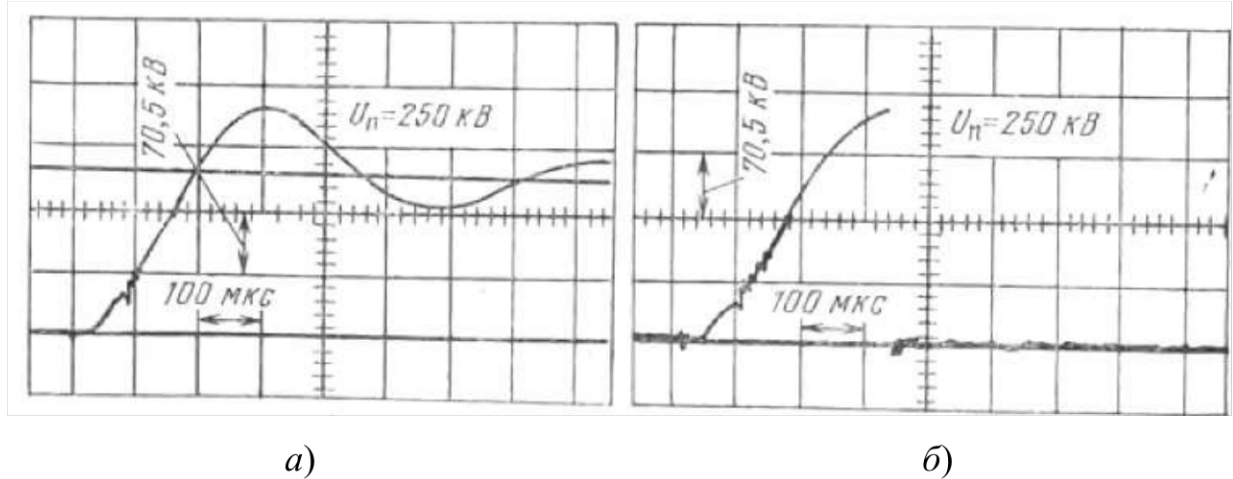


Рисунок 1.3 – Осцилограми напруг на контактах елегазового вимикача при відмиканні струму 52 кА [6]

На рисунку 1.3 представлено осцилограми напруги на вимикачі в такому режимі. Масштаби часу та напруги тут сильно зменшено порівняно з рисунком 1.2. На осцилограмі рисунка 1.3, *а* представлено успішне відмикання, а на осцилограмі рисунка 1.3, *б* – електричний пробій, який стався поблизу максимального значення напруги. Для електричного пробою типовим є дуже різкий спад напруги, швидкість якого не можна оцінити по осцилограмі. Ці два різних типи відмови переважно визначають область допустимих умов роботи вимикача.

З усіх можливих аварійних ситуацій найбільший інтерес становлять ті, у яких створюються найважчі умови відмикання, що характеризуються максимально можливим значенням параметрів: швидкістю зростання перехідної відновлювальної напруги du/dt , максимальним її значенням U_{II} та струмом короткого замикання I .

Досвід показує, що пробій при напругах, близьких до амплітудних, тобто електричний пробій, найчастіше відбувається у тих випадках, коли є коротке замикання на виводах вимикача. Тепловий пробій найчастіше відбувається тоді, коли місце короткого замикання знаходиться на деякій відстані

від вимикача. Найбільш жорсткі умови виникають при короткому замиканні на близьких відстанях до вимикача.

Перехідно відновлювальна напруга залежить від значення напруги на дузі та залишкового струму, який протікає через неї. Для того щоб характеризувати мережу незалежно від вимикача, вводиться поняття ідеального вимикача з нульовим падінням напруги до переходу струму через нуль і з нульовим залишковим струмом. Напруга, яка мала б відновлюватися на контактах такого вимикача, називається власною перехідною відновлювальною напругою. Сучасні вимикачі, особливо елегазові, підпадають впливу перехідної відновлювальної напруги лише в окремих випадках, наприклад на початковій стадії її зростання.

1.2 Власна перехідна відновлювальна напруга

Розглянемо зв'язок між параметрами схеми та двома основними параметрами U_{II} та $\partial u / \partial t$, які характеризують перехідну відновлювальну напругу. Ми розглянемо це на прикладі двох найпростіших схем. У багатьох випадках ці схеми з успіхом можуть бути використані для моделювання умов відмикання у більш складних мережах [7].

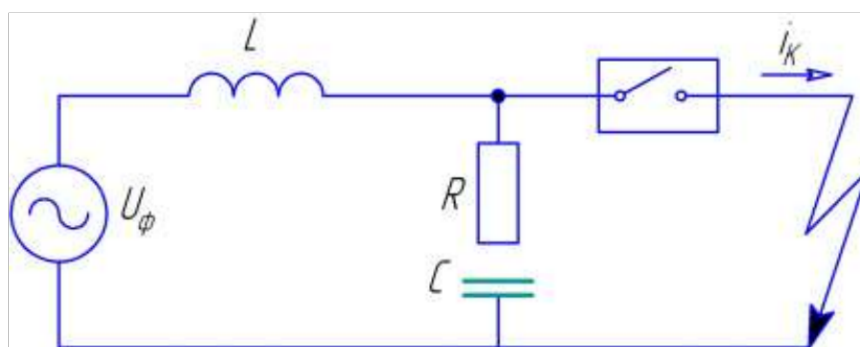


Рисунок 1.4 – Найпростіша схема для дослідження перехідної відновлювальної напруги

Схема представлена на рисунку 1.4, складається із джерела напруги, індуктивності частини контура між джерелом та місцем короткого замикання та приєднаної паралельно ємності із демпфуючим опором. У цій схемі струм, який відмикається I випереджає за фазою напругу джерела U_{ϕ} на 90° . Якщо

ця схема використовується для моделювання однофазного короткого замикання у трифазній системі, то $U_\phi = U_{M\phi} / \sqrt{3}$ ($U_{M\phi}$ – номінальна міжфазна напруга мережі). У загальному випадку до цього співвідношення повинен бути введений множник, який залежить від виду короткого замикання у трифазній системі.

У розглядуваній схемі перехідна відновлювальна напруга може бути легко обчислена за методом накладання:

$$i_k = \sqrt{2}I \sin \omega t, \quad I = \frac{U_\phi}{\omega L}, \quad R \ll \sqrt{L/C},$$

наближений розв'язок можна записати у вигляді

$$u = \sqrt{2}U_\phi (\cos \omega t - \exp(-t/\tau) \cos vt), \quad (1.1)$$

де

$$\tau = 2L/R, \quad v = 1/\sqrt{LC} = \omega \sqrt{S_k/S_C}, \quad (1.2)$$

де S_C – зарядна потужність ($S_C = \omega C U_\phi^2$); S_k – потужність КЗ ($S_k = U_\phi^2 / \omega L$).

Вигляд перехідної відновлювальної напруги, яка розрахована за формулою (1.1), представлено на рисунку 1.5.

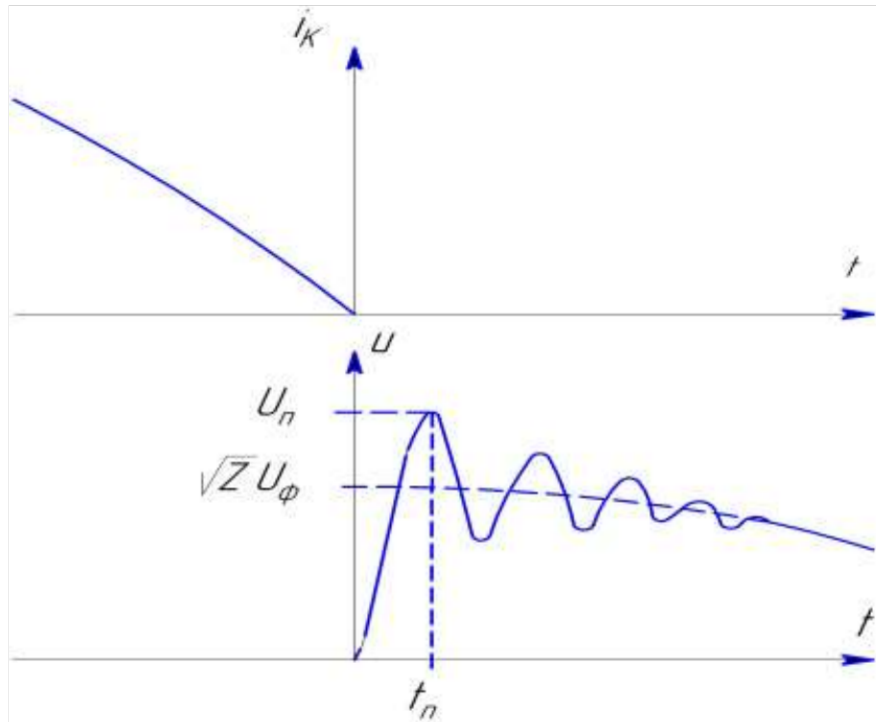


Рисунок 1.5 – Розрахункові криві струму та напруги на контактах вимикача при відмиканні струму за схемою на рисунку 1.4

Характерне для випадку електричного пробою максимальне значення перехідної відновлювальної напруги, як бачимо з (1.1), визначається виразом:

$$U_{II} = k\sqrt{2}U_{\phi}, \quad (1.3)$$

де k – коефіцієнт амплітуди, значення якого може змінюватися у межах від 1 до 2 і залежить від відношення L/R .

Схема, яка представлена на рисунку 1.4, часто використовується для відтворення умов короткого замикання на виводах вимикача. Вона дає змогу отримати усі характерні параметри перехідної відновлювальної напруги для широкого класу електричних мереж. Істотною особливістю розглянутої схеми є те, що максимальне значення перехідної відновлювальної напруги не залежить від струму, який відмикається. Слід зазначити, що у реальних мережах спостерігається слабка залежність амплітуди від струму короткого замикання.

Для моделювання перехідної відновлювальної напруги у перші кілька мікросекунд після переходу струму через нуль еквівалентна схема, представлена на рисунку 1.4 зазвичай недостатньо точна. Зазвичай, перехідна відновлювальна напруга при короткому замиканні на виводах вимикача має тимчасову затримку, зумовлену ємністю підстанції, внаслідок чого початкова швидкість росту перехідної відновлювальної напруги дуже мала.

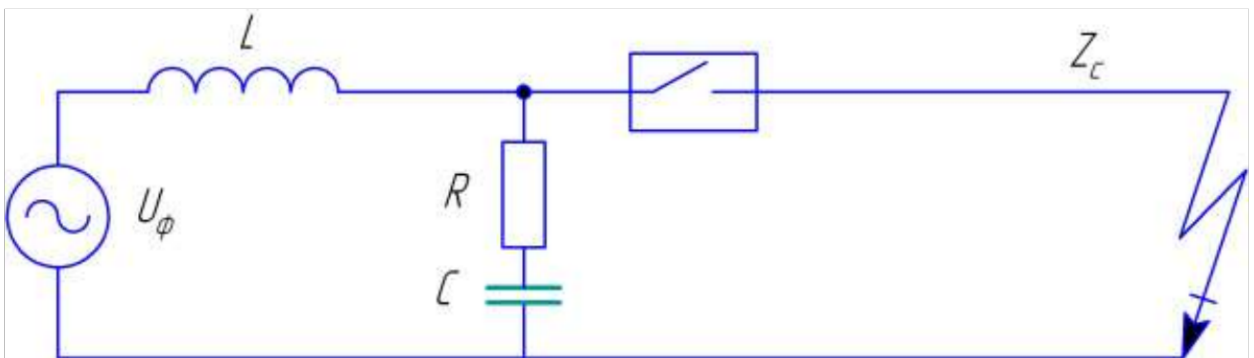


Рисунок 1.6 – Схема для аналізу перехідної відновлювальної напруги при невіддалених коротких замиканнях

Для моделювання невіддалених коротких замикань, схема на рисунку 1.4 має бути доповнена лінією, як це показано на рисунку 1.6.

Перехідна відновлювальна напруга у цій схемі зумовлена двома складовими: напругою зі сторони джерела u_D та напругою зі сторони лінії u_L .

Форма останньої визначається хвильовими процесами і при обліку відображення на кінцях лінії має вигляд трикутних коливань:

$$u_{\text{Л}} = \sqrt{2}IZ_C\omega t \quad \text{для} \quad 0 \leq t \leq 2l/c. \quad (1.4)$$

На рисунку 1.7 представлено складові перехідної відновлювальної напруги для випадку невіддаленого короткого замикання. Характерним є те, що значення складової перехідної відновлювальної напруги зі сторони джерела живлення першій ділянці лінійного наростання напруги малим. Тому, швидкість зростання перехідної відновлювальної напруги на інтервалі від нуля до приходу відбитої хвилі ($0 \leq t \leq 2l/c$) пропорційна струму короткого замикання [8]:

$$\frac{du}{dt} \approx \frac{du_{\text{Л}}}{dt} = Z_C \frac{di_{\text{к}}}{dt} = \sqrt{2}\omega Z_C I = \sqrt{2}\omega U_{\phi} \frac{S_{\text{к}}}{P_B}, \quad (1.5)$$

де c – швидкість поширення хвилі; P_B – величина, яка рівна U_{ϕ}^2 / Z_C .

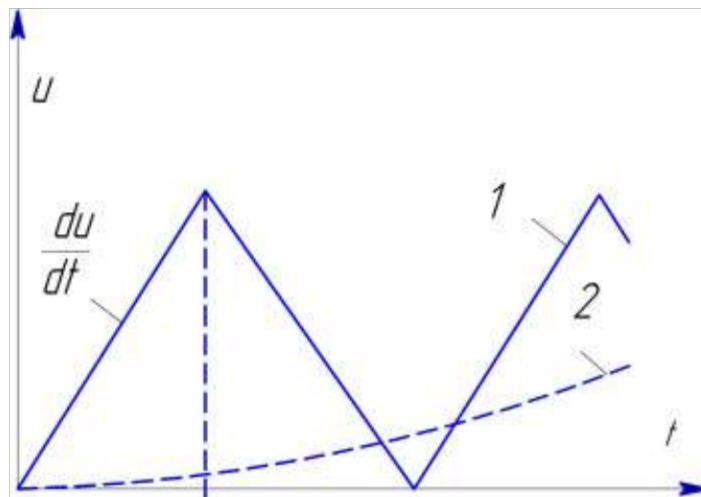


Рисунок 1.7 – Перехідна відновлювальна напруга для випадку невіддаленого короткого замикання: 1 – складова напруги зі сторони відмикальною лінії; 2 – складова напруги зі сторони джерела живлення.

Струм у випадку невіддаленого короткого замикання за рахунок додатково увімкненої лінії з індуктивністю $L_{\text{Л}}$ дещо менший, ніж при короткому замиканні на виводах вимикача.

Амплітуда перехідної відновлювальної напруги у цій схемі обчислюється лише складовою зі сторони джерела живлення, оскільки коливання з боку лінії згасають задовго до його настання (коефіцієнт амплітуди лінії зазвичай становить 1,5 – 1,7).

Легко можна показати, що перехідна відновлювальна напруга зі сторони джерела живлення визначається як:

$$u_D = \sqrt{2}U_\phi \left(\cos \omega t - \frac{L}{L + L_D} \exp(-t / \tau) \cos vt \right), \quad (1.6)$$

звідки бачимо, що амплітуда перехідної відновлювальної напруги у схемі, яка представлена на рисунку 1.6 зменшується порівняно з амплітудою у схемі наведеної на рис. 1.4.

