

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Мороз Владислав Іванович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Удосконалення діагностики однофазних замикань на землю в повітряних
розподільчих мережах 6-10 кВ
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Мороз В.І.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Соколовський Олег Феліксович

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2023

АНОТАЦІЯ

Мороз В.І. Удосконалення діагностики однофазних замикань на землю в повітряних розподільчих мережах 6-10 кВ. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2023.

У роботі проведений маналіз існуючих підходів до аналітичному вирішення рівнянь перехідних процесів при ОЗЗ в електричних мережах середнього напруги 6-10 кВ і оцінка області їх застосування.

Розглянутий розвиток методів аналітичного рішення рівнянь перехідного процесу при ОЗЗ у мережах 6-10 кВ та їх застосування для вирішення зазначених задач.

Ключові слова: розподільча мережа, перехідний процес, моделювання, однофазне замикання.

ABSTRACT

Moroz V.I. Improvement of diagnostics of single-phase earth faults in 6-10 kV overhead distribution networks. Qualifying work for obtaining a bachelor's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polish National University, Zhytomyr, 2023.

In the work, the analysis of existing approaches to the analytical solution of the equations of transient processes in the case of short-circuits in electric networks of medium voltage 6-10 kV and the assessment of the area of their application is carried out.

The development of methods for the analytical solution of the equations of the transient process in the 6-10 kV networks and their application to the solution of the specified problems is considered.

Key words: distribution network, transient process, simulation, single-phase circuit.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ МЕРЕЖ 6 – 10 кВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАННЯ НА ЗЕМЛЮ	6
1.1 Вимоги до математичної моделі мережі 6-10 кВ для дослідження перехідних процесів при замикання на землю	6
1.2 Узагальнена схема електричної мережі 6-10 кВ.	6
Висновки по розділу 1	10
РОЗДІЛ 2. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ АНАЛІТИЧНИХ РІШЕНЬ РІВНЯНЬ ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ ПРИ ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАННЯХ НА ЗЕМЛЮ В МЕРЕЖАХ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ	11
2.1. Стадії перехідного процесу при ОЗЗ і вимоги до розрахункових схем заміщення мережі.	11
2.2. Аналітичні рішення рівнянь перехідних процесів при ОЗЗ для дослідження їх впливу на функціонування захисту від ОЗЗ та розробки захистів, що ґрунтуються на використанні перехідних процесів.	14
2.3 Аналіз умов застосовності двочастотної схеми заміщення для розрахунків перехідних процесів при ОЗЗ у мережах 6-10 кВ.	18
Висновки по розділу 2	21
РОЗДІЛ 3 ЗАСТОСУВАННЯ АНАЛІТИЧНОГО РІШЕННЯ В СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ПЕРЕНАПРЯЖЕНЬ ПРИ ДУГОВИХ ПЕРЕМІЖНИХ ЗАМИКАННЯХ НА ЗЕМЛЮ В МЕРЕЖАХ 6 - 10 кВ	23
3.1 Основні теорії дугових ОЗЗ, що перемежуються.	23
3.2 Аналітична оцінка перенапруг при дугових переміжних ОЗЗ.	27
3.3 Застосування аналітичного рішення для дослідження умов виникнення максимальних перенапруг.	31
Висновки по розділу 3	34
ВИСНОВКИ	35
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	36

ВСТУП

Велика частина електричної енергії розподіляється споживачам через електричні мережі напругою 6-10 кВ. Однофазні замикання на землю (ОЗЗ) є переважним виглядом ушкоджень в мережах 6-10 кВ і часто є першопричиною аварій, які приводять до значної економічної шкоди. Найбільш небезпечними є дугові уривчасті ОЗЗ, що являють собою послідовність повторних запалювань і гасінь заземлюючої дуги [1-15 і ін.]. Дуговий переривчастий характер ОЗЗ властивий, частіше всього, початковий стадії розвитку ушкодження ізоляції. При невеликих інтервалах між повторними пробоями (у межі досягають половини періоду промислової частоти) дугові уривчасті ОЗЗ супроводжуються значними перенапругами на неушкоджених фазах і називаються дуговими переміжними. Крім небезпечних перенапруг дугові перемежуються ОЗЗ супроводжуються збільшенням середньоквадратичного (ефективного) значення струму в місці ушкодження [16]. Інтенсивні електромагнітні перехідні процеси, супроводжуючі дугові уривчасті ОЗЗ, здійснюють суттєве вплив на стійкість функціонування захистів від даного виду пошкоджень, заснованих на використанні різних складових струмів і напруги нульовий послідовності встановленого режиму замикання [17-21].

Таким чином, виникає **актуальна необхідність** в аналізі перехідних процесів при ОЗЗ в електричних мережах 6-10 кВ та оцінці їх параметрів

В даний час, враховуючи обмежені можливості проведення експериментів в діючих електроустановки, обмежені можливості фізичного моделювання, а також в зв'язку з створенням ефективних універсальних систем математичного моделювання (наприклад, MATLAB з пакетом розширення SIMULINK) і спеціалізованих програм моделювання електромагнітних перехідних процесів в ЕЕС [14, 15, 19 і ін.] основним методом дослідження перехідних процесів при ОЗЗ у мережах середньої напруги стало імітаційне моделювання на ЕОМ.

Метою роботи є вдосконалення методів дослідження перехідних процесів при ОЗЗ у мережах 6-10 кВ.

У роботі вирішувалися наступні **основні завдання:**

1. Порівняльний аналіз існуючих підходів до аналітичному вирішенню рівнянь перехідних процесів при ОЗЗ в електричних мережах середнього напруги, в зокрема, в мережах 6-10 кВ і оцінка області їх застосування.
2. Розвиток методів аналітичного рішення рівнянь перехідного процесу при ОЗЗ у мережах 6-10 кВ та їх застосування для вирішення зазначених задач.

Об'єктом дослідження ОЗЗ у мережах 6-10 кВ.

Перелік публікацій автора за темою дослідження:

Мороз В.І. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ МЕРЕЖ 6 – 10 кВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАННЯ НА ЗЕМЛЮ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «НАУКОВІ ЧИТАННЯ – 2023», 01.05.2023, Житомир, Україна.
С. 69-71

Гончаренко Ю.П., Соколдовський О.Ф., Мороз В.І. ЗАСТОСУВАННЯ АНАЛІТИЧНОГО РІШЕННЯ В СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ПЕРЕНАПРЯЖЕНЬ ПРИ ДУГОВИХ ПЕРЕМІЖНИХ ЗАМИКАННЯХ НА ЗЕМЛЮ В МЕРЕЖАХ 6 - 10 кВ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «НАУКОВІ ЧИТАННЯ – 2023», 01.05.2023, Житомир, Україна.
С. 69-71

РОЗДІЛ 1

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ МЕРЕЖ 6 – 10 кВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАННЯ НА ЗЕМЛЮ

1.1 Вимоги до математичної моделі мережі 6-10 кВ для дослідження перехідних процесів при замикання на землю

Вибір системи моделювання для дослідження перехідних процесів при ОЗЗ у мережах 6-10 кВ .

Для перевірки адекватності та точності спрощених аналітичних рішень рівнянь перехідних процесів при ОЗЗ у мережах 6-10 кВ та оцінки умов та сфери їх застосування необхідні достатньо точні рішення зазначеного завдання, для отримання яких доцільно використовувати сучасні системи математичного моделювання. Для вирішення завдань, пов'язаних із дослідженням перехідних процесів в ЕЕС та електроенергетичних об'єктах найбільш підходящою прийнято рахувати універсальну систему моделювання MATLAB [17] зв'язним в її пакетом розширення SIMULINK [18].

Досвід використання зазначених систем показав, що найбільш прийнятною для отримання зазначеною вище моделі мережі є універсальна інтегрована система математичного моделювання Система MATLAB орієнтована на масові персональні комп'ютери класу IBM PC і має потужні засоби діалогу, графіки та комплексну підсистему уявлення і відображення інформації. Система добре апробована і розрахована на вирішення широкого кола технічних завдань, в тому числі в галузі електроенергетики та електроніки. Система MATLAB увібрала в себе передовий досвід розвитку і комп'ютерної реалізації чисельних методів рішення рівнянь, накопичених за останні три десятиліття.

1.3 Узагальнена схема електричної мережі 6-10 кВ.

Наведений аналіз особливостей схем електричних мереж 6-10 кВ різного призначення дозволяє виділити в них об'єкти і зони, різні умовами

застосування ТЗНП, що визначаються, як було показано вище, в здебільшого співвідношеннями сумарного ємнісного струму мережі $I_{C\Sigma}$ і власних ємнісних струмів приєднань $I_{C\text{ влас}}$ об'єкта, що захищається. На рис. 1.1 показано узагальнену структурну схему електричних мереж 6 – 10 кВ з виділенням в них зазначених зон.