Завершуючи аналіз цих, на перший погляд, простих схем можна зробити такі висновки. Амплітуда перехідної відновлювальної напруги в режимі короткого замикання на виводах вимикача більша, ніж при відмиканні невіддалених коротких замикань, що зазначалося вище. Зменшення напруги зумовлене зменшенням струму у режимі невіддаленого короткого замикання завдяки додатковій ділянці лінії, яка відмикається. З іншого боку, початкова швидкість зростання перехідної відновлювальної напруги, суттєва з точки зору теплового пробою, в режимі невіддалених коротких замикань є набагато більшою, ніж при коротких замиканнях на виводах вимикача, де характерне існування тимчасової затримки.

1.3 Перехідна відновлювальна напруга у реальних мережах

Реальні мережі відрізняються від розглянутих істотно більшою складністю. Визначення перехідної відновлювальної напруги у реальній мережі вимагає розв'язання наступних завдань [9]:

- ✓ визначення струму короткого замикання, який має бути відімкнений вимикачем;
- ✓ вибору відповідної розрахункової схеми для розрахунку перехідної відновлювальної напруги із використанням методу симетричних складових. У цій схемі повинна бути врахована структура мережі та її параметри при три-, дво- або однофазних замиканнях, різних відмикальним полюсах;
- ✓ власне обчислення перехідної відновлювальної напруги.

Якщо розглядається коротке замикання поблизу генератора, при визначенні струму через вимикач у момент гасіння дуги необхідно враховувати його загасаючу аперіодичну та періодичну компоненти (рисунок 1.8).

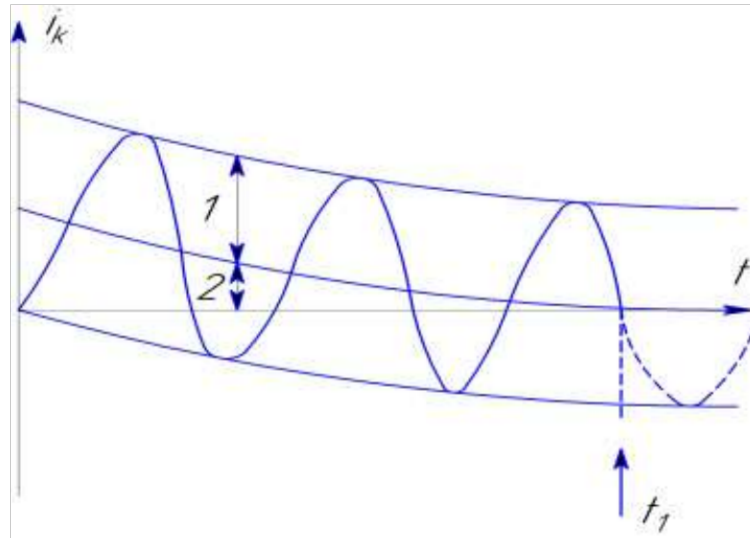


Рисунок 1.8 – Функціональна залежність струму короткого замикання:
1 – періодична складова; 2 – аперіодична складова.

Розв'язання другого із перелічених завдань вимагає творчого підходу. Реальна мережа є складною системою, яка складається із підстанцій, ліній, трансформаторів, генераторів, вимірювальних приладів, тощо. Перехідна відновлювальна напруга залежить від електромагнітного поля всієї системи, і моделювання цього поля еквівалентною схемою, що містить такі елементи, як лінії електропередачі, резистори, конденсатори, реактори, тощо, є лише деяким наближенням. Складність еквівалентної схеми залежить від конфігурації мережі, необхідної точності та відрізка часу, для якого потрібно моделювати перехідну відновлювальну напругу. Перехідна відновлювальна напруга являє собою суму електромагнітних коливань, зумовлених наявністю у схемі елементів із зосередженими параметрами та електромагнітних хвиль, які поширюються від вимикача до мережі зі швидкістю c . Оскільки ці хвилі відбиваються у місцях приєднання, радіус зони, що впливає на перехідну відновлювальну напругу, приблизно рівний $cT/2$. Якщо розглядати інтервал часу від моменту переходу струму через нуль до моменту наростання перехідної відновлювальної напруги до максимального значення, то всі елементи, які знаходяться у радіусі 200 – 400 км від вимикача, повинні братися до уваги [10].

Тому всі елементи контура у цій зоні повинні моделюватися з більшою точністю. Подібний розгляд призводить до надто великого радіусу обраної зони. Насправді зазвичай моделюється значно менша частина мережі. У цих випадках такі елементи, як лінії, що виходять із розглянутої зони, повинні закінчуватися елементами із зосередженими параметрами, що визначаються зовнішньою частиною контура, яка відсікається.

Незважаючи на велику складність, мережа у багатьох випадках може моделюватися простою схемою, представленою на рисунку 1.4 – принаймні в тих випадках, коли основний інтерес представляє перехідна відновлювальна напруга в області амплітудних значень. Тоді, завдання обчислення перехідної відновлювальної напруги полегшується до оцінки характерних значень U_ϕ , L , R , та C . Це може бути зроблено шляхом симетричних складових. Якщо $U_{M\phi}$ – номінальна міжфазна напруга мережі; L_1 , R_1 , та C_1 – параметри для прямої та зворотної послідовності, то легко можна одержати наступні значення для елементів схеми, яка представлена на рисунку 1.4 для першого відмикального полюса при трифазному замиканні без землі [11]:

$$U_\phi = \frac{1,5U_{M\phi}}{\sqrt{3}}, \quad R = 1,5R_1, \quad L = 1,5L_1, \quad C = C_1 / 1,5. \quad (1.7)$$

У даному випадку коефіцієнт фази k_ϕ , який характеризує умови для першого відмикального полюса, дорівнює 1,5.

Залежно від конфігурації мережі, її параметрів та умов короткого замикання, коефіцієнт фази k_ϕ може набувати значення від 0,5 до 1,5.

У загальному випадку амплітуда перехідної відновлювальної напруги визначається за формулою:

$$U_{II} = k_\phi k \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_{M\phi}. \quad (1.8)$$

При моделюванні перехідної відновлювальної напруги поблизу нуля струму потрібна велика точність, оскільки напруга всього у кілька кіловольт може істотно впливати в дуже короткому інтервалі часу, приблизно до 10 мкс

після нуля струму, на результат відмикання. Відповідно частина мережі, яка впливає на перехідну відновлювальну напругу, у цьому випадку істотно менша, ніж при розгляді перехідної відновлювальної напруги на інтервалі від переходу струму через нуль до максимального значення. Сюди входять підстанція, де розташований вимикач та частини усіх ліній електропередач, які відходять, довжиною до декількох кілометрів. Представлення власне підстанції має бути більш точним, ніж при дослідженні перехідних відновлювальних напруг поблизу максимальних значень. У цьому випадку використовується схема, представлена на рисунку 1.6. Важливим завданням є точне визначення Z_c . Частка складової перехідної відновлювальної напруги із боку джерела може бути різною, а ємності підстанції можуть дати затримку зростання перехідної відновлювальної напруги, яка обчислюється з рівняння (1.5) [12].

Нині існує необхідність покращання методики обчислення перехідної відновлювальної напруги у першу мікросекунду після нуля струму. Це так звана початкова частина перехідної відновлювальної напруги, яка визначається елементами, які знаходяться у безпосередній близькості від вимикача (тобто шинами). Тому, для точного обчислення перехідної відновлювальної напруги у першу мікросекунду після нуля струму потрібен облік впливу усіх цих елементів, а це можна зробити лише побудувавши математичну модель усього досліджуваного фрагмента електричної мережі.

2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ КОМУТАЦІЙНОГО ПРИСТРОЮ

2.1 Обґрунтування математичної моделі вимикача

В електромережах надвисокої напруги основним силовим комутаційним обладнанням виступають газові вимикачі. Раніше в них як робочий газ використовувалося повітря. Однак експлуатація повітряних вимикачів вимагає значних матеріальних витрат на обслуговування компресорної системи. Додатковими недоліками таких вимикачів є високий рівень шуму під час комутації та великі розміри [13].



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд вимикача АВВ типу LTV 362–800 (Т) Е4

Впровадження елегазу (шестифтористої сірки, SF_6) як ізолюючого середовища, відкрило нові можливості для створення сучасних електричних апаратів. Елегаз має не лише кращі ізоляційні властивості порівняно з повітрям, але й є інертним, нетоксичним та пожежобезпечним. Завдяки елегазу вимикачі мають менші розміри і є легшими в обслуговуванні. Їх активно встановлюють як на нових об'єктах, так і під час модернізації діючих підстанцій. Серед високовольтного комутаційного обладнання, вимикачі колонково-

го типу, розроблені компанією *Asea Brown Boveri Ltd.* (ABB), є одними з найпоширеніших в мережах з напругою від 110 до 750 кВ. Один із таких вимикачів на 750 кВ зображений на рисунках 2.1 та 2.2.

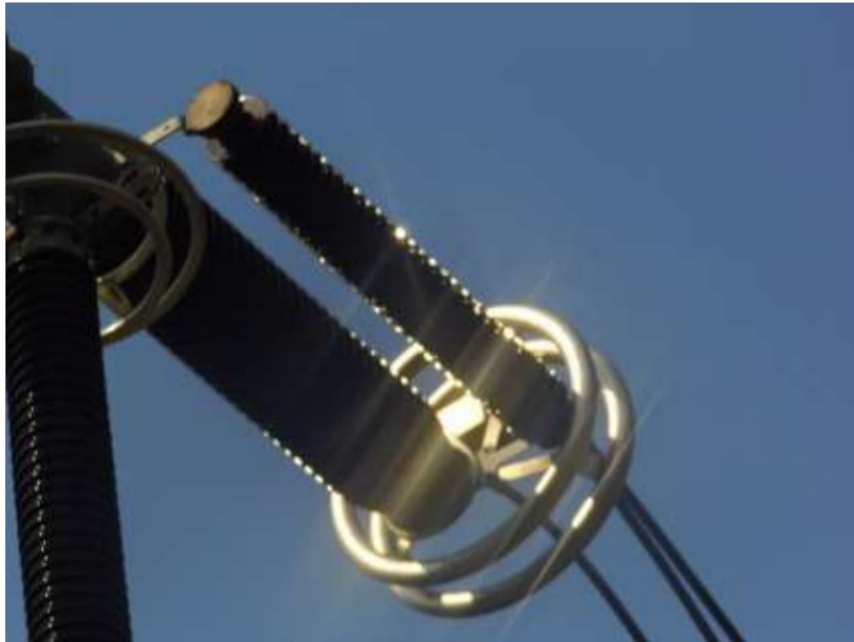


Рисунок 2.2 – Паралельне під'єднання конденсатора до контактів вимикача

У якості комутаційного елемента, для кваліфікаційної роботи, ми приймаємо елегазовий вимикач надвисокої напруги типу LTB 362–800 (T) E4 від компанії ABB, який широко використовується в електричних мережах України. Конструктивно кожна фаза вимикача складається з двох послідовно з'єднаних модулів, кожен з яких включає дві пари контактів, також з'єднаних послідовно. Для забезпечення рівномірного розподілу напруги між контактами, паралельно до них підключено конденсатори (див. рисунки 2.1 та 2.2).

Для побудови математичної моделі такого складного електротехнічного пристрою як елегазовий вимикач, ми здійснимо його декомпозицію на механічну та електричну частини. Це потрібно здійснити, адже перебіг електричних процесів у вимикачі, а це горіння дуги під час розмикання чи замикання контактів спричиняється механічним переміщенням контактів за допомогою спеціального механізму. Процеси, які протікають у цьому механізмі носитимуть механічний характер. Отже, загалом у вимикачі будуть протікати електромеханічні процеси [14].

Цілком очевидно, що у дугогасильних камерах, в яких відбувається переміщення контактів та горіння дуги відбуються й інші процеси, зокрема теплові, гідравлічні, пневматичні. Відтворення цих процесів є складною задачею, тому ми ними нехтуємо. Поясненням цього є відсутність необхідності урахування їх, адже основний акцент у роботі ставиться на моделювання комутаційних процесів у мережі, а не моделювання вимикача. Тому, далі окремо розглянемо розробку математичної моделі механізму переміщення вимикача та математичної моделі електричної частини, які будуть пов'язані між собою через опір дуги, який чергово змінюватиметься внаслідок переміщення контактів вимикача.

2.2 Математична модель механізму переміщення контактів вимикача

Раніше згадувалося, що на процес горіння дуги впливають механічні процеси у вимикач. Цілком очевидно, що найбільший вплив має відстань між контактами вимикача, яка залежить від швидкості їх розходження. Тут варто згадати, що необхідний для гасіння дуги тиск елегазу в автокомпресійних дугогасильних камерах створюється механічним способом. Тому вимикачі з такими камерами вимагають потужного приводу, щоб механізм міг переміщувати контакти, долаючи створюваний тиск газу для успішного вимкнення струмів короткого замикання, забезпечуючи при цьому належну швидкість руху контактів. Підвищений тиск чинить значний опір їхньому руху, що призводить до коливальних процесів у механізмі переміщення контактів [15]. Ці коливання подовжують час повного роз'єднання контактів (час горіння дуги), що негативно впливає на контакти та може пошкодити дугогасильні камери. Крім того, сама дуга та процеси у дугогасильних камерах впливають на роботу механізму руху контактів, тобто дугові та механічні процеси взаємопов'язані. Опис цих процесів є складним завданням. Наприклад, у дослідженні [15], представленому в 2006 році на Міжнародній раді з великих еле-

ктричних систем високої напруги (CIGRE) у Парижі, рух контактів описаний як функція часу (див. рисунок 2.3).

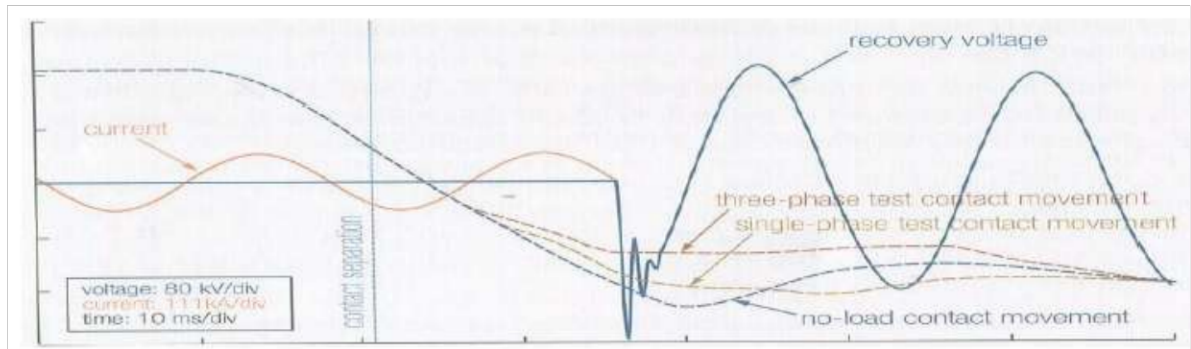


Рисунок 2.3 – Механічні та електричні процеси у вимикачі [15]

Такий підхід є доцільним, якщо характеристика руху контактів відома заздалегідь. Проте в більшості випадків вона залишається невідомою і потребує експериментального визначення, що практично неможливо для вимикачів надвисокої напруги. Тому, виникає необхідність розробити математичну модель механізму переміщення контактів вимикача.

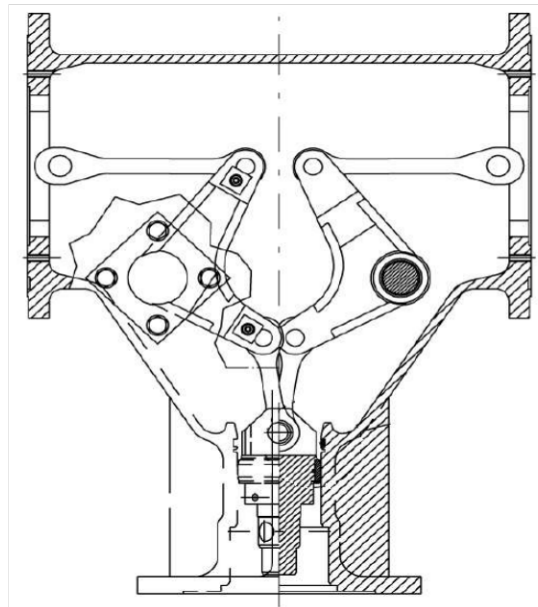


Рисунок 2.4 – Дезаксіальний механізм переміщення контактів вимикача типу ЛТВ 362–800 (Т) Е4

Конструктивно вимикач ЛТВ 362–800 (Т) Е4 складається з декількох послідовно розташованих модульних дугогасильних камер, у яких рух контактів відбувається синхронно, що забезпечує їх розривання [16]. Переміщення контактів цього вимикача здійснюється за допомогою механізму, зображено-

го на рисунку 2.4. Він містить два кривошипно-шатунні механізми, симетрично розташовані відносно поздовжньої осі всього механізму. Привід механізму забезпечується пружиною (на рисунку не показано).

Кінематичну схему кривошипно-шатунного механізму наведено на рисунку 2.5. Особливістю цього механізму є те, що вісь руху контактів і вісь привідної пружини не збігаються з віссю центру кривошипно-шатунного механізму. У техніці такий тип механізму називають дезакасіальним.

Використання дезакасіального кривошипно-шатунного механізму дозволяє зменшити розміри механізму, оптимізувати компоновку, знизити рівень шуму, вагу і кількість компонентів [17]. Однак, незважаючи на ці переваги, наявність дезакасажу значно ускладнює опис процесів, що відбуваються в механізмі [18]. Наприклад, для опису роботи механізму неможливо застосувати відому теорему про миттєвий центр швидкостей. Тому ми будемо створювати математичну модель механізму переміщення контактів на основі методів аналітичної механіки.

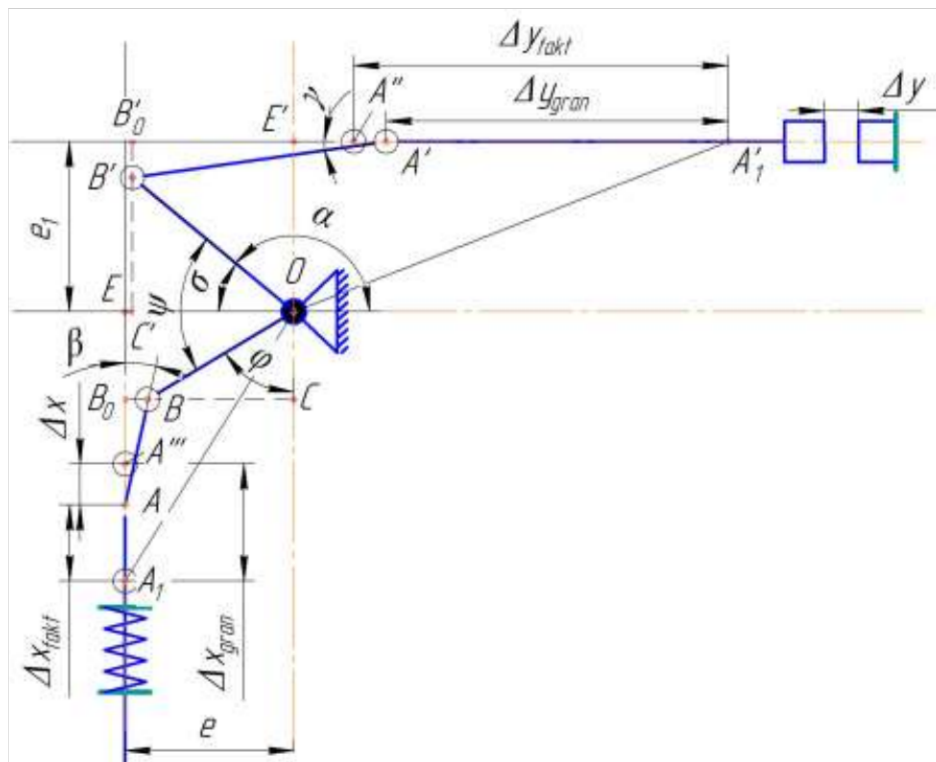


Рисунок 2.5 – Кінематична схема механізму переміщення контактів

Для обчислення відстані між контактами вимикача можемо скористатися формулою (див. рисунок 2.5):

$$\Delta y = \Delta y_{fakt} - \Delta y_{gran}, \quad (2.1)$$

де Δy_{fakt} – відстань, яка появляється внаслідок руху точки A' у точку A'' (до початку руху контактів $\Delta y_{fakt} = \Delta y_{gran}$).

Тепер, можемо записати формулу для знаходження Δy_{fakt} (див. рисунок 2.5):

$$\Delta y_{fakt} = |E'A'_1| - |E'A'| \equiv |A'A'_1|, \quad (2.2)$$

де

$$|E'A'_1| = \sqrt{(|OB'| + |B'A'|)^2 - e_1^2}, \quad |E'A'| = |B'_0A'| - |B'_0E'|; \quad (2.3)$$

$$|B'_0E'| \equiv |C'O| = |OB'| \cos \sigma, \quad |B'_0A'| = |B'A'| \cos \gamma. \quad (2.4)$$

Якщо підставити вирази із (2.4) у другий вираз у (2.3), а отриманий результат у формулу (2.2), одержимо:

$$\Delta y_{fakt} = \sqrt{(|OB'| + |B'A'|)^2 - e_1^2} - [|B'A'| \cos \gamma - |OB'| \cos \sigma]. \quad (2.5)$$

Якщо проаналізувати формулу (2.5) легко бачити, що у ній є невідомі значення $\cos \gamma$ і $\cos \sigma$. Здійснимо пошук згаданих значень використовуючи рисунок 2.5:

$$\sigma = 180 - \alpha, \quad \alpha = 270 - (\varphi + \psi), \quad \sigma = (\varphi + \psi) - 90^\circ; \quad (2.6)$$

$$|C'B'| = |OB'| \sin \sigma = e_1 - |B'A'| \sin \gamma. \quad (2.7)$$

Отже

$$\sin \gamma = \frac{|OB'| \sin \sigma - e_1}{-|B'A'|}. \quad (2.8)$$

Згідно з тригонометричними формулами, формулу (2.8) можемо записати так:

$$\cos \gamma = \sqrt{1 - \left[\frac{|OB'| \sin \sigma - e_1}{-|B'A'|} \right]^2}. \quad (2.9)$$

Якщо підставити третю формулу з (2.6) і формулу (2.9) у (2.5) одержимо:

$$\Delta y_{fakt} = \sqrt{(|OB'| + |B'A'|)^2 - e_1^2} -$$

$$- \left[|B'A'| \sqrt{1 - \left[\frac{|OB'| \sin((\varphi + \psi) - 90^\circ) - e_1}{-|B'A'|} \right]^2} - |OB'| \cos((\varphi + \psi) - 90^\circ) \right]. \quad (2.10)$$

Формула (2.10) дає змогу обчислити значення відстані між контактами вимикача, при відомому значенні кута φ . Очевидно, що кут φ повинен залежати від Δx . Представимо процедуру пошуку цього кута.

Формула для знаходження Δx_{fakt} (див. рисунок 2.5) виглядає так:

$$\Delta x_{fakt} = |EA_1| - |EA| \equiv |AA_1|, \quad (2.11)$$

де

$$|EA_1| = \sqrt{(|BO| + |AB|)^2 - e^2}, \quad |EA| = |B_0A| + |B_0E|; \quad (2.12)$$

$$|B_0E| \equiv |CO| = |BO| \cos \varphi, \quad |B_0A| = |AB| \cos \beta. \quad (2.13)$$

Якщо підставити формули із (2.13) в другу формулу (1.12), а отриманий результат у (2.11), одержимо:

$$\Delta x_{fakt} = \sqrt{(|BO| + |AB|)^2 - e^2} - [|BO| \cos \varphi + |AB| \cos \beta]. \quad (2.14)$$

Проаналізувавши формулу (2.14) бачимо, що у ній є невідомі значення $\cos \varphi$ та $\cos \beta$. Відповідно до рисунка 2.5, можемо записати вираз:

$$|CB| = |BO| \sin \varphi = e - |AB| \sin \beta. \quad (2.15)$$

Одже

$$\sin \beta = \frac{|BO| \sin \varphi - e}{-|AB|}. \quad (2.16)$$

Згідно з тригонометричними формулами можемо записати:

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \left[\frac{|BO| \sin \varphi - e}{-|AB|} \right]^2}. \quad (2.17)$$

Якщо підставити формулу (2.17) в формулу (2.14) одержимо:

$$\Delta x_{fakt} = \sqrt{(|BO| + |AB|)^2 - e^2} - |BO| \cos \varphi - |AB| \sqrt{1 - \left[\frac{|BO| \sin \varphi - e}{-|AB|} \right]^2}. \quad (2.18)$$

Проаналізувавши формулу (2.18) легко бачити, що і ній є невідоме значення Δx_{fakt} . Відповідно до рисунка 2.5 Δx_{fakt} можна визначити так:

$$\Delta x_{fakt} = \Delta x_{gran} - \Delta x. \quad (4.19)$$

Формула (2.18) є залежністю $\Delta x_{fakt}(\varphi)$. Нам для формули (2.10) потрібна обернена залежність. Проте, отримати аналітично цю залежність неможливо через корінь квадратний у формулі (2.18). Ми знайшли цю залежність таким чином. Для початку нами було графічно побудовано залежність $\Delta x_{fakt}(\varphi)$. Після цього, було побудовано обернену залежність $\varphi(\Delta x_{fakt})$ та одержано її табличні значення. Використовуючи апроксимацію функції $\varphi(\Delta x_{fakt})$, яка задана таблично, поліноміальною функцією, одержано:

$$\begin{aligned} \varphi = & -250024\Delta x_{fakt}^6 + 169265\Delta x_{fakt}^5 - 45136\Delta x_{fakt}^4 + \\ & + 6044\Delta x_{fakt}^3 - 427,4\Delta x_{fakt}^2 + 22,78\Delta x_{fakt} + 0,6194. \end{aligned} \quad (2.20)$$

Графічна побудова функції $\Delta x_{fakt}(\varphi)$ та її оберненої функції $\varphi(\Delta x_{fakt})$ з її апроксимацією поліноміальною залежністю представлено у Додатку А.

2.3 Заступна схема вимикача

Для дослідження перехідних процесів у електричних колах з наявністю дуги першочергово необхідно вибрати математичну модель дуги для подальшого використання її як нелінійного елемента. Відомо, що електрична дуга є видом газового розряду, який виникає між електродами в частково іонізованому середовищі, що містить нейтральні атоми, молекули газів, пари матеріалу електродів, вільні електрони та позитивні іони, утворені під час іонізації газів.

З позиції електротехнічного аналізу, дуга виступає елементом, що перетворює електричну енергію на теплову. Однак її властивості є специфічними,

оскільки радіус провідного каналу дуги не є постійним, а залежить від струму, що зумовлює нелінійну вольт-амперну характеристику (ВАХ) дуги.

Взаємодія між електричним контуром та дугою проявляється у зміні провідності дуги з часом. Провідність дуги визначає напругу на ній та залишковий струм, впливаючи на перехідну відновну напругу (ПВН). Адекватне математичне представлення дуги у вимикачі є критично важливим для моделювання цієї взаємодії.

Урахування дугових процесів під час комутації у вимикачі надвисокої напруги є складним завданням, тому ми враховуємо їх наближено, представляючи дугу активним опором із нелінійною характеристикою, спираючись на працю. Згідно з нею, внутрішня енергія стовпа дуги пов'язана з його електричним опором експоненційною залежністю, і стани з однаковою енергією є електрично еквівалентними, оскільки коло реагує лише на зміну опору. Цю теорію підтверджено в дослідженні, де зазначено, що в схемах заміщення дугогасильні пристрої елегазових вимикачів можна моделювати як нелінійний активний опір між контактами. Параметри цього опору визначаються характеристиками мережі, дугогасильного пристрою та механізму руху контактів. Гасіння дуги є перехідним процесом, під час якого опір зростає від початкового малого значення до практично безмежного зі збільшенням міжконтактного проміжку, а на контактах відновлюється напруга мережі.

Якщо розглянути детальніше дугові процеси в міжконтактному проміжку вимикача, можна зазначити, що для кожного невеликого проміжку Δx існує своя вольт-амперна характеристика дуги. Це ускладнює задачу, адже потребує врахування двовимірних параметрів системи, тому ми використовуємо спрощений підхід, не враховуючи динаміку приелектродних спадів напруг, оскільки їхні значення майже не залежать від струму.

Як зазначалося раніше, кожна фаза вимикача складається з двох послідовно з'єднаних модулів, кожен із яких має дві пари послідовних контактів,

паралельно до яких підключено конденсатори для рівномірного розподілу напруги між розривами при будь-якій частоті відновлюваної напруги.

На рисунку 2.6 наведено заступну електричну схему вимикача. За умови, що всі активні опори мають однакові нелінійні характеристики, а ємності однакові, параметри еквівалентних елементів цієї схеми (див. рисунок 2.7) можна визначити наступним чином: $r_D = 4r_{DR}$, $C_V = C_{VR} / 4$.

Для підтвердження еквівалентності заступної схеми вимикача застосуємо основи теорії електричних кіл та диференціального числення. Це дозволить показати, що спрощена схема коректно описує електричні процеси у вимикачі, зберігаючи необхідні параметри та характеристики системи [19].

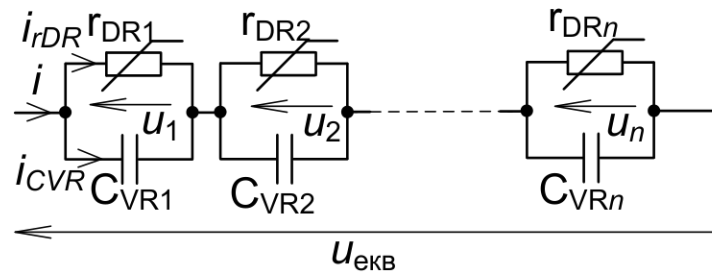


Рисунок 2.6 – Електрична схема заміщення вимикача

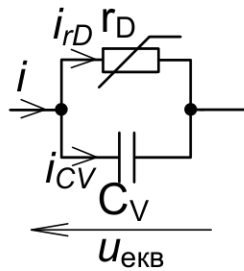


Рисунок 2.7 – Еквівалентна електрична схема заміщення вимикача

Оскільки $C_{VR1} = C_{VR2} = C_{VRn} = C_{VR}$, та $r_{DR1} = r_{DR2} = r_{DRn} = r_{DR}$, то $u_1 = u_2 = u_n = u$. Відповідно до теорії електричних кіл, для схем, які представлені на рисунках 2.6 та 2.7, можемо записати:

$$u_{екв} = u \cdot n; \quad (2.21)$$

$$i = i_{rDR} + i_{CVR} \Rightarrow C_{VR} \frac{du}{dt} + \frac{u}{r_{DR}}; \quad (2.22)$$

$$i = i_{CV} + i_{rD} \Rightarrow C_V \frac{du_{екв}}{dt} + \frac{u_{екв}}{r_D}, \quad (2.23)$$

де n – кількість розривів у вимикача.