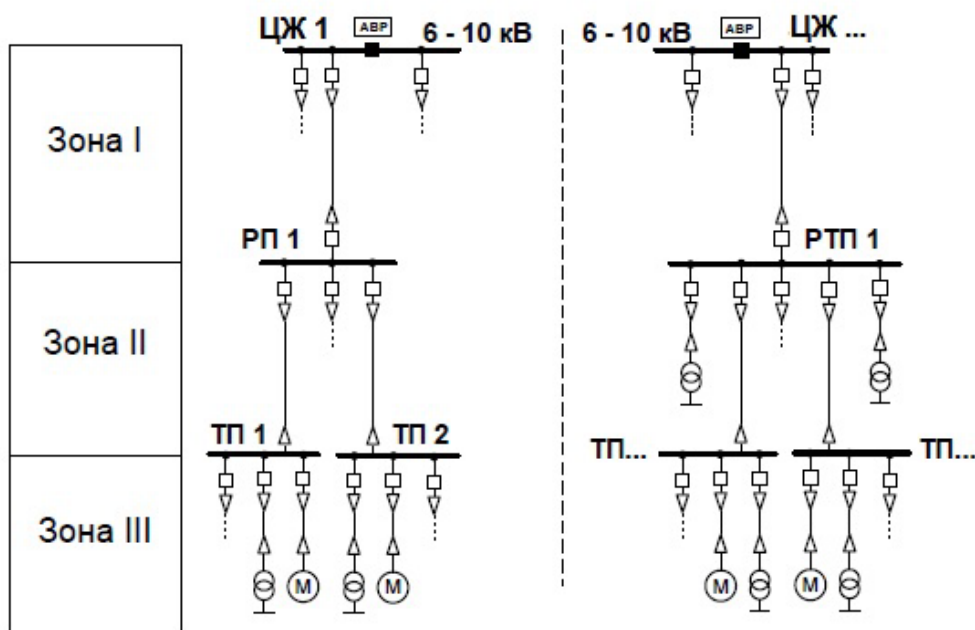


Рисунок 1.1 - Узагальнена схема електричної повітряної мережі 6 – 10 кВ

На рис. 1.1 зона I - зона живильних ліній, що зв'язують ЦЖ (ЦРП) з РП та РТП. Для ліній живлення цієї зони характерні відносні великі значення власних ємнісних струмів $I_{C\text{ влас}}$ і, відповідно, найменші значення відношення $I_{C\text{ влас}}/I_{C\Sigma}$, тобто. найважчі умови з погляду застосування ТЗНП. Зона II – зона живильних ліній, що зв'язують РП та РТП з ТП, та розподільні лінії на РТП. Для живильних ліній цієї зони відношення $I_{C\text{ влас}}/I_{C\Sigma}$ буде більше, чим для зони I, що полегшує умови застосування ТЗНП. Зона III містить розподільчі лінії, зв'язуючі електроприймачі з шинами джерела живлення - ТП. Для розподільчих ліній зон II і III характерні невеликі довжини і відповідно невеликі значення відношення $I_{C\text{ влас}}/I_{C\Sigma}$, визначального умови застосування ТЗНП.

Модель мережі створювалася з урахуванням розглянутих нижче особливостей ОЗЗ. У відмінність від різновидів коротких замикань (трифазна, двофазна і т.д.) різновиди ОЗЗ суттєво відрізняються за формою та значенням електричних величин, що підводяться до вимірювальних органів захисту від цього виду ушкоджень і, отже, умовам функціонування останньої. Усі різновиди ОЗЗ можна розділити на 2 групи: стійкі та нестійкі. Стійкі ОЗЗ, що мають місце при наявності надійного гальванічного зв'язку пошкодженої фази з землею (металевий зв'язок, перехідний опір, дуга, що стійко горить), та характеризуються наявністю в токах і напругах тільки вимушених складових промислової частоти та вищих гармонік.

Нестійкі дугові замикання - основний вигляд ОЗЗ - характеризуються переривчастою формою струму, в якому переважають вільні складові перехідного процесу з амплітудами, які досягають в залежності від сумарного ємнісного струму мережі $I_{c \Sigma}$, віддаленості точки ОЗЗ від шин, напруги на пошкодженій фазі в момент пробією ізоляції, параметрів ліній електричної мережі та ін. сотень і навіть тисяч амперів. Усі нестійкі ОЗЗ умовно можна поділити на 2 різновиди: одноразові самоусувні пробією ізоляції - «кльовання землі» і дугові переривчасті замикання – послідовність яких в загальному випадку неперіодична, самоусуваючі пробією ізоляції .

З обліком цих особливостей сформульовані загальні вимоги до виконанню моделі радіальної електромережі.

1. Модель має бути універсальною, тобто. забезпечувати моделювання електромагнітних перехідних і усталених процесів, як в кабельних, так і в повітряних електричних мережах.
2. Модель мережі повинна бути трифазною.
3. Модель повинна легко нарощуватися, видозмінюватися, забезпечувати швидку адаптацію до змін схеми та режимів роботи мережі.
4. Модель повинна утримувати комутаційні апарати (вимикачі, ключі КЗ) та забезпечувати їх підключення на будь-якій ділянці мережі.
5. Модель повинна враховувати розподіл характер параметрів

ліній електропередачі та наявність вищих гармонік в мережі.

6. Модель повинна підтримувати розвинені засоби візуального контролю і спостереження за модельованими процесами.

На рис 1.2 представлена трифазна схема заміщення радіальної електричної мережі, яка задовольняє розглянутим вимог. на основі зазначеної схеми заміщення в системі MATLAB з допомогою пакету розширення SIMULINK. Отримана модель мережі 6-10 кВ призначена для дослідження електромагнітних перехідних процесів при ОЗЗ і комутаційних перемиканнях в мережі.

На рис. 1.3 показано графічне представлення моделі мережі у системі MATLAB, відповідне схемою заміщення мережі рис. 1.2.

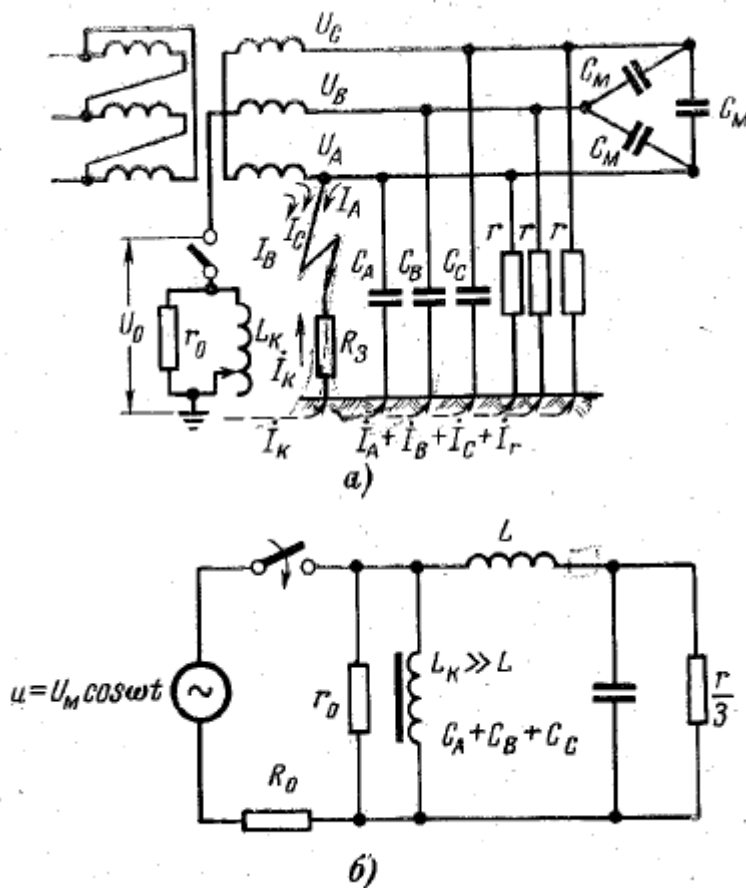


Рисунок 1.2 - Розрахункові схеми заміщення мережі із ізольованою нейтраллю або з компенсацією ємнісних струмів по [3]: а - трифазна;

б - нульовий послідовності

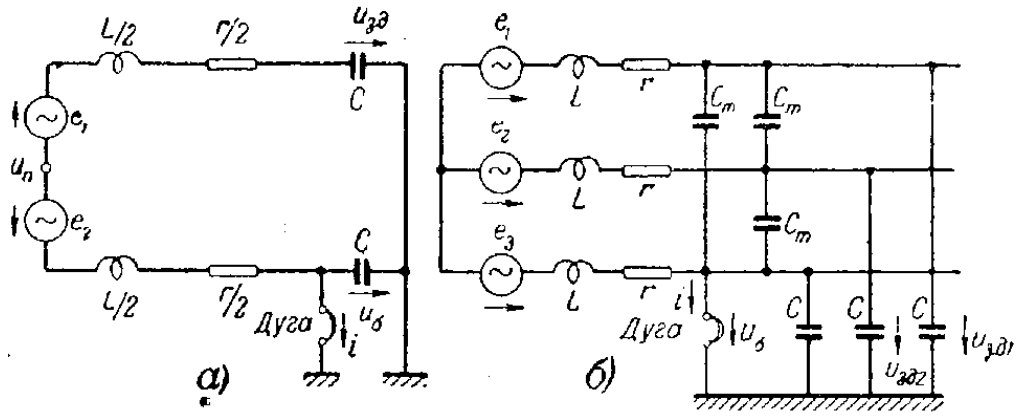


Рисунок 1.3- Розрахункові схеми заміщення мережі 6-10 кВ на дослідження перенапруг в перехідних режимах ОЗЗ за [29]: а – однофазна (перетворена); б - трифазна

Висновки по першому розділу

В даний час, враховуючи обмежені можливості проведення експериментів в діючих електроустановки, обмежені можливості фізичного моделювання, а також в зв'язку з створенням ефективних універсальних систем математичного моделювання (наприклад, MATLAB з пакетом розширення SIMULINK).