Якщо прирівняти праві частини формул (2.22) та (2.23) враховуючи (2.21), одержимо:

$$C_{VR} \frac{du}{dt} + \frac{u}{r_{DR}} = nC_V \frac{du}{dt} + \frac{n \cdot u}{r_D}. \quad (2.24)$$

Згідно з теорією диференціальних рівнянь, два диференціальних рівняння можуть бути рівні тоді та лише тоді, коли є рівними їхні коефіцієнти.

Відтак, одержимо:

$$C_{VR} = nC_V \quad \Rightarrow \quad C_V = \frac{C_{VR}}{n}; \quad (2.25)$$

$$\frac{1}{r_{DR}} = \frac{n}{r_D} \quad \Rightarrow \quad r_D = r_{DR}n. \quad (2.26)$$

Далі репрезентуємо, що при умові однакових параметрів схеми заміщення вимикача, між розривами розподіл напруги буде теж однаковий.

Приймаємо, що $n = 2$. Відтак, можемо записати:

$$u_1 + u_2 = u_{екв}; \quad (2.27)$$

$$u_1 = i_{rDR1}r_{DR}, \quad u_2 = i_{rDR2}r_{DR}; \quad (2.28)$$

$$i_{rDR1} = i - i_{CVR1}, \quad i_{rDR2} = i - i_{CVR2}; \quad (2.29)$$

$$i_{CVR1} = C_{VR} \frac{du_1}{dt}, \quad i_{CVR2} = C_{VR} \frac{du_2}{dt}. \quad (2.30)$$

Якщо підставити формулу (2.28) у (2.27) враховуючи (2.29) та (2.30) будемо мати:

$$\left(i - C_{VR} \frac{du_1}{dt} \right) r_{DR} + \left(i - C_{VR} \frac{du_2}{dt} \right) r_{DR} = u_{екв}. \quad (2.31)$$

Припустимо, що $u_1 = u_2$, то це означає:

$$\left(i - C_{VR} \frac{du_1}{dt} \right) r_{DR} - \left(i - C_{VR} \frac{du_2}{dt} \right) r_{DR} = 0 \Rightarrow \left(i - C_{VR} \frac{du_1}{dt} \right) r_{DR} = \left(i - C_{VR} \frac{du_2}{dt} \right) r_{DR}; \quad (2.32)$$

$$ir_{DR} - r_{DR}C_{VR} \frac{du_1}{dt} = ir_{DR} - r_{DR}C_{VR} \frac{du_2}{dt}. \quad (2.33)$$

Аналогічно, що якщо коефіцієнти двох диференціальних рівнянь є рівними, то ці два диференціальні рівняння є теж рівними. Відтак, будемо мати:

$$\frac{du_1}{dt} = \frac{du_2}{dt}. \quad (2.34)$$

Якщо про інтегрувати вираз (2.34) від 0 до t , одержимо:

$$\int_0^t \frac{du_1}{dt} d\tau = \int_0^t \frac{du_2}{dt} dt \Rightarrow u_1(\tau) \Big|_0^t = u_2 \Big|_0^t \Rightarrow u_1(t) - u_1(0) = u_2(t) - u_2(0). \quad (2.35)$$

Коли конденсатор розряджений, то початкові напруги $u_1(0) = 0$ та $u_2(0) = 0$. Оскільки конденсатор підключений паралельно до опору, то $u_1(0) = u_2(0) = 0$, що означає $u_1 = u_2$. Таким чином, співвідношення (2.25) та (2.26) для перехідних процесів буде справедливим лише за умови розрядженого конденсатора. У нашому випадку це виконується, оскільки конденсатори зашунтовані опорами (див. рисунки 2.6, 2.7). Якщо ж конденсатори мають різні початкові заряди, то стверджувати істинність наведених рівнянь є неправомірно.

Аналізуючи наведений матеріал, бачимо, що частотні характеристики заступної електричної схеми вимикача та її еквівалентної схеми будуть ідентичними. Кожен розрив у схемі шунтується конденсатором ємністю 1600 пФ [20], отже, еквівалентна ємність на полюс становить 400 пФ.

Для апроксимації залежності $r_D(\Delta y)$ (рисунок 2.8) ми застосували кубічні інтерполяційні сплайни, що дозволило отримати функції, які описують еквівалентний опір міжконтактного проміжку для відповідних інтервалів розходження контактів вимикача.

$$r_{D_{0 \div 0,01}} = 0,1 + 21990 \Delta y_{0 \div 0,01}; \quad (2.36)$$

$$r_{D_{0,01 \div 0,02}} = 220 + 21990(\Delta y_{0,01 \div 0,02} - 0,01) + 8,01 \cdot 10^7 (\Delta y_{0,01 \div 0,02} - 0,01)^3; \quad (2.37)$$

$$r_{D_{0,02 \div 0,07}} = 520 + 46020(\Delta y_{0,02 \div 0,07} - 0,02) + 2,403 \cdot 10^6 (\Delta y_{0,02 \div 0,07} - 0,02)^2 +$$

$$+ 3,6886 \cdot 10^{10} (\Delta y_{0,02 \div 0,07} - 0,02)^3. \quad (2.38)$$

Залежності, зображені на рисунку 2.8, спершу демонструють повільне зростання (моделюючи горіння дуги), а при збільшенні відстані між контактами понад 0,02 м набувають різко зростаючого нелінійного характеру, що відповідає процесу згасання дуги.

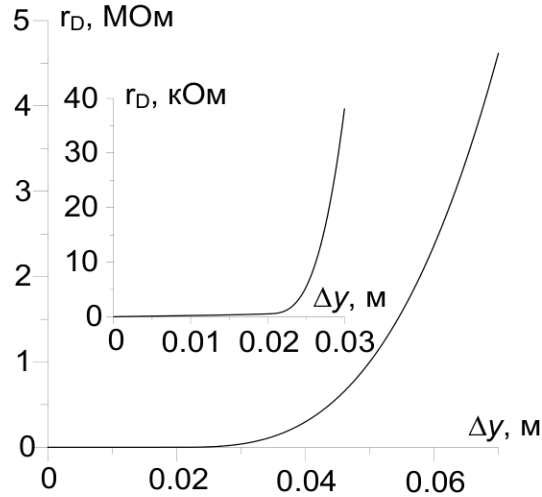


Рисунок 2.8 – Функціональна залежність опору між контактами вимикача від відстані між ними

Дослідження показують, що при досягненні максимальної перехідної відновної напруги (ПВН) температура на осі дуги становить приблизно 2000 К. Заданими, це свідчить про досягнення майже безмежного опору між контактами.

Запропонована модель не є універсальною та не претендує на точне відтворення складних динамічних нелінійних фізичних процесів у самій дузі. Вона лише описує загальні характеристики дугових процесів у вимикачах надвисокої напруги на основі статистичного аналізу їх перебігу в реальних мережах. Такий підхід дозволяє уникнути необхідності використання складних диференціальних рівнянь у часткових похідних другого порядку, які включають чотири чи більше параметрів і не мають аналітичних розв'язків.

3 АНАЛІЗ КОМУТАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ 750 КВ

3.1 Розробка математичної моделі фрагмента електричної мережі

Нижче представлена модель частини електричної мережі з вимикачем надвисокої напруги, в якій особлива увага приділяється комутаційним електромагнітним перехідним процесам у лінії електропередачі. Для створення цієї моделі ми будемо користуватися основними положеннями теоретичної електротехніки [21].

Будемо розглядати тільки симетричні усталені режими й аварійні перехідні процеси, що виникають при трифазних коротких замиканнях (КЗ) та їх вимкненні вимикачем. Це дозволяє досліджувати трифазну симетричну електричну мережу в однолінійному вигляді, використовуючи параметри її елементів для прямої послідовності.

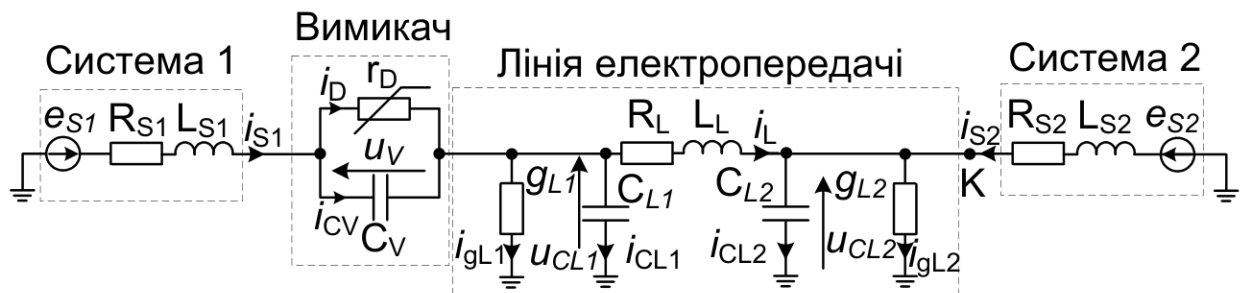


Рисунок 2.1 – Схема аналізованого фрагмента електричної мережі

На рисунку 2.1 представлено еквівалентну схему для аналізу характерного фрагмента електричної мережі 750 кВ, що об'єднує дві електроенергетичні системи (ЕЕС) у режимі паралельної роботи. Кожна з ЕЕС враховується через свої електрорушійні сили (ЕРС), внутрішні активні опори та індуктивності. Лінія електропередачі представлена у вигляді П-схеми з зосередженими параметрами. Вимикання струмів трифазних коротких замикань (КЗ) виконується за допомогою вимикача на 750 кВ, еквівалентна електрична схема якого складається з паралельно з'єднаних нелінійного активного опору та ємності (див. рисунки 2.6, 2.7).

Модель досліджуваної системи будується з урахуванням механізму переміщення контактів вимикача та елементів еквівалентної електричної схеми, обґрунтованих і сформованих у підрозділах 2.2 та 2.3, відповідно.

На основі основних законів електротехніки та механіки запишемо диференціальні рівняння, які будуть описувати аналізовані нами величини [21]:

$$\frac{di_{S1}}{dt} = \frac{1}{L_{S1}}(e_{S1} - R_{S1}i_{S1} - u_V - u_{CL1}), \quad \frac{di_{S2}}{dt} = \frac{1}{L_{S2}}(e_{S2} - R_{S2}i_{S2} - u_{CL2}); \quad (3.1)$$

$$\frac{du_{CL1}}{dt} = \frac{1}{C_{L1}}(i_{S1} - i_L - i_{gL1}), \quad \frac{du_{CL2}}{dt} = \frac{1}{C_{L2}}(i_L - i_{gL2} + i_{S2}); \quad (3.2)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L_L}(u_{CL1} - R_L i_L - u_{CL2}), \quad \frac{du_V}{dt} = \frac{1}{C_V} \left(i_{S1} - \frac{u_V}{r_D} \right); \quad (3.3)$$

$$i_{gL1} = g_{L1}u_{CL1}, \quad i_{gL2} = g_{L2}u_{CL2}; \quad (3.4)$$

$$\frac{d\Delta x}{dt} = V_x, \quad \frac{dV_x}{dt} = \frac{k\Delta x + 4F_X + k_d V_x}{m}, \quad (3.5)$$

де L_{S1}, L_{S2}, L_L – індуктивності систем 1, 2 та лінії; R_{S1}, R_{S2}, R_L – активні опори систем 1, 2 та лінії; e_{S1}, e_{S2} – ЕРС систем 1 та 2; C_{L1}, C_{L2} – ємності лінії; C_V – ємність еквівалентного конденсатора, який увімкнений паралельно до еквівалентного розриву контактів вимикача; i_{S1}, i_{S2}, i_L – струми систем 1, 2 та струм у лінії; g_{L1}, g_{L2} – активні провідності лінії; i_{gL1}, i_{gL2} – струми витоку лінії; r_D – еквівалентний опір дуги; i_D – струм еквівалентної дуги; Δx – відстань переміщення пружини; V_x – швидкість переміщення пружини; k – коефіцієнт пружності пружини; k_d – коефіцієнт дисипації; m – приведена маса контактів; F_X – виштовхувальна сила дуги одного контакту, зведена до системи координат руху пружини; u_{CL1}, u_{CL2} – напруги на початку та в кінці лінії відповідно; u_V – напруга між контактами вимикача.

Сумісному інтегруванню підлягає система диференціальних рівнянь (3.1) – (3.3), (3.5) з урахуванням (2.1), (2.10), (2.19), (2.20), (2.36) – (2.38), (3.4).

Для здійснення комп'ютерної симуляції комутаційних процесів нами було розроблено програмний код алгоритмічною мовою програмування C++, який представлено у Додатку Б.

3.2 Аналіз комутаційних процесів у лінії електропередачі

3.2.1 Прийняті параметри фрагмента мережі. Прийняті параметри елементів еквівалентної схеми заміщення (див. рисунок 3.1) відповідають реальним параметрам фрагмента електричної мережі 750 кВ з лінією електропередачі довжиною 360,5 км. Фазні ЕРС та їх початкові фази налаштовані на усталений режим передачі активної потужності близько 800 МВт у систему 2: $e_{S1} = 593,5 \sin(314t + 20,5^\circ)$ кВ, $e_{S2} = 598,0 \sin(314t + 4,1^\circ)$ кВ, $R_{S1} = 2,03$ Ом, $R_{S2} = 2,42$ Ом, $L_{S1} = 0,16$ Гн, $L_{S2} = 0,14$ Гн, $R_L = 6,86$ Ом, $L_L = 0,33$ Гн, $C_{L1} = C_{L2} = 2,5 \cdot 10^{-6}$ Ф, $g_{L1} = g_{L2} = 5,9 \cdot 10^{-6}$ См, $C_V = 0,4 \cdot 10^{-9}$ Ф, $k = 325000$ Н/м, $m = 10$ кг, $BO = 0,13$ м, $AB = 0,11$ м, $e = 0,13$ м, $B'O = 0,16$ м, $A'B' = 0,2$ м, $e_1 = 0,13$ м, $\psi = 86,5^\circ$, $\Delta x_{gran} = 0,16$ м, $\Delta y_{gran} = 0,06$ м, $k_d = 0$ Нс/м. Комп'ютерна симуляція проводилась у двох експериментах. Перший експеримент передбачав відсутність втрат енергії у механізмі та ігнорування впливу дуги ($F_X = 0$ Н). У другому експерименті розглядалися різні види сил, що впливають на контакти вимикача: імпульсна, лінійно зростаюча та експоненційно зростаюча сили.

3.2.2 Перший експеримент. Перехідні процеси моделювались після виходу системи на усталений режим для різних моментів відключення струму короткого замикання вимикачем. Часові параметри комутацій визначалися згідно з рекомендаціями Міжнародної електротехнічної комісії [22]. Деякі характерні результати перехідних процесів у трифазному короткому замиканні в точці K наприкінці лінії (див. рисунок 3.1) наведені на рисунках 3.2 – 3.7.