РОЗДІЛ 2

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ АНАЛІТИЧНИХ РІШЕНЬ РІВНЯНЬ ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ ПРИ ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАННЯХ НА ЗЕМЛЮ В МЕРЕЖАХ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ

Відомі аналітичні рішення рівнянь перехідного процесу при ОЗЗ в електричних мережах середнього напруги (в Україні - 6-35 кВ) можна класифікувати за наступними ознаками:

1) за метою досліджень перехідних процесів при ОЗЗ (дослідження перенапруг при дугових переривчастих ОЗЗ, дослідження в цілях оцінки параметрів та характеристик перехідних струмів при ОЗЗ, що впливають на функціонування захисту від даного виду пошкоджень, дослідження в цілях визначення співвідношень електричних величин перехідного процесу, використовуваних для виконання захистів від ОЗЗ);

2) по схемою заміщення електричної мережі, використовуваної для аналітичного рішення рівнянь перехідного процесу при ОЗЗ;

3) по виду координат (складників), з використанням яких отримано аналітичне рішення рівнянь перехідного процесу під час ОЗЗ (фазні складові, симетричні складові прямої, зворотної та нульової послідовності та ін).

2.1. Стадії перехідного процесу при ОЗЗ і вимоги до розрахункових схем заміщення мережі.

Складність отримання аналітичного рішення визначається, перш за все, складністю прийнятої розрахункової схеми заміщення мережі при дослідженні перехідних процесів при ОЗЗ. В свою черга складність розрахункової схеми заміщення електричної мережі залежить від цілі досліджень перехідних процесів при ОЗЗ і пов'язаною з нею необхідності врахування різних стадій його розвитку. Будь-яке ОЗЗ призводить до перерозподілу напруги окремих фаз мережі по відношенню до землі. Потенціал заземленої зони обмотки зменшується або стає рівним нулю, а потенціали непошкоджених фаз набувають інші значення. Цей єдиний

складний перехідний процес умовно можна, можливо розділити на наступні стадії [20]:

1) стрибкоподібне зниження напруги на пошкодженій фазі у місці ОЗЗ, пов'язане з розрядкою ємностей пошкодженою фази на землю і перезарядження міжфазних ємностей суміжних елементів мережі в місці пошкодження, зумовлююче так зване «первинний розподіл» зарядів та напруг. Ця стадія триває частки чи одиниці мікросекунд;

2) поширення в обидві сторони від місця пошкодження бігучих хвиль, зниження напруги, що змінює потенціал пошкодженої і здорової фаз щодо землі. Хвилі зниження напруги супроводжуються хвилями ємнісного струму, що починає проходити через точку замикання. На стиках неоднорідних ділянок відбувається заломлення та відбиття цих хвиль. При багаторазових пробігах хвилі зниження напруги та струму деформуються та згасають. Дана стадія процесу триває десятки та сотні мікросекунд;

3) обмін енергією між індуктивністю джерела живлення і ємностями ліній, шин, апаратів та інших елементів мережі, що викликає появу коливань середньої частоти. Тривалість цієї стадії перехідного процесу складає тисячні і соті частки секунди.

4) встановлення струму замикання на землю промислової частоти, яке триває кілька періодів.

До власних хвильовим процесам відносяться лише перша і друга стадії. Враховуючи дуже малу тривалість 1-ї стадії, яка практично не що впливає ні на величину перенапруг при дугових переривчастих ОЗЗ, ні на функціонування захистів від даного виду пошкоджень, першу і другу стадію часто розглядають як одну стадію та називають її розрядною (пов'язаної з розрядом ємностей пошкодженої фази). Третя стадія єдиного перехідного процесу вже виходять за рамки визначення «хвильових явищ» - тобто всього складного комплексу фізичних явищ і процесів, супроводжуваних виникнення, поширення і швидку зміну електромагнітного поля ланцюга або системи [20] та з достатнім ступенем

точності може розглядатися як електромагнітний перехідний процес у ланцюгах із зосередженими параметрами. Цю стадію частот називають зарядною (пов'язаною з додатковим зарядом ємностей непошкоджених фаз мережі). У надалі будемо умовно рахувати, що в перехідному процесі умовно можна виділити дві основні стадії - розрядну та зарядну.

Експериментальні дослідження в діючих мережах середнього напруги і дослідження на математичних моделях показали, що максимальні перенапруги в перехідних режиму ОЗЗ виникають на зарядній стадії [1-3, 8, 9-12 та ін]. Тому в розрахункових схемах заміщення мережі для рішення зазначеного завдання розрядну стадію, як правило, спрощують, вважаючи, що вона практично миттєво зумовлює початковий розподіл зарядів та напруг. При обґрунтуванні розрахункової схеми заміщення мережі для зазначених розрахунків враховувалися також результати численних експериментальних досліджень перехідних процесів при ОЗЗ, виконаних в вказані роки в різних країнах (наприклад, [2, 3, 16, 17 та ін.]) в основному з використанням шлейфових (світлопроменевих) осцилографів, що застосовуються для дослідження фізичних процесів із обмеженою частотою [19]. На осцилограмах, отриманих з використанням світлопроменевих осцилографів, через обмеженою смуги пропускання частот розрядна стадія або взагалі не спостерігається, або практично не впливає на перехідний процес, що служить додатковим обґрунтуванням можливості неврахування параметрів елементів мережі, що впливають на струми розрядний стадії.

При аналізі впливу перехідних процесів на функціонування захистів від ОЗЗ, оцінки значень електричних величин перехідного процесу, що впливають на функціонування зазначених захистів, амплітудно-частотного спектру перехідних струмів, оцінки середньоквадратичного (ефективного) значення струму в місці пошкодження таке подання розрядної стадії не завжди прийнятно, так як може привести до значних похибок в оцінці значень електричних величин зарядній стадії і всього перехідного процесу

в загалом. Тому для рішення другої групи завдань розрахункова схема заміщення мережі повинна враховувати не тільки зарядну, але і розрядну стадію перехідного процесу.

2.2. Аналітичні рішення рівнянь перехідних процесів при ОЗЗ для дослідження їх впливу на функціонування захисту від ОЗЗ та розробки захистів, що ґрунтуються на використанні перехідних процесів.

Аналітичне рішення рівнянь перехідного процесу при ОЗЗ можна отримати тільки для спрощеної схеми заміщення електричної мережі середньої напруги. Допустиме без суттєвої втрати точності рішення ступінь спрощення розрахункової схеми заміщення мережі залежить від цілі рішення. Велика частина аналітичних рішень, отриманих до 60-х рр., в основному було пов'язано з оцінкою максимальних перенапруг при дугових переміжних ОЗЗ у мережах із ізольованою нейтраллю [1-4, 9, 15].

При таких дослідженнях приймалося, що максимальні перенапруги виникають при дугових переміжних ОЗЗ на шинах центру живлення (ЦЖ). З огляду на це у більшості робіт, присвячених дослідженням перенапруг при дугових переривчастих ОЗЗ в мережах середнього напруги застосовувалися спрощені схеми заміщення мережі, в яких ОЗЗ розглядалося лише на шинах. На рис. 1.2 і 1.3 як приклади наведені подібні розрахункові схеми заміщення мереж середнього напруги, використані в роботах Лихачова Ф.А. [3] і Білякова Н.М. [15].

Для схем заміщення за рис.1.2 та рис. 1.3 перехідний процес при ОЗЗ описується диференціальним рівнянням 2-го порядку, чому відповідає наявність в струмах і напруги 1-ї вільної коливальної частотної складової. З огляду на це подібні схеми заміщення іноді називають одночастотними.

З рис.1.2 та 1.3 можна бачити, що одночастотні схеми заміщення не враховують вплив розрядної стадії, що вважається допустимим, як зазначалося вище, при дослідженнях перенапруг в перехідних режимах ОЗЗ.

Слід відзначити, однак, що дослідження перенапруг при дугових ОЗЗ,

виконані на математичних моделях мереж 6-35 кВ, показують, що таке припущення прийнятно не завжди використовувати [11, 12].