На рисунках 3.2 – 3.6 показано перехідний процес при трифазному короткому замиканні у кінці лінії для наступної послідовності операцій: після виходу системи на усталений режим, до моменту виникнення короткого замикання амплітуда фазного струму через вимикач складала 0,98 кА, а

наприкінці лінії – 0,85 кА. У момент часу $t_{KЗ} = 0,62$ с після початку моделювання, у точці K виникло трифазне коротке замикання, що спричинило ударний струм 6,96 кА через вимикач та 7,3 кА у кінці лінії. Після 42 мс (тривалість спрацювання релейного захисту $\Delta t_{PЗ} = 20$ мс плюс час відключення вимикача $\Delta t_{BB} = 22$ мс), тобто у момент часу $t_{PK} = 0,662$ с, у момент переходу струму через нульове значення (див. рисунок 3.2), розпочалося розходження контактів, тривалістю $\Delta t_{PK} = 21,56$ мс. Процес відключення завершився у момент часу $t_B = 0,683$ с (див. рисунок 3.8 та 3.9), причому час горіння дуги Δt_D складав близько 18 мс, а повний час відключення вимикача – $\Delta t_B = \Delta t_{BB} + \Delta t_D = 40$ мс. Після відключення вимикача у лінії спостерігався перехідний процес згасаючих вільних коливань струму, який поступово зменшувався до нуля.

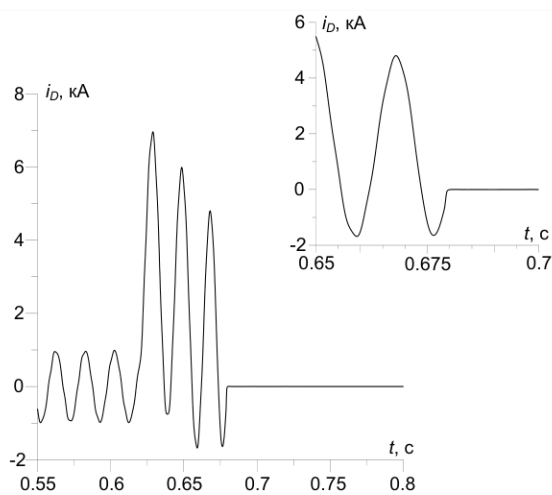


Рисунок 3.2 – Функція струм через вимикач із Системи 1

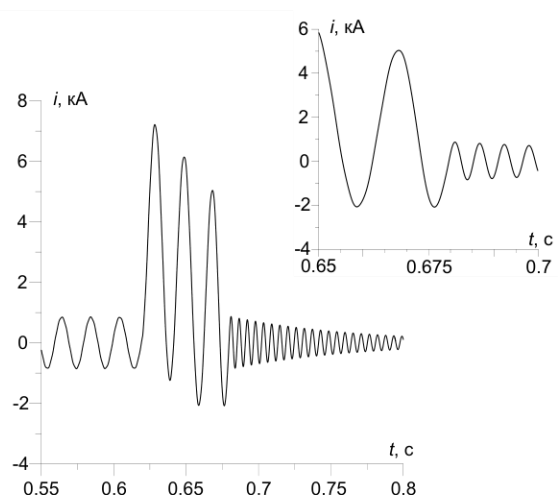


Рисунок 3.3 – Функція струму у кінці лінії електропередачі

Рисунки 3.4 та 3.5 ілюструють перехідні процеси фазних напруг на вимикачі: зі сторони системи 1 та зі сторони початку лінії, відповідно. З аналізу першого рисунка видно, що до моменту короткого замикання амплітуда фазної напруги становила приблизно 613 кВ, що є близьким до номінального значення. Під час короткого замикання напруга знизилася до 410 кВ, а після відключення лінії майже повністю відновилася, наблизившись до рівня напруги системи 1.

На другому рисунку видно, що до відключення короткого замикання фазна напруга на вимикачі зі сторони лінії відповідала напрузі зі сторони системи 1, що є очікуваним результатом. Після відключення вимикача у лінії розпочався перехідний процес, який включав затухаючі вільні коливання фазної напруги на вимикачі зі сторони лінії, з поступовим зменшенням амплітуди до нуля.

Згідно з параметрами прийнятої заступної схеми лінії електропередачі, кутова частота вільних коливань струму (рис. 3.3) та напруги лінії (рис. 3.5) становить приблизно 3,6 відносно основної частоти ЕРС, а їхнє затухання має сталу часу близько 0,1 с.

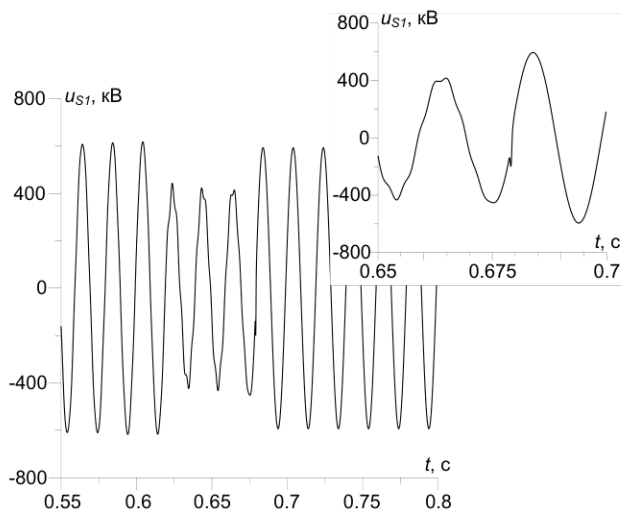


Рисунок 3.4 – Функція напруги на вимикачі зі сторони системи 1

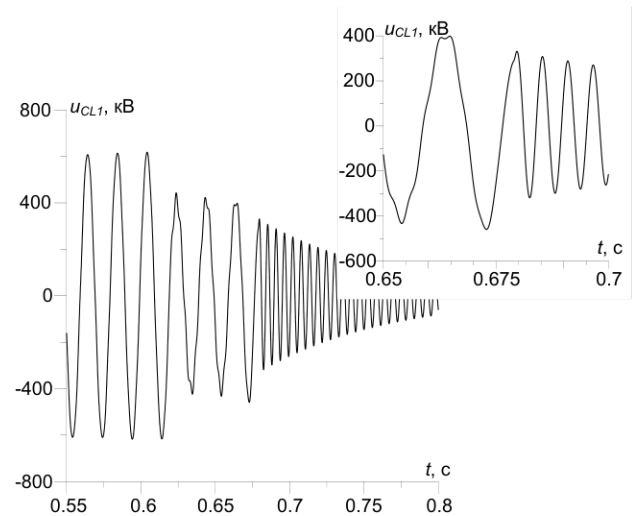


Рисунок 3.5 – Функція напруги на вимикачі зі сторони лінії

На рисунку 3.6 показано функціональну залежність напруги між виводами вимикача від часу. Після відключення фазного струму відновна напруга містить затухаючі вільні коливання тієї ж частоти, обумовлені перехідним процесом у відключеній лінії. Максимальне значення перехідної відновної напруги (ПВН) сягло 860 кВ, а коефіцієнт перевищення амплітуди ПВН $K_a = 1,03$, що є менше за нормоване значення 1,55 [23].

Рівень ПВН залежить від значення струму короткого замикання через вимикач у момент початку розходження його контактів. Дослідження з цього питання проводилися за вищезгаданих умов і симуляції операцій, варіюючи час спрацювання релейного захисту в межах $\Delta t_{P3} = 13 \div 33$ мс. На рисунку 3.7

показано значення струму короткого замикання через вимикач для різних моментів часу початку розходження його контактів і відповідних коефіцієнтів перевищення амплітуди ПВН, що лежать у діапазоні $K_a = 1,0 \div 1,29$.

Ці процеси відповідають теоретичним положенням про комутації в електричних мережах і, за прийнятих припущень, підтверджують адекватність запропонованої математичної моделі вимикача надвисокої напруги, а також доцільність її застосування для дослідження перехідних процесів.

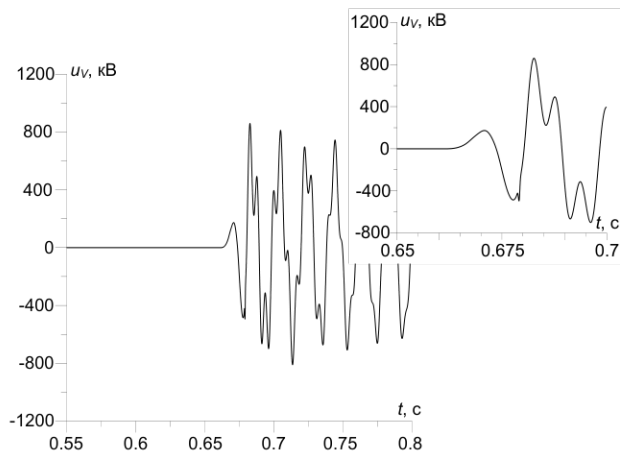


Рисунок 3.6 – Часовий розподіл функції напруги між виводами вимикача

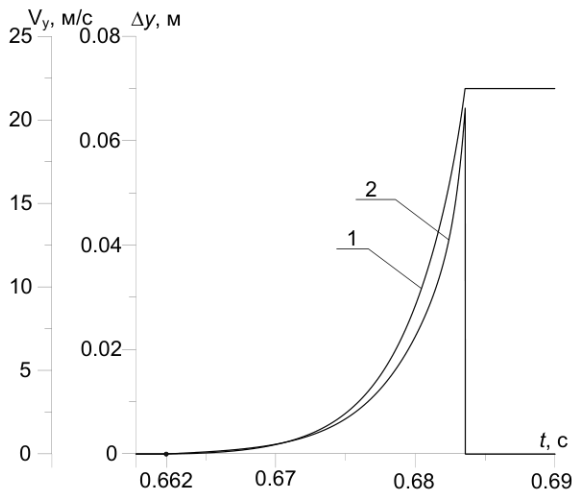


Рисунок 3.8 – Функціональні залежності відстані між контактами (1) та швидкості їх розходження (2)

На рисунку 3.8 репрезентовано функціональні залежності відстані між контактами вимикача (крива 1) та швидкості їх розходження (крива 2). Рух контактів почався в момент часу $t = t_{PK} = 0,662$ с. Із графіка видно,

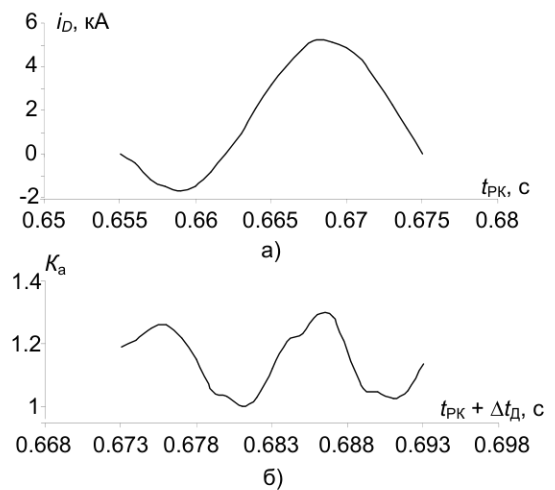


Рисунок 3.7 – Функція струму короткого замикання через вимикач (а) та коефіцієнти амплітуди ПВН (б).

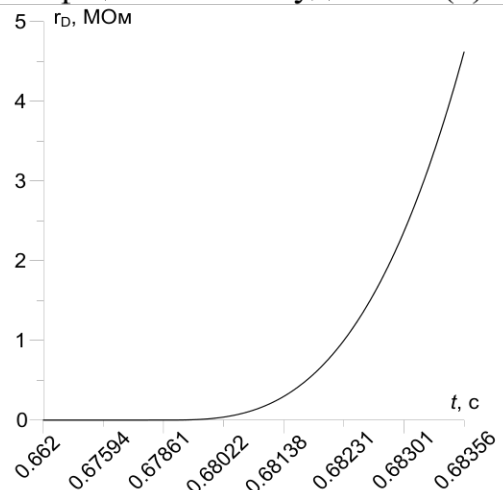


Рисунок 3.9 – Функціональна залежність опору між контактами вимикача

що залежності нелінійні, для заданих параметрів вимикача повне розходження контактів становить 7 см і завершилося у час $t = t_B = 0,683$ с, тобто тривало $\Delta t_{PK} = t_B - t_{PK} = 21,56$ мс та відповідає робочим характеристикам вимикача та підтверджує адекватність моделі.

3.2.3 Другий експеримент. Дослід проводився за аналогічних умов, як і перший, за винятком урахування сили F_X у вигляді функціональних залежностей від часу (див. рисунок 3.10). Досліди здійснювалися для трьох типів впливаючої сили на контакти вимикача. У першому випадку на контакти діяла імпульсна сила величиною 15 кН у часовому інтервалі $[0,675; 0,678]$ с. У другому та третьому випадках сила зростала відповідно лінійно та експоненціально до 20 кН та 30 кН у часовому інтервалі $[0,675; 0,68]$ с.

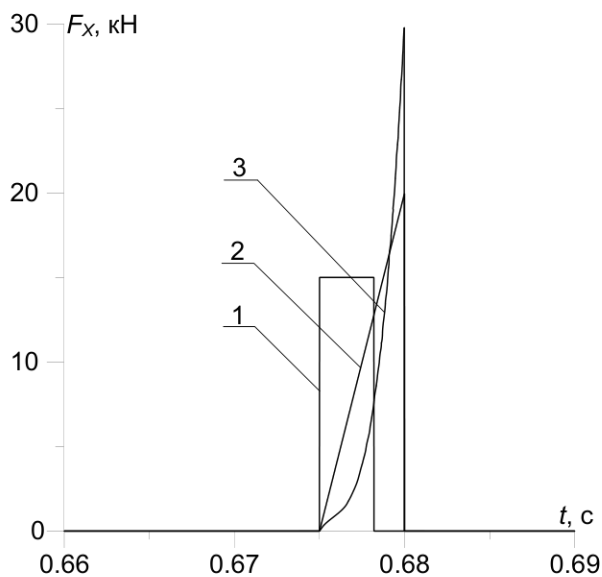


Рисунок 3.10 – Сили, що діють на контакти: 1 – імпульсна; 2 – прямо лінійно наростаюча; 3 – експоненціально наростаюча.

На рисунках 3.11 та 3.12 показано функціональні залежності відстані між контактами вимикача та швидкості їх розходження при різних типах сил, що діють на контакти. В результаті впливу імпульсної сили 15 кН, час повного розходження контактів 7 см збільшився на 5 мс (рисунок 3.11, крива 1) порівняно з результатами, де коливні процеси не враховувалися (рисунок 3.11, крива 4). При

аналізі швидкості переміщення контактів під впливом імпульсної сили (рисунок 3.12, крива 1) видно, що швидкість не тільки зменшилася до нуля, але й почала змінювати напрямок. Це свідчить про те, що протягом певного інтервалу часу контакти працювали на замикання.

Аналізуючи прямолінійний та експоненціальний характер впливу, видно, що вони мають менший вплив на роботу механізму, незважаючи на більші значення сили – 20 кН для лінійного та 30 кН для експоненціального характеру (рисунки 3.11 та 3.12). У разі прямолінійного характеру час повного розходження контактів збільшився на 2,7 мс, а для експоненціального – на 2 мс.

Отримані результати комп'ютерної симуляції доцільно порівняти з результатами першого дослідження для аналізу впливу різних типів сил на розмикання контактів вимикача.