До перших роботам, присвяченим оцінці параметрів струмів перехідного процесу в аспекті оцінки їх впливу на функціонування пристроїв захисту від ОЗЗ можна віднести роботу Koch W. [21]. У рішеннях рівнянь перехідного процесу при ОЗЗ, отриманих у [21], в принципі враховуються обидві стадії (розрядна та зарядна) перехідного процесу при ОЗЗ, проте приймається, що розрядна стадія протікає незалежно від зарядної і зумовлює початкове розподіл напруги, враховується при аналізі зарядної стадії. Таке припущення прийнятно, якщо частоти розрядних і зарядних вагань суттєво різняться і кожен процес можливо аналізувати, як процес в одночастотному коливальному контурі 2-го порядку.

У роботах [13, 14] показано проте, що частотний поділ розрядної і зарядної складових можливий не завжди, наприклад, він неможливий при віддалених від шин ОЗЗ, раніше всього, в повітряних мережах, коли індуктивність пошкодженою лінії до місця ушкодження співмірна з індуктивністю джерела живлення.

В Україні (СРСР) інтерес до дослідженням електромагнітних перехідних процесів при ОЗЗ в цілях захисту від ОЗЗ з'явився в кінці 50-х років в зв'язку з широким використанням в електричних мережах середньої напруги 3-35 кВ режиму ізольованої нейтралі та резонансного заземлення нейтралі через ДГР і першими розробками захистів від даного виду пошкоджень, заснованих на використанні електричних величин перехідного процесу для підвищення їх селективності та чутливості. Основною метою даних робіт було дослідження параметрів і характеристик перехідних струмів і напруги при ОЗЗ для оцінки можливості їх застосування в захистах від даного виду пошкоджень, раніше всього, в компенсованих мережах. До першим дослідженням в даному напрямку відноситься робота Сироти І.М. [22]. У [22] перехідний процес при ОЗЗ в компенсованій мережі вважається повністю ідентичним перехідному

процесу при ОЗЗ в мережі з ізольованою нейтраллю і розглядається як перехідний процес у спрощеній схемі, представленій послідовним LCR -контуром (рис. 2.1), що враховує лише вільну зарядну складову та вимушену складову струмів і напруги нульовий послідовності. Пізніше вказана спрощена розрахункова схема заміщення електричної мережі середнього напруги використано у роботах [23, 24] з метою оцінки значень перехідних струмів при ОЗЗ і впливу на них параметрів мережі і перехідного опору в місці ушкодження.

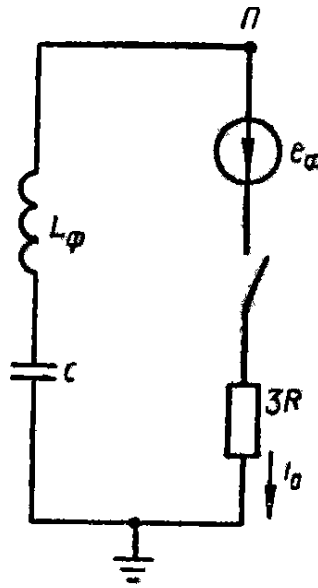


Рисунок 2.1- Спрощена (одночастотна) схема заміщення для розрахунку перехідних процесів при ОЗЗ в малим струмом замикання на землю

Одночастотна схема заміщення мережі середньої напруги широко використовувалась і в інших роботах для дослідження перехідних процесів при ОЗЗ [24, 25 і ін]. У [13, 14] показано, що застосування одночастотної схеми заміщення мережі (рис. 2.1) не тільки не враховує вплив розрядного складника на перехідний процес при ОЗЗ, але і наводить до суттєвих помилок в оцінці зарядних складових перехідного струму і напруги нульовий послідовності.

Точніший математичний опис перехідних процесів при ОЗЗ отримано

в роботах Шуляка В.Г. [25, 26]. У розрахунковій схемі заміщення мережі з ізольованою нейтраллю, використаною у роботах [25, 26], враховується вплив на перехідний процес при ОЗЗ як зарядної, так і розрядної стадій, однак перехідний процес розглядається для мережі, що складається з однієї лінії. Таке подання розрахункової схеми заміщення дозволяє отримати рішення для струму нульової послідовності у непошкодженій лінії при ОЗЗ на шинах захищається об'єкт.

У [13] на основі аналізу осцилограм, отриманих при ОЗЗ в реальних електричних мережах і на фізичних моделях, враховують розподілений характер параметрів ліній [26], показано, що в розрядних і зарядних складових струму і напруги перехідного процесу переважає по одній частотній складовій, що визначає їх форму та амплітуду. Порівняння експериментальних та розрахункових даних показує [26], що частота і амплітуда зазначених частотних складових визначається практично лише сумарною ємністю фаз мережі на землю та сумарними міжфазними ємностями непошкодженою частини мережі, параметрами пошкодженою лінії на ділянці від шин до крапки ОЗЗ і перехідним опором R_n у місці ушкодження, які мають бути враховані в розрахунковій схемою заміщення. З урахуванням цих вимог в [13] запропоновано для дослідження перехідних процесів в мережах 6-10 кВ використовувати двочастотну схему заміщення, наведену на рис. 2.2.

У відмінність від раніше розглянутих розрахункових схем заміщення і застосування схеми на рис. 2.2 дозволяє розглядати обидві стадії - розрядну і зарядну - як єдиний перехідний процес, що є перевагою даного підходу.

Однак розрядна стадія перехідного процесу при ОЗЗ, як вже зазначалося вище, в відмінність від зарядної представляє собою явно виражений хвильовий процес. Тому розрахунок хвильового перехідного процесу за схемою рис. 2.2 як перехідного процесу в електричній ланцюзі з зосередженими параметрами наводить до похибок в оцінці значень

розрядних струмів і напруги. У [13, 14] не наводяться умови, при яких застосування схеми заміщення по рис. 2.2 забезпечує достатню точність розрахункових результатів.

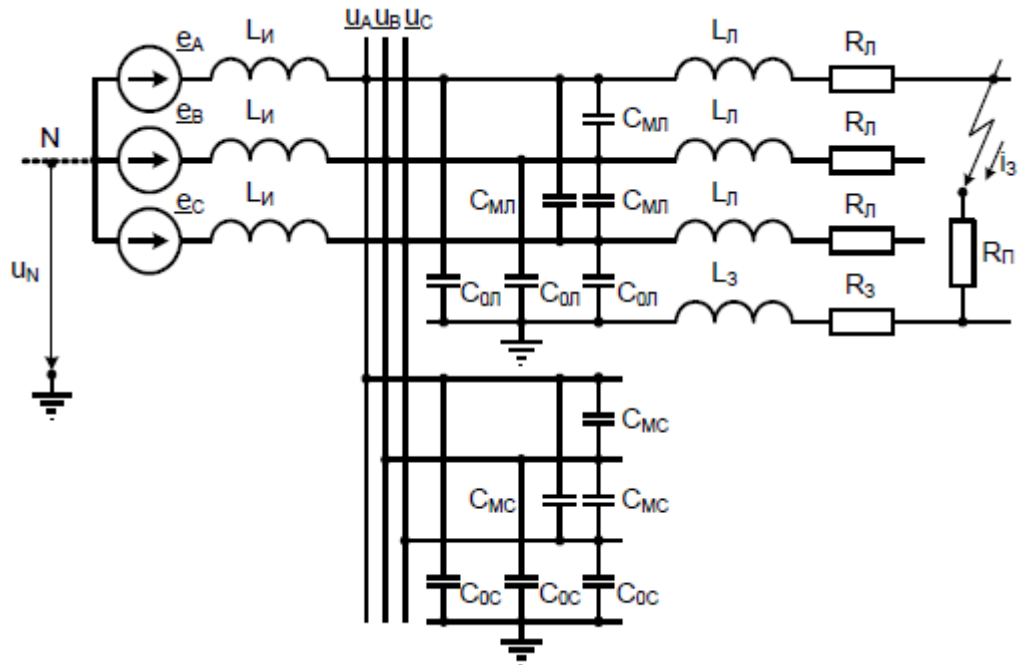


Рисунок 2.2. Двочастотна схема заміщення мережі 6-10 кВ для дослідження перехідних процесів при ОЗЗ

2.3 Аналіз умов застосовності двочастотної схеми заміщення для розрахунків перехідних процесів при ОЗЗ у мережах 6-10 кВ.

Для оцінки точності розрахунків перехідних процесів по схемі заміщення рис. 2.2 і визначення області її застосування порівняємо результати аналітичного рішення з результатами моделювання на ЕОМ для схеми мережі, враховується розподілений характер параметрів ліній.

У захистах мереж 6-10 кВ використовуються складники нульової послідовності. Тому в [13, 14] для отримання аналітичного рішення застосований метод симетричних складових, що дозволяє найбільш просто отримати рішення для складових нульовий послідовності. На рис. 2.3 наведено комплексну схему заміщення по методу симетричних складових. У схемі рис. 2.3 крім режиму ізольовані нейтралі враховано також можливість заземлення

нейтралі мережі через ДГР

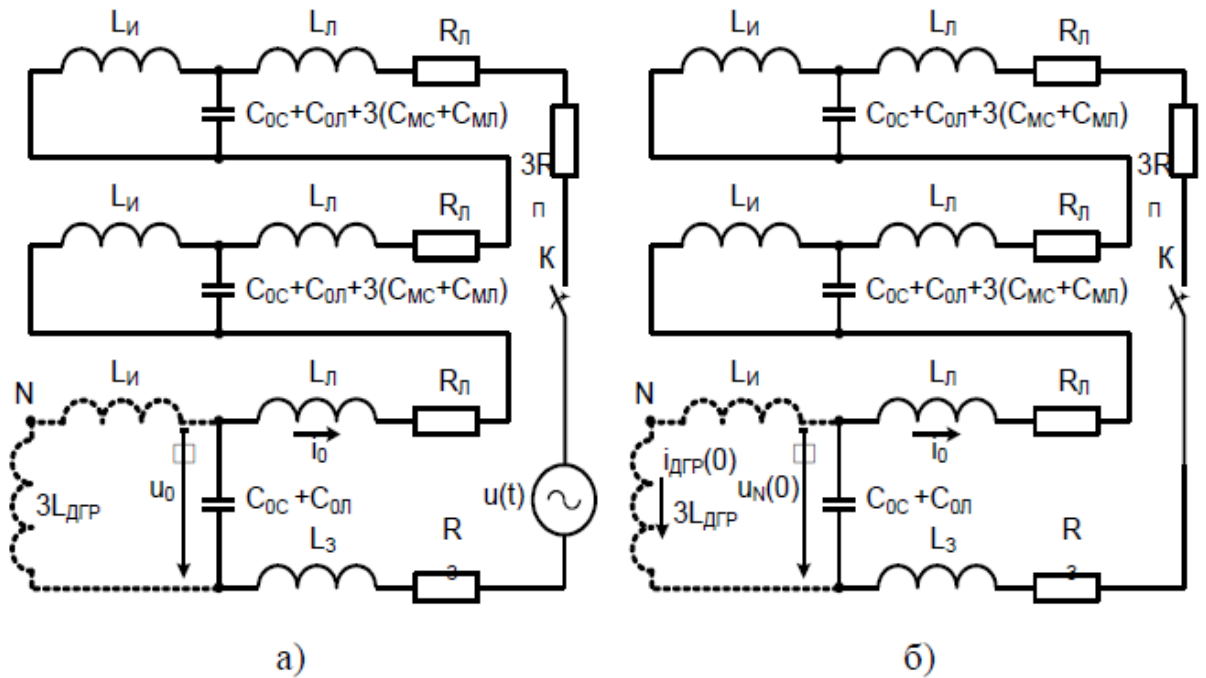


Рисунок 2.3 - Комплексні схеми заміщення для розрахунку перехідного процесу при ОЗЗ: а) - при нульових початкових умовах ($u_N(0) = 0, i_{ДГР}(0) = 0$); б) - для визначення складових, зумовлених ненульовими початковими умовами в момент пробною ізоляції ($u_N(0) \neq 0, i_{ДГР}(0) \neq 0$)

Для мережі, працюючою з ізольованою нейтраллю, при $u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ у [13, 14] для напруги нульової послідовності отримано наступне рішення:

$$U_0(t) \cong U_m \sin(\omega t + \varphi) - U_m \alpha_1 e^{-\delta_1 t} \left[1 - \frac{U_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right] * \sin \varphi \cos \omega_p t - \\ - U_m \alpha_2 e^{-\delta_2 t} \left[1 - \frac{U_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right] * \sin \varphi \cos \omega_3 t$$

$$\text{де } \alpha_1 = \frac{\omega_1^2 - \omega_3^2}{\omega_p^2 - \omega_3^2}; \quad \alpha_2 = \frac{\omega_1^2 - \omega_p^2}{\omega_3^2 - \omega_p^2}.$$

Частоти та постійні згасання розрядних та зарядних коливань визначаються по виразам:

$$\omega_{p,3} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{k_c \omega_1^2 + \omega_2^2 \pm \sqrt{k_c^2 \omega_1^4 + \omega_2^4 + (2k_c - 4) \omega_1^2 \omega_2^2}};$$

$$\delta_{p.3} = \alpha \frac{\omega_{p.3}^2 - \omega_2^2}{2(2\omega_{p.3}^2 - \omega_2^2 - k_c \omega_1^2)} . \quad (2.3)$$

Струм нульової послідовності в місці пошкодження визначається з виразів:

$$i_3^{(1)} = 3i_0 = C_1 \frac{du_0}{dt}$$

Для перевірки адекватності та оцінки точності отриманого аналітичного рішення отримані на його основі функції $u_N(t) = u_0(t)$, $i_3(t) = 3i_0(t)$ порівнювалися з аналогічними залежностями, отриманими на математичній моделі мережі 6 кВ, виконаної у системі моделювання Matlab з обліком розподіленого характеру параметрів пошкодженою і непошкоджених ліній. Моделювана мережа 6 кВ містила 10 ліній різної довжини ($l_{\text{л}} = 100 \dots 5000$ м), сумарний ємнісний струм мережі $I_{C\Sigma} = 25$ А, моделювалися ОЗЗ на відстані від шин $l_3 = 100 \dots 5000$ м.

Порівняння аналітичного рішення по рівнянням (2.1) - (2.4) з результатами розрахунку складових $i_0(t)$ і $u_0(t)$, виконаного в системі моделювання Matlab на математичній моделі мережі 6-10 кВ, враховує розподілений характер параметрів лінії, показало, що похибки аналітичного рішення, за винятком випадку ОЗЗ поблизу шин, не перевищує 10-20%, що прийнятно для наближених оцінок параметрів перехідних струмів (наприклад, рис. 2.3). З рис. 2.3, а та 2.3, б також видно, що точність відтворення розрядної складової струму та напруги нульової послідовності зростає в міру видалення точки замикання на землю від шин джерела живлення.

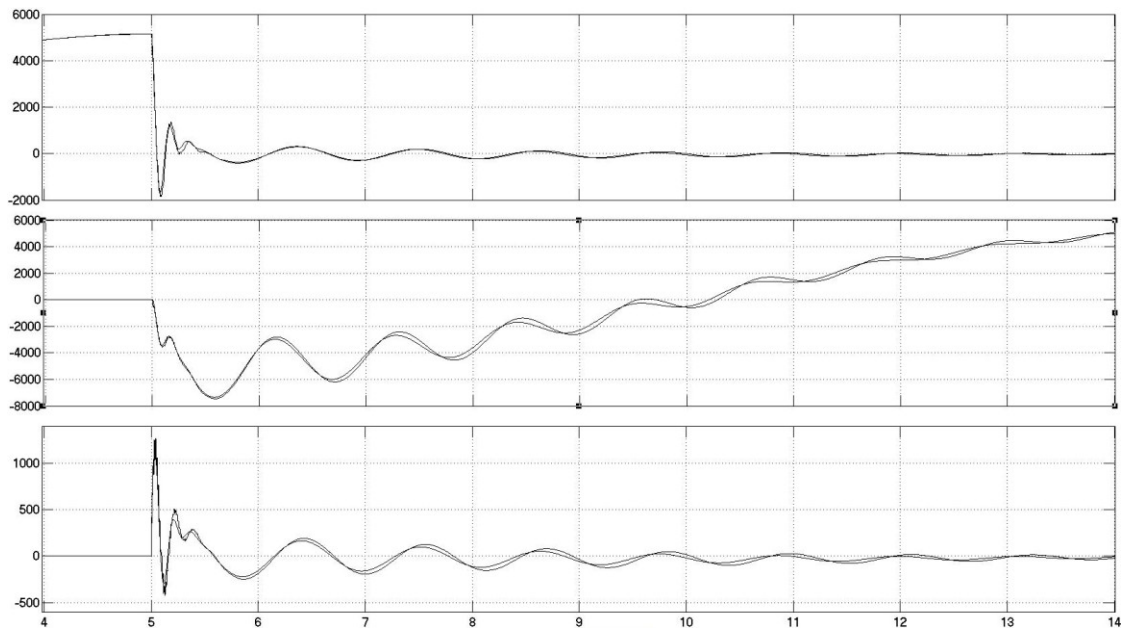
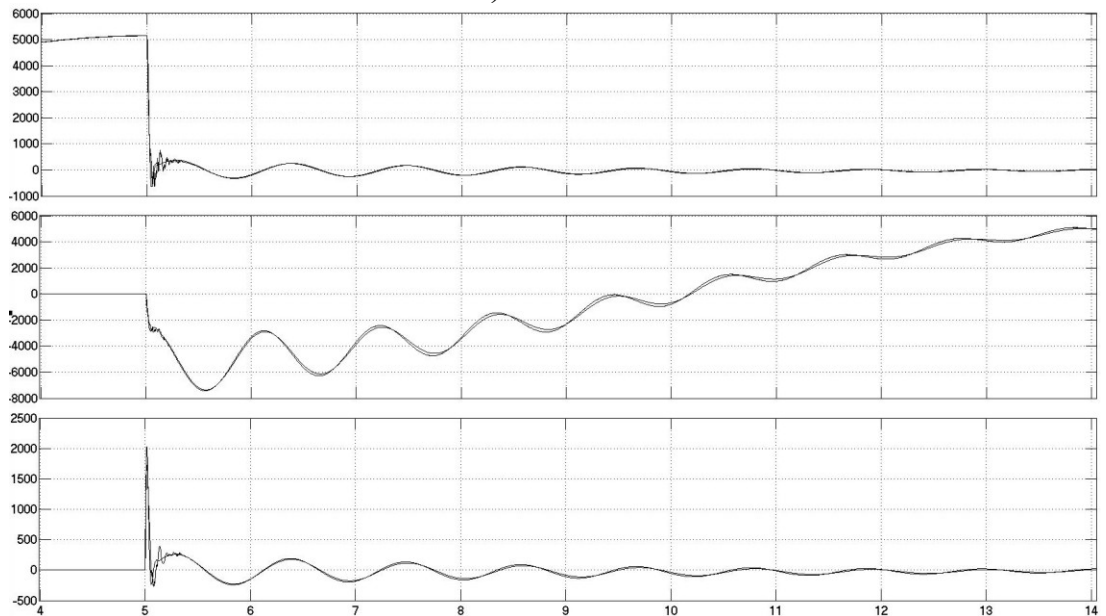
а) $l_3 = 1$ кмб) $l_3 = 0,2$ км