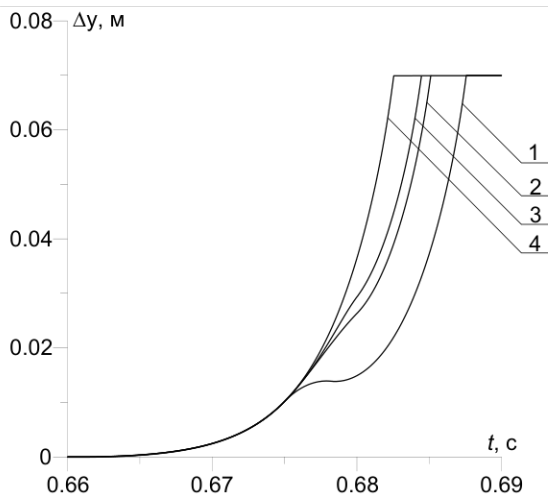


Рисунок 3.11 – Рух контактів вимикача з урахуванням впливаючих сил: 1 – імпульсний; 2 – лінійний; 3 – експоненціальний; 4 – без урахування.

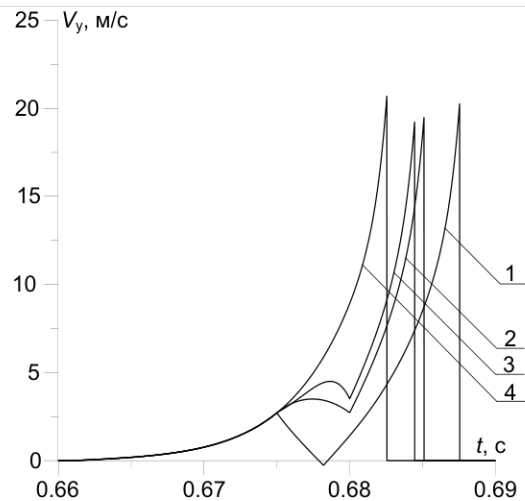


Рисунок 3.12 – Зміна швидкості переміщення контактів вимикача при різних характерах впливаючих сил: 1 – імпульсний; 2 – лінійний; 3 – експоненціальний; 4 – без урахування.

Досліджуючи результати другого дослідження для першого випадку, можна побачити, що через збільшення часу розмикання контактів відбувся зріз струму (див. рисунок 3.13). Цей зріз створює небезпеку для вимикача, оскільки між його контактами виникають значні перенапруги, які досягають близько 1 МВ (див. рисунок 3.14), що становить приблизно 155 % найбільшої номінальної напруги.

На рисунках 3.15 та 3.16 показані аналогічні залежності для другого випадку, що відповідають зміні часу розходження контактів. Аналізуючи перехідний процес фазного струму через вимикач у цьому випадку (рисунок 3.15), видно, що завдяки скороченню часу розходження контактів на 2,1 мс порівняно з першим випадком, зріз фазного струму відсутній, що також за-

побігає виникненню небезпечної перенапруги між контактами (рисунок 3.16). У результаті миттєве максимальне значення перенапруги становило 800 кВ, що складає 1,24 від максимального значення номінальної напруги.

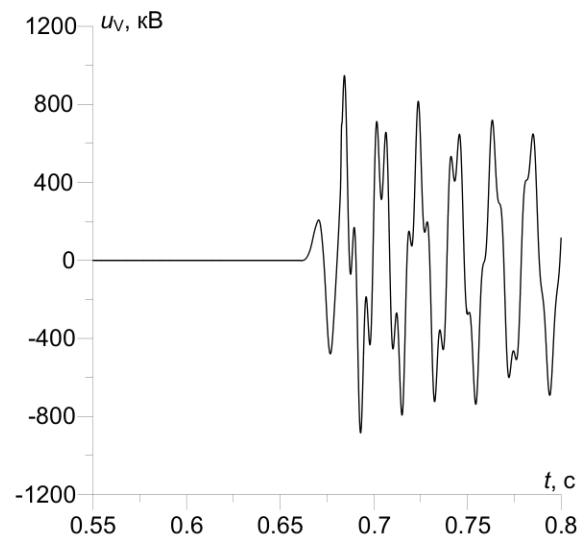
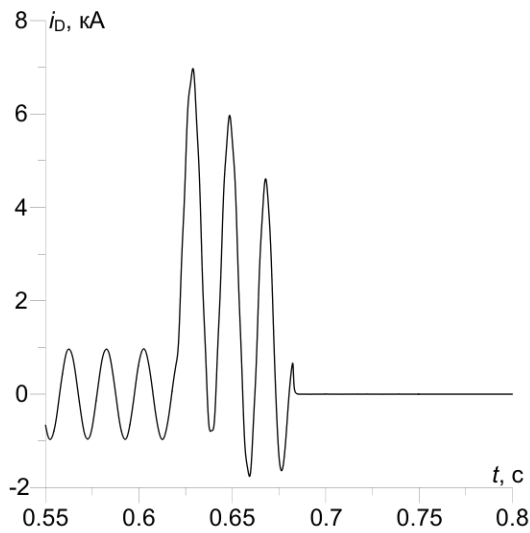


Рисунок 3.13 – Функція струм через вимикач з Системи 1 для першого випадку другого досліду

Рисунок 3.14 – Функція напруги між контактами для першого випадку другого досліду

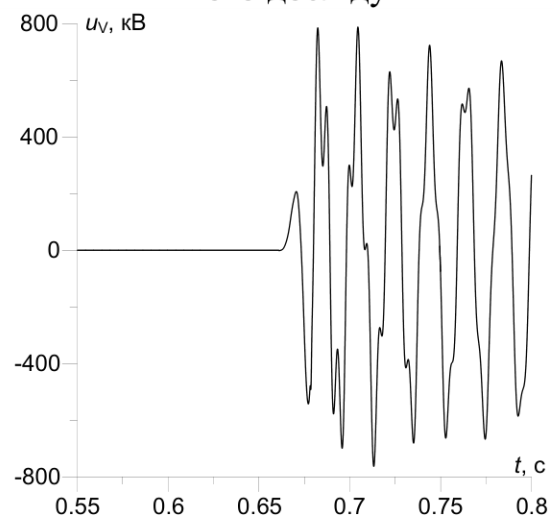
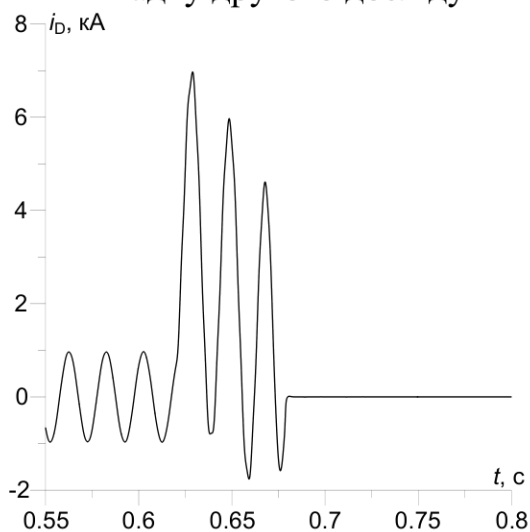


Рисунок 3.15 – Функція струм через вимикач з Системи 1 для другого випадку другого досліду

Рисунок 4.25 – Функція напруги між контактами для другого випадку другого досліду

Оскільки час розходження контактів у другому та третьому випадках відрізняється лише на 0,7 мс, наведення результатів для третього випадку вважається недоцільним. Це пояснюється незначною відмінністю між ними, хоча сила у третьому випадку на 10 кН більша, ніж у другому (див. рисунок 3.10).

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Вплив шляху струму на наслідок ураження електричним струмом

Шлях проходження струму в тілі людини відіграє істотну роль у наслідках ураження. Так, якщо на шляху струму виявляються життєво важливі органи – серце, легені, головний мозок, то небезпека ураження досить велика, оскільки струм впливає безпосередньо на ці органи. Можливих шляхів струму в тілі людини, які називаються також петлями струму, дуже багато. Однак характерними, що звичайно трапляються на практиці, є не більше 15 петель: рука – рука; права рука – ноги; ліва рука – ноги; права рука – права нога; права рука – ліва нога; ліва рука – ліва нога; ліва рука – права нога; обидві руки – обидві ноги; нога – нога; голова – руки; голова – ноги; голова – права рука; голова – ліва рука; голова – права нога; голова – ліва нога (рисунок 4.1).

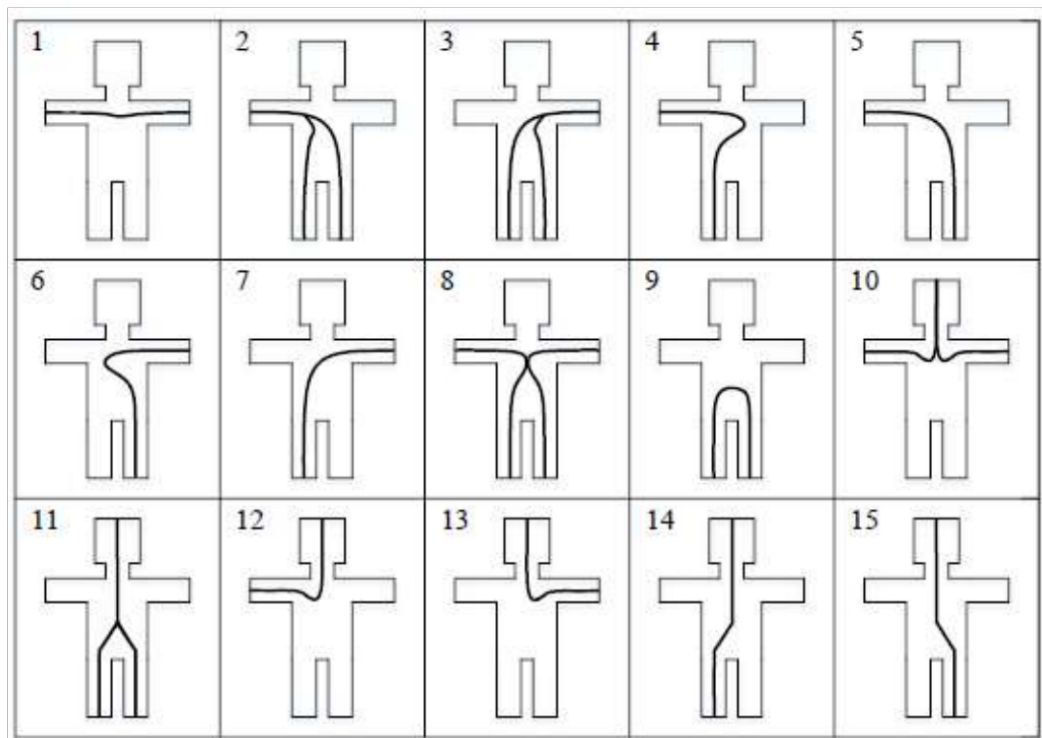


Рисунок 4.1 – Характерні шляхи струму в тілі людини: 1 – рука – рука; 2 – права рука – ноги; 3 – ліва рука – ноги; 4 – права рука – права нога; 5 – права рука – ліва нога; 6 – ліва рука – ліва нога; 7 – ліва рука – права нога; 8 – обидві руки – обидві ноги; 9 – нога – нога; 10 – голова – руки; 11 – голова – ноги; 12 – голова – права рука; 13 – голова – ліва рука; 14 – голова – права нога; 15 – голова – ліва нога

Найпоширеніші шість із них наведено в таблиці 4.1. Найбільш часто коло струму через людину виникає шляхом «рука – рука», що відбувається приблизно у 40 % випадків. Шлях «права рука – ноги» посідає друге місце – 20 %. Інші петлі виникають ще рідше.

Таблиця 4.1 – Характеристика найпоширеніших шляхів струму у тілі людини

Шлях струму	Частота виникнення, %	Значення струму, який проходить через серце, % (від загального)
Рука – рука	40	3,3
Права рука – ноги	20	6,7
Ліва рука – ноги	17	3,7
Нога – нога	6	0,4
Голова – ноги	5	6,8
Голова – руки	4	7,0
Інші	8	–

Небезпеку петлі можна оцінити за значенням струму, який проходить через область серця: чим більший цей струм, тим небезпечніша петля. У таблиці 4.1 ці струми зазначені для кожної з розглянутих петель. Найнебезпечнішими є петлі «голова – руки» й «голова – ноги», коли струм може проходити через головний та спинний мозок. На щастя, ці петлі виникають відносно рідко. Наступний щодо безпеки шлях «права рука – ноги», що за частотою утворення посідає друге місце. Найменш небезпечним є шлях «нога – нога», що називається нижньою петлею й виникає при впливі на людину так званої напруги кроку. У цьому випадку через серце проходить, очевидно, невеликий струм. При цьому можливий смертельний результат внаслідок рефлекторної дії струму.

Напруга кроку навіть невеликого значення (50 – 80 В) викликає мимовільні судорожні скорочення м'язів ніг і, як наслідок, падіння людини на землю. У цей момент замість нижньої петлі в тілі людини утворюється новий, більш небезпечний шлях струму – звичайно від рук до ніг. Оскільки в такому положенні людина торкається одночасно точок землі, віддалених одна від

іншої на відстань, що перевищує довжину кроку, напруга, що діє на неї, виявляється, як правило, більшою за напругу кроку. У результаті створюється реальна загроза смертельного ураження струмом.

4.2 Вплив роду струму і його частоти на наслідок ураження

Рід струму та його частота також дуже впливають на результат ураження електричним струмом.

Змінний струм. Через наявність в опорі тіла людини ємнісної складової збільшення частоти прикладеної напруги в діапазоні частот 0 – 50 Гц супроводжується зменшенням повного опору тіла й зростанням струму, що проходить через людину. Подальше підвищення частоти, незважаючи на зростання струму, супроводжується зниженням небезпеки ураження, яка повністю зникає при частоті 450 – 500 кГц. Правда, ці струми зберігають небезпеку опіків як при виникненні електричної дуги під час контакту зі струмовідними частинами, які перебувають під напругою, так і при проходженні цих струмів.

Постійний струм приблизно у 4 – 5 разів безпечніший від змінного частотою 50 Гц. Це впливає із зіставлення значень граничних невідпускаючих струмів (50 – 80 мА для постійного струму й 10 – 15 мА для струму частотою 50 Гц). Постійний струм, проходячи через тіло людини, викликає більш слабкі скорочення м'язів і менш неприємні відчуття у порівнянні зі змінним струмом того самого значення. Лише в момент замикання й розмикання кола струму людина зазнає короткочасних болісних відчуттів внаслідок раптового судорожного скорочення м'язів, подібних до тих, що виникають при змінному струмі приблизно того самого значення.

Сказане про порівняльну небезпеку постійного та змінного струмів справедливе лише для напруг до 500 В. Вважається, що при більш високих напругах постійний струм стає більш небезпечним за змінний частотою 50 Гц. Причини різного ступеня небезпеки струмів із різними частотами криються в характері подразнювальної дії цих струмів на клітини живої тканини.

4.3 Модель процесу виникнення та формування виробничих небезпек під

час обслуговування механізму переміщення контактів вимикача

аварія в авіації мавоптром варм валрпм в ваврп авм ещцпгеллм пкккллкс

Головну непередбачувану подію (травма, конкретна аварія або катастрофа), модель якої нам потрібно створити, обирають із огляду оцінки відповідного об'єкту, окремої одиниці обладнання або виробництва та розуміння його максимально небезпечного явища, що за певних обставин виробництва може статися.

Після визначення з головним непередбачуваним явищем (подією) починають будувати «дерево» (модель). Застосовуючи оператори «І» та «АБО», роблять набір обставин (відомих до цього), які можуть призвести до тої події, що вибрана як головна.

Інколи чільна обставина може мати і набагато більше однакових небезпечних обставин за змістом, але нажаль різних за причинами і природою виникнення.