Рисунок 2.4 - Порівняння результатів аналітичного розрахунку $i_0(t)$ і $u_0(t)$ з результатами моделювання в системі Matlab: 1 - сигнал, отриманий на моделі мережі в системі моделювання Matlab; 2 - сигнал, отриманий на основі аналітичного рішення

Висновки по другому розділу

Таким чином, запропоновані в [13, 14] розрахункова двочастотна схема заміщення мережі 6-10 кВ і отримане на її аналітичне рівняння перехідного

процесу при ОЗЗ дозволяють не тільки розглядати розрядну і зарядну стадію як єдиний перехідний процес, а й за певних умовах отримати достатньо точні оцінки значень не тільки зарядних, але і розрядних складових струмів і напруги. З обліком цього нижче розглянуто можливість застосування цього рішення для аналітичної оцінки максимальних перенапруг в перехідних режимах ОЗЗ.

РОЗДІЛ 3

ЗАСТОСУВАННЯ АНАЛІТИЧНОГО РІШЕННЯ В СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ПЕРЕНАПРЯЖЕНЬ ПРИ ДУГОВИХ ПЕРЕМІЖНИХ ЗАМИКАННЯХ НА ЗЕМЛЮ В МЕРЕЖАХ 6 - 10 кВ

3.1 Основні теорії дугових ОЗЗ, що перемежуються.

Відомо що більшість ОЗЗ в мережах 6-10 кВ, що працюють із ізольованою нейтраллю, має дуговий перемежований характер [1-4, 6, 8, 9, 10 і ін]. Існують три основні теорії виникнення максимальних перенапруг при дугових переміжних ОЗЗ в електричних мережах середньої напруги, працюючих з ізольовані нейтраллю: Петерсена Ст, Петерса Дж. і Сліпяна Х. і Білякова Н.М. [1-4 і ін]. Згідно теорії Петерсена Ст, запропонованої в 1916 р., запалювання дуги відбуваються кожен напівперіод промислової частоти при максимальному значенні відновлювального напруги на пошкодженій фазі, а гасіння дуги - при першому проходженні перехідного струму замикання через нульові значення (Рис.3.1).

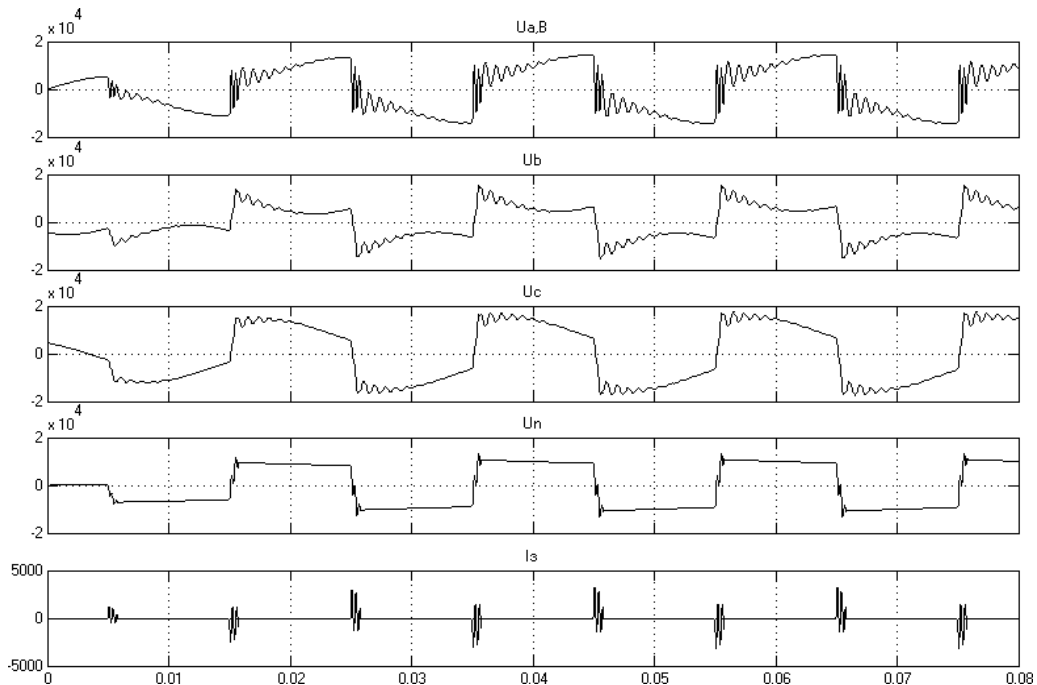


Рисунок 3.1 - Дугове переміжне ОЗЗ з теорії Петерсена в кабельній мережі 6 кВ з ізольованою нейтраллю: U_a , U_b , U_c – напруги на шинах; U_n – напруга на нейтралі мережі; I_3 – струм у місці ОЗЗ

За теорією Петерса Дж. і Сліп'яна Х., розробленої в 1923 р., запалення дуги відбуваються кожен період промислової частоти при максимальних напругах на пошкодженій фазі, а гасіння – при проходженні через нульові значення ємнісного струму промислової частоти (рис. 3.2).

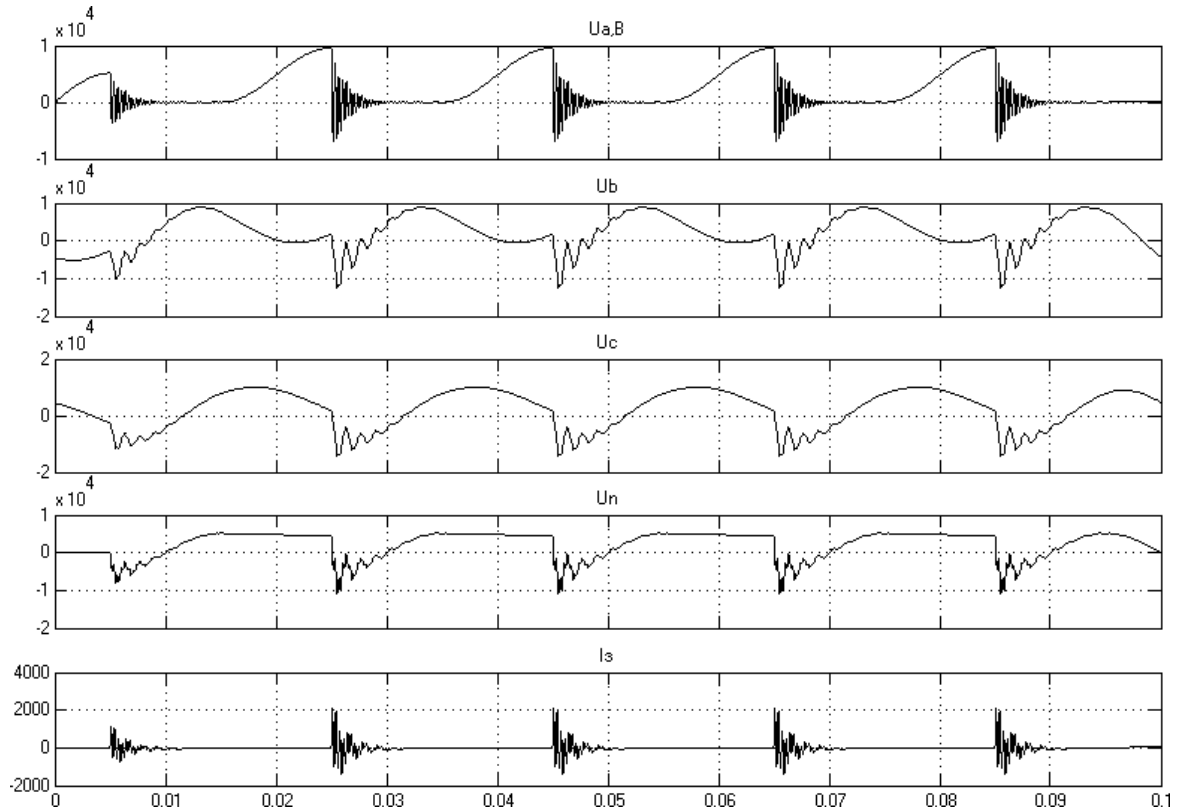


Рисунок 3.2 - Дугове переміжне ОЗЗ з теорії Петерса і Сліп'яна в кабельної мережі 6 кВ: U_a , U_b , U_c , U_n , I_z – те саме, що і на рис.