Після того як визначилися із відповідними аварійними, травмонебезпечними або катастрофічними обставинами та їх кількістю, знаходять інші події, які належать до кожної такої обставини, логічним синтезом з використанням операторів «АБО», «І» й інших. Побудова моделі триває до тих пір поки не знайдуть всі основні події, які визначають границю моделі.

Потрібно також мати на увазі наступне: кожна непередбачувана подія, у яку входять основні події, може бути сформована та виникнути під час входженні до неї двох, трьох і навіть більше основних (базових) подій із залученням відповідних операторів.

Завершена модель, яка пройшла перевірку в подальшому підлягає математичній обробці для знаходження імовірності кожної непередбачуваної події, яка увійшла в модель, розпочинаючи із основних та завершуючи чільною.

Імовірності основних подій знаходять за даними виробництва. Для прикладу основна подія «стан контролю із охорони праці». Для знаходження імовірності ми маємо установити на скільки відсотків (%) від ідеального показника проводиться відповідний контроль об'єкта. Якщо встановлено, що такий показник контролю є 50 чи 30 % – імовірність відповідно рівна 0,5 та

0,3. За відсутності контролю імовірність «не здійснення контролю» дорівнюватиме 1, за умови, якщо контроль є ідеальний – то відповідна імовірність дорівнює 0.

Після того як обчислили імовірність усіх подій, розміщених в ромбах, та основних подій, починаючи із нижньої лівої гілки «дерева», їх позначають номерами усі непередбачувані події, які увійшли в модель.

Значення імовірності основних подій, які аналізуються, на жаль, не можна порівнювати із нормативними значеннями деякого ступеня ризику для деякої людино-машинної системи, тому що, таких даних не існує. Проте показник імовірності тої або іншої події, розрахований під час аналізу конкретної моделі, дає бачення про високу, середню та незначну (малоімовірну) небезпеку [21].

Нині, єдиний документ, яким можна користуватися, це ДСТУ 12.1.010–96 «Система стандартів безпеки праці. Вибухобезпека», у якому вказано, що виробничі процеси вимушені розроблятися так, щоб імовірність появи вибуху на будь-якій вибухонебезпечній дільниці протягом року не перевищувала 10^{-6} ($P = 0,000001$).

Для здійснення обчислень імовірності травми використаємо логіко-імітаційну модель процесу її формування (рис. 4.2) та програмний комплекс MathCad у якому будемо здійснювати всі розрахунки.

Так, на робочому місці оператора під час обслуговування приводу механізму переміщення контактів вимикача за наявності згаданих недоліків з охорони праці, які представлені в основних подіях на 100 таких місць, можна очікувати 14 травм. Негайно усунувши недоліки (підвищивши професійний рівень операторів, покращивши контроль та побудувавши потрібну кількість пристроїв захисту за усіма вимогами безпеки), тоді побачимо на моделі, шляхом ще одного розрахунку, що показник небезпеки почне наближатися до 0, а рівень безпеки – до 1.

Вихідні дані: $P1 := 0.43$ $P2 := 0.33$ $P4 := 0.41$ $P5 := 0.49$
 $P7 := 0.4$ $P8 := 0.52$ $P12 := 0.4$ $P11 := 0.48$ $P14 := 0.4$
 $P15 := 0.6$ $P17 := 0.4$ $P18 := 0.57$

Ймовірність події 3

$$P3 := P1 + P2 - P1 \cdot P2 = 0.618$$

Слід зауважити, що обчислення ймовірностей випадкових подій проводяться відповідно до положень булевої алгебри.

Аналогічно обчислюємо ймовірність інших подій залежно від їх номера:

$$P6 := P4 + P5 - P4 \cdot P5 = 0.699$$

$$P9 := P7 + P8 - P7 \cdot P8 = 0.712$$

$$P10 := P3 + P6 + P9 - P3 \cdot P6 - P3 \cdot P9 - P6 \cdot P9 + P3 \cdot P6 \cdot P9 = 0.967$$

$$P13 := P11 + P12 - P11 \cdot P12 = 0.688$$

$$P16 := P14 + P15 - P14 \cdot P15 = 0.76$$

$$P19 := P17 + P18 - P17 \cdot P16 = 0.666$$

$$P20 := P13 + P16 + P19 - P13 \cdot P16 - P13 \cdot P19 - P16 \cdot P19 + P13 \cdot P16 \cdot P19$$

$$P20 = 0.975$$

$$P21 := 0.14$$

$$P22 := P10 + P20 - P10 \cdot P20 = 0.999$$

$$P23 := P22 \cdot P21 = 0.14$$

Рисунок 4.2 – Розрахунок імовірностей в MathCad 14

Потрібно завжди пам'ятати, що на згаданому робочому місці також можуть бути й інші недоліки, що можуть призвести до травм з інших обставин. Проте складовими обставинами іншої травми можуть бути наступні недоліки: малоефективний контроль та дуже низький професійний рівень умінь і знань працюючих з охорони праці. Відтак потрібно розробити відповідну модель і зробити необхідні розрахунки. Так як показник імовірності виникнення аварії чи травми (травмонебезпечної ситуації або аварійної) найкраще і об'єктивніше характеризує показник небезпеки на конкретному об'єкті, тому створені умови для удосконалювання системи керування безпекою праці в окремих підрозділах та господарствах. Значення імовірності можуть використовуватися при розробці заходів впливу на працюючий персонал, який часто

допускає небезпечні дії, і стимулюючих заходів до тих працівників, на індивідуальних робочих місцях яких є низька імовірність появи аварії чи травми.

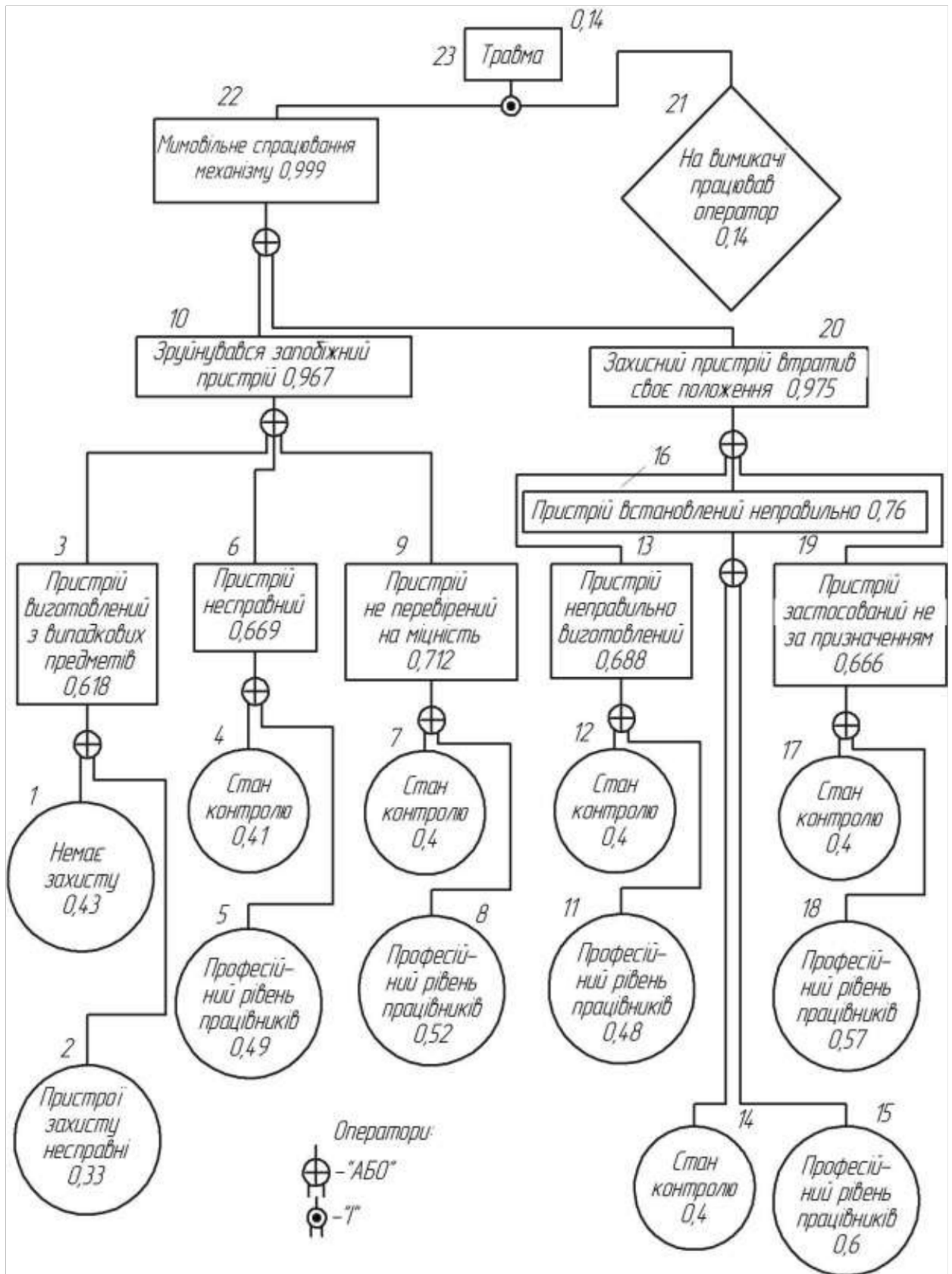


Рисунок 4.3 – Логіко-імітаційна модель процесу виникнення травми при обслуговуванні приводу механізму переміщення контактів вимикача

4.4 Розробка заходів із питань безпеки у надзвичайних ситуаціях

Відповідно до чинного законодавства функції безпеки, в тому числі й у сфері соціальної політики, покладені на законодавчі та виконавчі органи влади усіх рівнів.

Відтак, місцеві органи федеральних органів й органів суб'єкта виконавчої влади розв'язують задачі комплексної безпеки в відповідності із своїми призначеннями та на основі сучасної законодавчої бази, визначають шляхи, напрями та способи підвищення рівня безпеки окремої особи та населення у цілому [32].

Дані органи роблять усе можливе для удосконалення і розвитку методичної, нормативної правової бази, яка здійснює регулювання діяльності в області безпеки, у тому числі й у соціальній сфері. Також удосконалюються, створюються та задіюються правові, економічні, адміністративні та інші механізми, які підвищують рівень діяльності в сфері безпеки, здійснюється координація та керівництво діяльності підвідомчих органів, засобі та сил у області безпеки.

Ми розглянемо лише основні напрями діяльності органів муніципальної та державної влади до забезпечення безпеки під час підготовки і під час виникнення надзвичайної ситуації даного виду.

Ця робота полягає у наступному:

- ✓ розвиток та створення системи антитерористичної діяльності окремих регіонів та населених пунктів, проведення на всіх рівнях виховного та інформаційного на населення, деякі його групи, що є об'єктом екстремістської пропаганди терористичних й інших екстремістських структур;

- ✓ усунення і виявлення причин та умов, що створюють сприятливі умови для здійснення терористичної діяльності, також інформаційний, ідеологічний та організаційна і адміністративна протидія тероризму;

- ✓ здійснення підготовки населення, працівників установ, підприємств та організацій до раціональних дій в умовах виникнення терористичної за-

грози вчинення терористичного акту, проведення комплексу спеціальних робіт із антитерористичного захисту небезпечних та особливо важливих об'єктів. Значну увагу у цих умовах приділяють організаціям із значним перебуванням людей (установи освіти, охорони здоров'я, культури, соціального захисту, спорту та ін).

✓ проведення заходів по залученню необхідних сил та засобів щоби здійснювати правове, інформаційне, адміністративне та оперативне протистояння виникненню й діяльності терористичних організацій та груп, а також розробка та вживання заходів по припиненню проникнення у регіон (населений пункт) терористів й терористичних груп, увезення засобів терористичної діяльності (вибухових речовин, боєприпасів, небезпечних хімічних речовин та ін) [32].

Під час безпосередньої загрози чи виникнення надзвичайних ситуацій антитерористичної спрямованості органи державної та муніципальної влади в взаємодії з спеціалізованими службами проводять управління на період ліквідації загрози терористичного акту, його здійснення і ліквідацію наслідків.

5 ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ВТРАТ ВІД АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ

5.1 Аварійні відмикання ліній електропередач

Аварійні відмикання у лініях електропередач, особливо на рівні 750 кВ, можуть мати значні економічні наслідки для електроенергетичних компаній та промислових споживачів. У цьому розділі досліджуються основні причини аварійних ситуацій, їх наслідки та фінансові втрати, які вони спричиняють. Визначення економічного впливу таких аварій допомагає розробити стратегії для мінімізації ризиків і витрат.

Зазвичай, аварійні ситуації в електромережах виникають через:

- ✓ короткі замикання (однофазні, двофазні, трифазні): їхнє виникнення може призвести до значного перенавантаження лінії та вимикачів, спричиняючи пошкодження обладнання;
- ✓ вихід з ладу комутаційного обладнання: при збоях роботи вимикача з'являється необхідність аварійного відмикання, яке супроводжується збоями у подачі електричної енергії;
- ✓ несправність ізоляції: порушення ізоляційних властивостей призводить до втрат та потенційно небезпечних ситуацій, особливо за умов високої вологості або пилових бурь.

Аварійні ситуації можуть призвести до наступних негативних наслідків:

- ✓ зниження надійності електропостачання, що може викликати недовіру споживачів та зменшення доходів енергопостачальних компаній;
- ✓ необхідність аварійного відновлення обладнання, яке потребує значних витрат на робочу силу, матеріали та час;
- ✓ втрати для промислових споживачів, оскільки зупинка виробничих процесів через відсутність електричної енергії призводить до недоотриманих прибутків та додаткових витрат на запуск процесів.

5.2 Економічна оцінка втрат від аварійних відмикань

Для оцінки економічних збитків від аварій в електричних мережах слід враховувати:

- ✓ прямі витрати, такі як витрати на ремонт та заміну обладнання, а також витрати на усунення наслідків аварії;
- ✓ непрямі витрати, включаючи втрати від простоїв для споживачів, які залежать від надійного енергопостачання;
- ✓ витрати на компенсацію, у випадку, якщо аварія призвела до порушення контрактних умов з ключовими споживачами.

Для здійснення обчислень економічних збитків будемо використовувати такі показники:

1. Тривалість простою системи, позначимо його як $T_{\text{аварії}}$ та виразимо у годинах або хвилинах.

2. Втрати через припинення електропостачання, розрахунок втрат від простоїв може бути виконаний за формулою:

$$C_{\text{втрат}} = T_{\text{аварії}} \cdot P_{\text{спож}} \cdot K_{\text{втрат}}, \quad (5.1)$$

де $T_{\text{аварії}}$ – час простою через аварію; $P_{\text{спож}}$ – середня потужність споживання в годину (кВт); $K_{\text{втрат}}$ – коефіцієнт втрат (наприклад, 0,8 для критичних споживачів, які працюють на максимумі потужності).

3. Витрати на відновлення обладнання: розрахунок включає витрати на ремонтні матеріали $C_{\text{мат}}$, оплату робіт $C_{\text{роб}}$, а також витрати на логістику та адміністративну підтримку $C_{\text{адм}}$:

$$C_{\text{ремонт}} = C_{\text{мат}} + C_{\text{роб}} + C_{\text{адм}}, \quad (5.2)$$

4. Втрати від компенсацій та штрафів: якщо аварія викликає збитки у споживачів, можливо, доведеться сплатити штрафні санкції:

$$C_{\text{штраф}} = C_{\text{дог}} \cdot N_{\text{скарг}}, \quad (5.3)$$

де $C_{\text{дог}}$ – сума договору з постачання електроенергії; $N_{\text{скарг}}$ – кількість скарг від споживачів.