3.1

В даний час найбільш точно відображає фізичний характер процесів при дугових переміжних ОЗЗ і дає найбільш точні оцінки максимальних перенапруг вважається теорія Н.М. Білякова [15].

Відповідно до цієї теорії, дуга може згаснути як при першому, так і будь-якому наступному переході через нуль вільною складника струму замикання. Спроба гасіння закінчується вдало, якщо перший високочастотний максимум відновлюваної напруги - пік гасіння $U_{n,z}$ (рис. 3.3) не перевищує певного критичного значення:

$$U_{n,z} \leq U_{кр},$$

де величина $U_{кр}$ характеризує діелектричну міцність проміжок для моменту часу, рівного напівперіоду вагань гасіння.

Встановлена Біляковим Н.М. при експериментальних дослідженнях максимальна величина $U_{н.г}$ дорівнює ~ 1800 В, що складає для мереж 6 кВ $0,37U_{ф.ном}$, для мереж 10 кВ - $0,22U_{ф.ном}$. При виконанні умови (3.1) гасіння не завершиться, т.б. дуга встановиться знову.

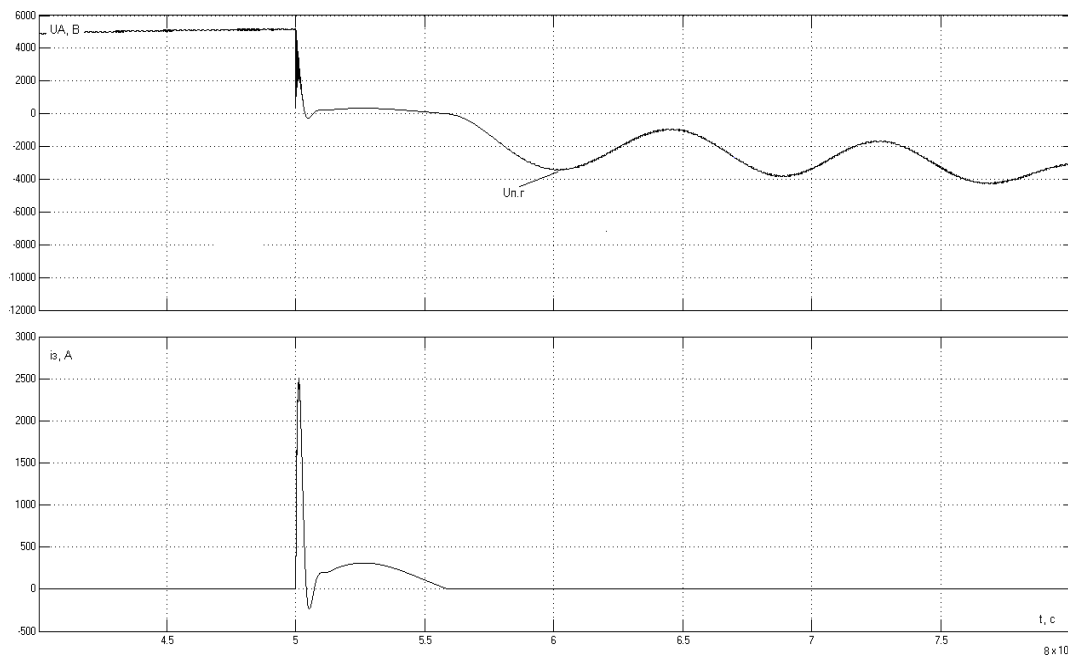


Рисунок 3.3 - Пік гасіння при одноразовому пробію ізоляції на фазі «А» в мережі з $U_{ном} = 6$ кВ та $I_{3\Sigma} = 20$ А

У відповідно з теорією Білякова Н.М. для виникнення максимальних перенапруг не потрібно повторних запалювань дуги, тому достатньо розглянути один цикл «гасіння – запалення». В цьому циклі гасіння має відбуватися в момент максимуму ЕРС пошкодженої фази і при максимально допустимій для гасіння крутості струму, а наступне запалювання повинно трохи випереджати максимум що відновленої напруги на пошкодженій фазі (кут запалювання $\psi \approx 68^\circ$ [15]).

На основі викладених положень Біляковим було запропоновано наступна формула для оцінки максимальних перенапруг:

$$U_{пер} = \sqrt{3}U_m \sin(\varphi + 30^\circ) + (U_m \sin\varphi - U_{см}) \frac{C_{0\Sigma}}{C_{0\Sigma} + C_{м\Sigma}} (1-d);$$

$$U_{cm} = U_m + \frac{U_{н.э}}{2} \leq 1,2U_m,$$

де U_m - амплітуда фазного напруги мережі; φ_C - кут (фаза) запалювання заземлюючої дуги; $U_{cm} = U_N(\varphi)$ - напруга на нейтралі мережі в момент запалювання дуги (напруга зміщення нейтралі); $C_{0\Sigma}$ і $C_{m\Sigma}$ - сумарні ємності мережі відповідно між фазою і землею і між фазами; d - коефіцієнт, враховує згасання вільних коливань внаслідок втрат в контурі нульовий послідовності; $\frac{C_{0\Sigma}}{C_{0\Sigma} + C_{m\Sigma}} \cdot (1-d)$ що враховує зменшення коливань через міжфазні ємності та згасання.

Максимальні перенапруги виникають при вугіллі запалювання φ , рівному

$$\varphi = \arctg \left[\frac{2 C_{0\Sigma}}{\sqrt{3} C_{0\Sigma} + C_{m\Sigma}} (1-d) + \sqrt{3} \right].$$

При характерних для кабельних мереж співвідношень $C_{0\Sigma}/C_{m\Sigma} \approx 3$ та

$(1-d) \approx 0,9$ максимальні перенапруги виникають на відстаючій фазі (наприклад, фазі «В» при ОЗЗ на фазі "А") при куті запалювання $\varphi \approx 68^0$ мають максимальне значення

$$U_{пер.макс} \approx 3,2U_m.$$

У рішенні, запропонованому Беляковим М.М., не враховується дійсний характер зміни напруги на нейтралі мережі $u_N(t)$ і дійсна частота вільних коливань напруг перехідного процесу. Тому з теорії Белякова Н.М. по суті передбачається, що напруга на нейтралі мережі за чверть періоду вільних коливань напруги не змінюється, залишаючись постійною, і при пробі в момент максимуму напруги на «хворій» фазі ($\varphi = 90^0$) перенапруги обох непошкоджених фаз будуть однакові. Фактично, через кінцеву частоту коливань (частота зарядних коливань, пов'язаних з додатковим зарядом ємностей непошкоджених фаз залежно від параметрів мережі, джерела

живлення, віддаленості місця ОЗЗ від шин може змінюватися від сотень герц до кількох кілогерц), при $\varphi = 90^\circ$ перенапруги на відстаючій фазі «В» будуть завжди менше перенапруг на випереджальній фазі "С". Тому представляє інтерес більше точна аналітична оцінка перенапруг при дугових ОЗЗ з обліком реального характеру перехідних процесів при ОЗЗ.

3.2 Аналітична оцінка перенапруг при дугових переміжних ОЗЗ.

Для уточнення умов виникнення і оцінки максимальних перенапруг по теорії Білякова Н.М. скористаємося розглянутим вище рішенням рівнянь перехідного процесу при ОЗЗ у мережі із ізольованою нейтраллю, отриманим у [14, 19] для складових нульової послідовності за двочастотною схемою заміщення мережі 6-10 кВ по рис. 2.1:

$$u_0(t) = u_N(t) \approx U_m \sin(\omega t + \varphi) - U_{mp} e^{-\delta_p t} \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right] * \sin \varphi \cos \omega_p t - \\ - U_{m3} e^{-\delta_3 t} \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right] * \sin \varphi \cos \omega_3 t.$$

Струм нульовий послідовності і його складники: вимушена, розрядна та зарядна знаходяться з рівняння:

$$i_{03} = -C_{0\Sigma} \frac{dU_0}{dt} = -(i_{0np} + i_{0p} + i_{03}) = -C_{0\Sigma} U_m \cos(\omega t + \varphi) \\ - C_{0\Sigma} U_{mp} e^{-\delta_p t} \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right] \cdot \sin \varphi \left[-\delta_p \cos \omega_p t + \omega_p \sin \omega_p t \right] - \\ - C_{0\Sigma} U_{m3} e^{-\delta_3 t} \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right] \cdot \sin \varphi \left[-\delta_3 \cos \omega_3 t + \sin \omega_3 t \right] \approx \\ \approx C_{0\Sigma} U_m \omega \cos(\omega t + \varphi) - C_{0\Sigma} U_{mp} e^{-\delta_p t} \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right] \cdot \sin \varphi \sin \omega_3 t - \\ - C_{0\Sigma} U_{m3} e^{-\delta_3 t} \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right] \cdot \sin \varphi \sin \omega_3 t = \\ = I_{mnp} \cos(\omega t + \varphi) - I_{mp} e^{-\delta_p t} \sin \omega_p t - I_{m3} e^{-\delta_3 t} \sin \omega_3 t, \quad (3.7)$$

де $I_{mnp} = \sqrt{2} I_{C\Sigma}$ - амплітуда вимушеної складової перехідного струму i_0 ;

$$I_{mp} \approx C_{0\Sigma} \omega_p U_{mp} \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right] \cdot \sin \varphi - \text{амплітуда розрядної складової перехідного}$$

струму i_0 ;

$$I_{mз} \approx C_{0\Sigma} \omega_3 U_{mз} \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right] \cdot \sin \varphi - \text{амплітуда зарядної складової перехідного}$$

струму i_0 .