Загальний збиток від аварійної ситуації обчислюється як сума прямих та непрямих втрат:

$$C_{\text{загальні}} = C_{\text{втрат}} + C_{\text{ремонт}} + C_{\text{штраф}}, \quad (5.4)$$

Припустимо, що на лінії 750 кВ відбулося КЗ, що призвело до відімкнення вимикача на дві години. Маємо наступні параметри для обчислень: час відновлення $T_{\text{аварії}} = 2$ год; середня потужність споживачів $P_{\text{спож}} = 1000$ кВт; коефіцієнт втрат $K_{\text{втрат}} = 0,9$; витрати на ремонт (матеріали) $C_{\text{мат}} = 200000$ грн; витрати на роботу персоналу $C_{\text{роб}} = 50000$ грн.

Втрати внаслідок перерви в електропостачанні становлять:

$$C_{\text{втрат}} = 2 \cdot 1000 \cdot 0,9 = 180000 \text{ грн.}$$

Вартість ремонту буде становити:

$$C_{\text{ремонт}} = 200000 + 50000 = 250000 \text{ грн.}$$

Відтак, загальний економічний збиток буде становити:

$$C_{\text{загальні}} = 180000 + 250000 = 430000 \text{ грн.}$$

5.3 Рекомендації для мінімізації втрат

Для зниження витрат на усунення аварій пропонуємо:

1. Здійснювати регулярне технічне обслуговування вимикачів та ліній – для зниження ризику несподіваних відмикань та збільшення надійності.
2. Використання автоматизованих систем моніторингу – для оперативного виявлення порушень у перехідних процесах та швидкого реагування.
3. Навчання персоналу – підвищення кваліфікації працівників допоможе ефективно діяти у випадках аварій та мінімізувати час на відновлення.

Обчислення показали, що наслідки аварій у високовольтних мережах можуть мати значний економічний вплив, тому інвестиції у надійність обладнання та профілактичні заходи є економічно виправданими. Розроблені заходи можуть мінімізувати втрати та забезпечити безперебійне електропостачання, покращуючи репутацію та фінансову стабільність підприємства.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі представлено результати виконання аналізу комутаційних процесів у лінії електропередачі 750 кВ. Отримані у кваліфікаційній роботі результати підкреслимо наступними висновками.

1. Представлено теоретичні аспекти сумісної взаємодії фізичних процесів горіння дуги у вимикачі з перехідними електромагнітними процесами у лінії електропередачі, під час виконання комутацій. Зокрема, здійснено аналіз останніх досліджень у цій області, розкрито питання перехідної відновлювальної напруги вимикача та, що дуже важливо, розглянуто питання перехідної відновлювальної напруги у реальних мережах.

2. Розроблено математичну модель елегазового вимикача, яка призначена для дослідження комутаційних процесів в електричних мережах. Зокрема, на основі підходів аналітичної механіки, розроблено математичну модель механізму переміщення контактів вимикача та укладено еквівалентну схему його заміщення.

3. Розроблено математичну модель фрагмента електричної мережі, ключовими елементами якої є вимикач та лінія електропередачі. Представлено аналіз комутаційних перехідних процесів у лінії електропередачі в аварійних режимах роботи. Також, розглянуто комутаційні процеси під час впливу різних динамічних збурень на контакти вимикача.

4. Розкрито питання впливу електричного струму на організм людини, зокрема розглянуто різні варіанти петель протікання електричного струму через організм людини. Також, розроблено імітаційну модель виникнення травми при обслуговуванні механізму переміщення контактів вимикача.

5. Здійснено економічний аналіз втрат від виникнення аварійної ситуації на лінії електропередачі при передачі потужності 1 МВт. Обчислення показали, що збитки будуть становити 430 тис. грн.

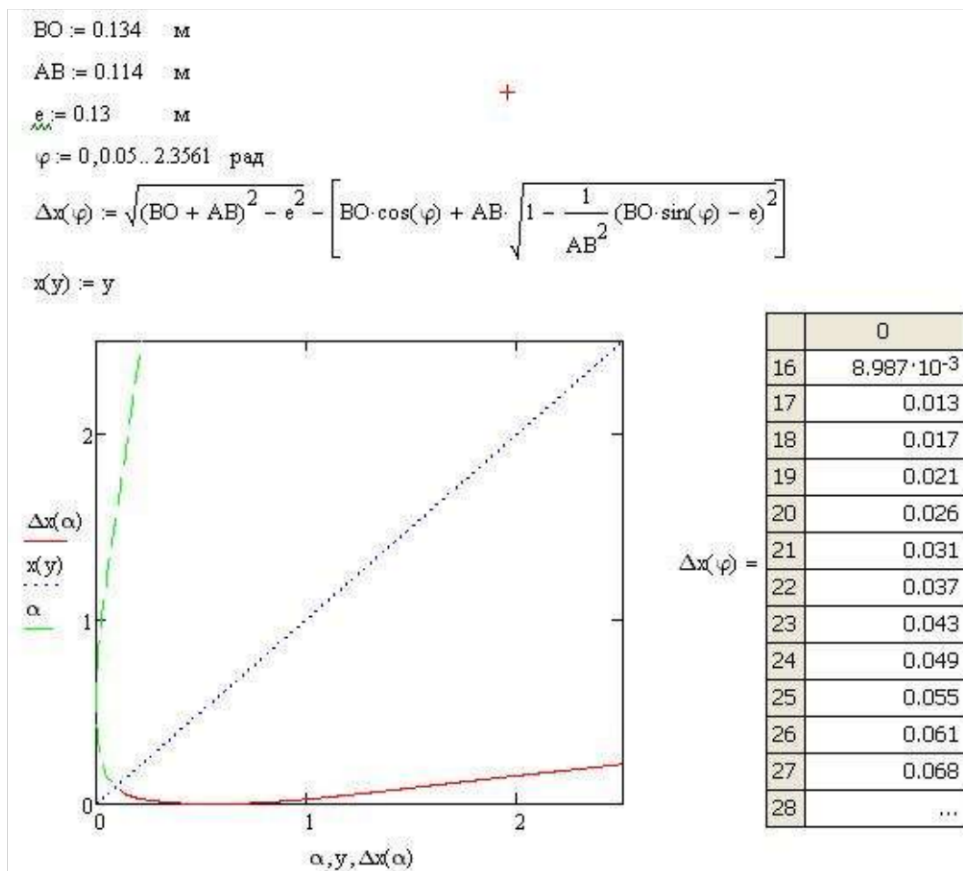
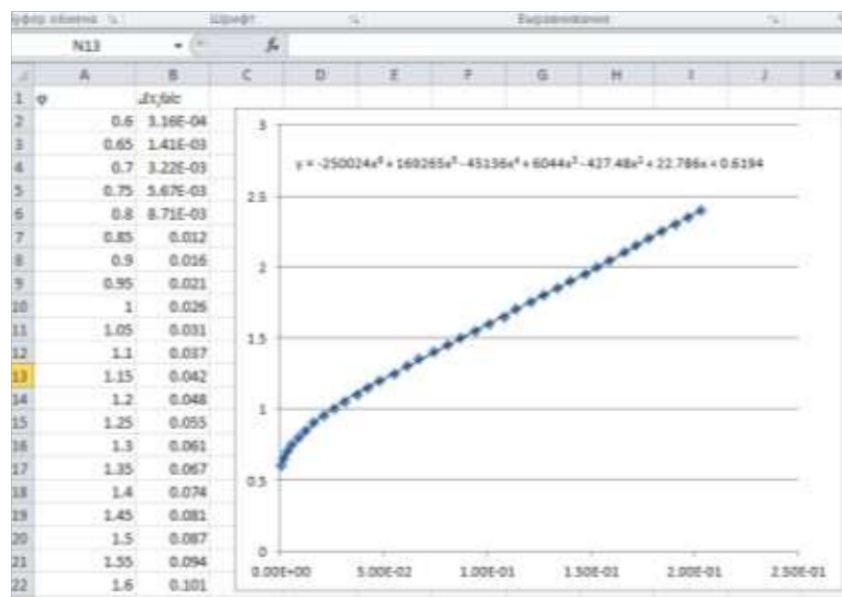
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Зорин В. В., Буйний Р. А., Іванько Д. О. Заходи по підвищенню ефективності режимів діючих розподільних електричних мереж. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2011. №2. С. 70 – 77 с.
2. Тісенко В. В. Системи електропостачання загального призначення. Чернігів: ЧНТУ, 2005. 341 с.
3. Бурбело М. Й., Бірюков О. О., Мельничук Л. М. Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2011. 204 с.
4. Бардик Є. І. Експлуатація та режими роботи електростанцій. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 73 с.
5. Božidar Filipovic-Grcic, Ivo Uglešic, and Dalibor Filipovic-Grcic, «Analysis of Transient Recovery Voltage in 400 kV SF₆ Circuit Breaker Due to Transmission Line Faults», *International Review of Electrical Engineering*, Vol. 6, N. 5, p. 2652 – 2658, 2011.
6. T. Koshizuka, T. Shinkai, K. Udagawa, H. Kawano, «Circuit Breaker Model using Serially Connected 3 Arc Models for EMTP Simulation», *International Conference on Power Systems Transients*, Kyoto, 2009. [Електронний ресурс]. http://ipstconf.org/papers/Proc_IPST2009/09IPST040.pdf.
7. Черкашина В. В. Структурування повітряних ліній електропередачі в умовах неповноти інформації. Харків: Факт, 2016. 160 с.
8. Маляр В. С. Теоретичні основи електротехніки. Електричні кола : навч. посібник. Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2012. 312 с.
9. Жежеленко І. В., Півняк Г. Г., Трофімов Г. Г., Папаїка Ю. А. Реактивна потужність в електричних мережах: монографія. Дніпро: НТУ«ДП», 2020. 72 с.
10. Бардик Є. І., Лукаш М. П. Електрична частина станцій та підстанцій. Синхронні генератори: навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2008. 100 с.

11. Клименко Б. В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Харків: Вид-во «Точка», 2012. 340 с.
12. Кирик В.В. Електричні мережі та системи. Київ: Політехніка, 2014. 132 с.
13. Кулик В. В., Тептя В. В., Бурикін О. Б., Сікорська О. В. Типові рішення при проектуванні електричних мереж напругою 110–330 кВ: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2018. 110 с
14. Шестеренко В. Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств. Вінниця: Нова книга, 2004. 656 с.
15. L. Claessens, R. Drews, M. Govindarajan, H. Lohrber, and P. Robin-Jouan, «Advanced Modelling Methods for Circuit Breakers», *CIGRE Conference 2006*, Paris, 2006.
16. І. Ю. Тугай, та В. А. Мельничук, «Ферорезонансні процеси на підстанціях з елегазовими вимикачами та електромагнітними трансформаторами напруги», *Праці ІЕД НАНУ*, Вип. 44, с. 21 – 26, 2016.
17. А. В. Ільченко, та В. О. Ломакін, «Зміна моменту інерції дезаксіального кривошипно-шатунного механізму поршневого двигуна внутрішнього згоряння», *Вісник ЖДТУ*, №1(44), 2008, [Електронний ресурс]. <http://vtn.ztu.edu.ua/article/view/81846/79582>.
18. М. А. Павловський, *Теоретична механіка*. Київ, Україна: Техніка, 2002.
19. Чабан В. Електромагнетнеї кола: навч. посіб. Львів: Вид-во Тараса Сороки, 2011. 234 с.
20. Operating instructions for the circuit breaker LTB 362-800 (T) E4. ABB. 2009.
21. Чабан В. Й. Теоретична електротехніка. Поле: навч. посіб. Львів: Вид-во Тараса Сороки, 2008. 182 с.
22. High-voltage switchgear and controlgear – Part 102: Alternating current disconnectors and earthing switches. *International standart IEC 62271-102*. First edition 2001-12.
23. ДСТУ 2848-94. *Апарати електричні комутаційні. Основні поняття. Терміни та визначення. Держстандарт України*. Київ, 1995.
24. Жалдак М. І., Триус Ю. В. Основи теорії і методів оптимізації. Черкаси: Брама-Україна, 2005. 608 с.

24. 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.
25. Панченко С. В., Акімов О. І., Бабаєв М. М. Основи безпечної експлуатації електроустановок: підручник. Харків: УкрДУЗТ, 2021. 149 с.
26. Лехман С. Д. Запобігання аварійності і травматизму у сільському господарстві: навч. посібник. Київ: Урожай, 1993. 272 с.
27. 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.
28. ГКД 340.000.001-95. Визначення економічної ефективності капіталовкладень в енергетику. Методика. (Загальні методичні положення). Київ: Міненерго України, 1995. 34 с.
29. <https://www.kmu.gov.ua/npas/97498521>
30. Федішин Б. П. Економіка енергетики: навчальний посібник. Тернопіль, 2003. 182 с.

ДОДАТКИ

Додаток А Процедура отримання функції $\varphi(\Delta x_{fakt})$ та її апроксимаціїРисунок А.1 – Отримання функцій $\Delta x_{fakt}(\varphi)$ та $\varphi(\Delta x_{fakt})$ в програмному середовищі *Mathcad 15*Рисунок А.2 – Апроксимація таблично заданої функції $\varphi(\Delta x_{fakt})$ поліномом шостого порядку в програмному середовищі *Microsoft Excel 2010*

Додаток Б Програмний код алгоритмічною мовою програмування C++

```

#include <iostream>
#include <cmath>
#include <vector>
const double TOL = 1.0e-6; // Допустима похибка
const int MAX_ITER = 100; // Максимальна кількість ітерацій
const double DT = 0.01; // Крок інтегрування
const double T_END = 10.0; // Кінцевий час
// Функція для обчислення правої частини диференціальних рівнянь
std::vector<double> equations(const std::vector<double>& U, const std::vector<double>& I) {
    // Пропишіть тут рівняння для конкретної задачі
    std::vector<double> result(2);
    result[0] = ... ; // Зміна для I
    result[1] = ... ; // Зміна для U
    return result;
}
// Підпрограма для кроку неявного Ейлера з методом Ньютона
bool implicitEulerStep(std::vector<double>& U, std::vector<double>& I) {
    std::vector<double> U_new = U;
    std::vector<double> I_new = I;

    for (int iter = 0; iter < MAX_ITER; ++iter) {
        std::vector<double> f = equations(U_new, I_new);
        std::vector<double> deltaU(2); // Зміни для U та I
        // Оновити значення U_new та I_new відповідно до методу Ньютона
        deltaU[0] = -f[0]; // Оцінка для корекції I
        deltaU[1] = -f[1]; // Оцінка для корекції U

        U_new[0] += deltaU[0];
        I_new[1] += deltaU[1];

        // Перевірка збіжності
        if (std::abs(deltaU[0]) < TOL && std::abs(deltaU[1]) < TOL) {
            U = U_new;
            I = I_new;
            return true;
        }
        return false; // Не зійшлося
    }
}
int main() {
    std::vector<double> U = {0.0, 0.0}; // Початкові значення для U
    std::vector<double> I = {0.0, 0.0}; // Початкові значення для I
    double t = 0.0;
    // Основний цикл інтегрування
    while (t < T_END) {
        if (!implicitEulerStep(U, I)) {
            std::cerr << "Метод Ньютона не зійшовся\n";
            return -1;
        }
        t += DT;
        // Виведення результатів
        std::cout << "t = " << t << ", U = " << U[0] << ", I = " << I[1] << "\n";
    }
    return 0;
}

```