В індуктивностях джерела живлення та L_i протікають тільки вимушена та зарядна складові струму i_0 . Нехтуючи падінням напруги на індуктивностях L_I від складових промислової частоти і враховуючи, що струми зарядної складової в непошкоджених фазах «В» і «С» однакові і дорівнюють $3i_{0з} / 2$, а у пошкодженій фазі «А» їх сумі трифазної схеми заміщення мережі (рис. 1.4) для фазної напруги отримаємо:

$$u_a \approx u_N + e_a - L_u \frac{d(3i_{0з})}{dt};$$

$$u_b \approx u_N + e_b - \frac{L_u}{2} \frac{d(3i_{0з})}{dt};$$

$$u_c \approx u_N + e_c - \frac{L_u}{2} \frac{d(3i_{0з})}{dt},$$

де

$$e_a = U_m \sin(\omega t + \varphi);$$

$$e_b = U_m \sin\left(\omega t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right);$$

$$e_c = U_m \sin\left(\omega t + \varphi + \frac{2\pi}{3}\right).$$

Підставляючи в вирази (3.8), (3.9) і (3.10) u_N з виразу (3.6) і $i_{0з}$ з (3.7), отримаємо аналітичне рішення для напруги на пошкодженій і неушкоджених фазах. При визначенні максимальних перенапруг на неушкоджених фаз значення $u_N(0)$ приймається рівним максимальному напрузі зміщення u_{cm} за виразом (3.5). Перенапруження на неушкоджених фазах досягають

максимального значення в момент, коли похідна зарядної складової струму $i_{03}(t)$ досягає максимуму, тобто при $t = t_m = 2\pi / 4\omega_3$. З цього, зокрема, випливає, що максимальні значення максимум перенапруг на непошкоджених фазах залежать від частоти коливань зарядних при ОЗЗ.

Перевірка адекватності та достовірності отриманого аналітичного рішення була виконана за допомогою порівняння розрахунків за виразами (3.8) – (3.10) та результатами моделювання на ЕОМ у програмному комплексі MATLAB перехідного процесу при ОЗЗ за схемою заміщення рис. 1.4.

На рис. 3.4 – 3.7 наведено розрахункові залежності напруги на нейтралі $u_N(t)$, струму в місці ОЗЗ $i_3(t)$, напруг непошкоджених фаз $u_b(t)$, $u_c(t)$, отримані на математичній моделі в системі Matlab та на основі запропонованого аналітичного рішення.

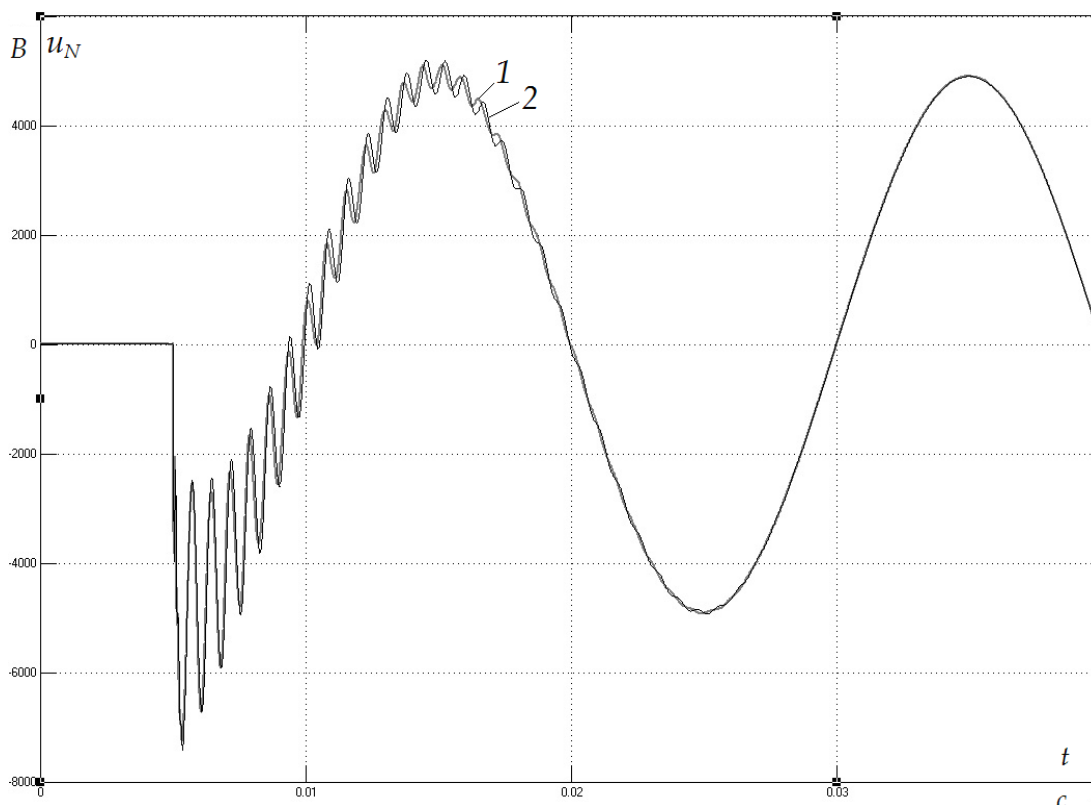


Рисунок 3.4 - Залежно напруги на нейтралі мережі $u_N(t)$ 1 - моделювання на ЕОМ в системі Matlab; 2 – аналітичне рішення

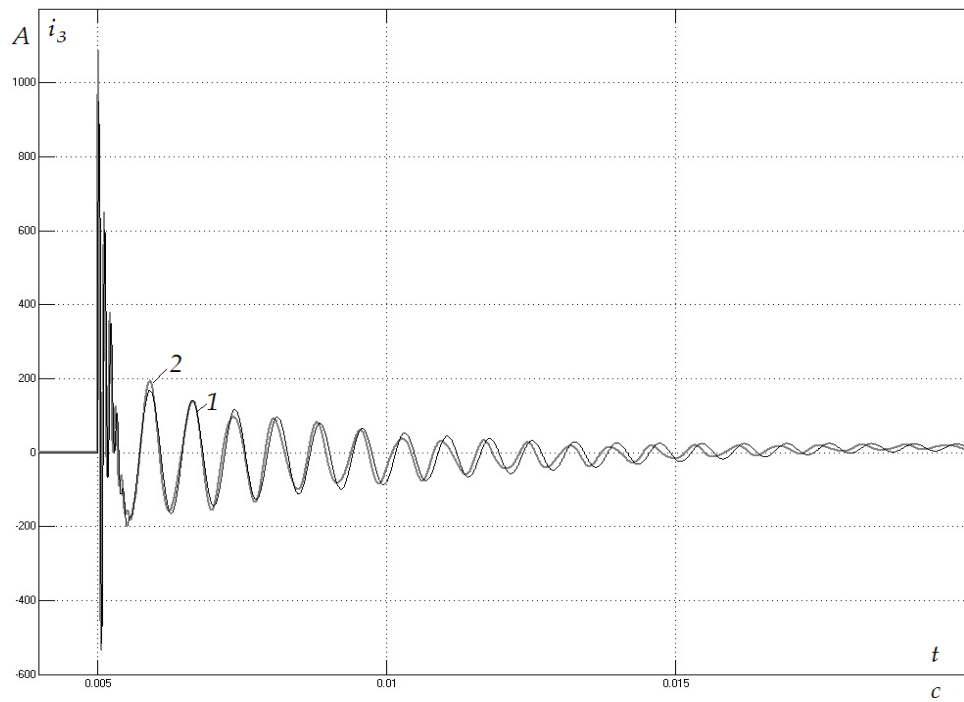


Рисунок 3.5 - Залежно струму в місці ОЗЗ $i_3(t)$:

1 - моделювання на ЕОМ в системі Matlab; 2 –аналітичне рішення

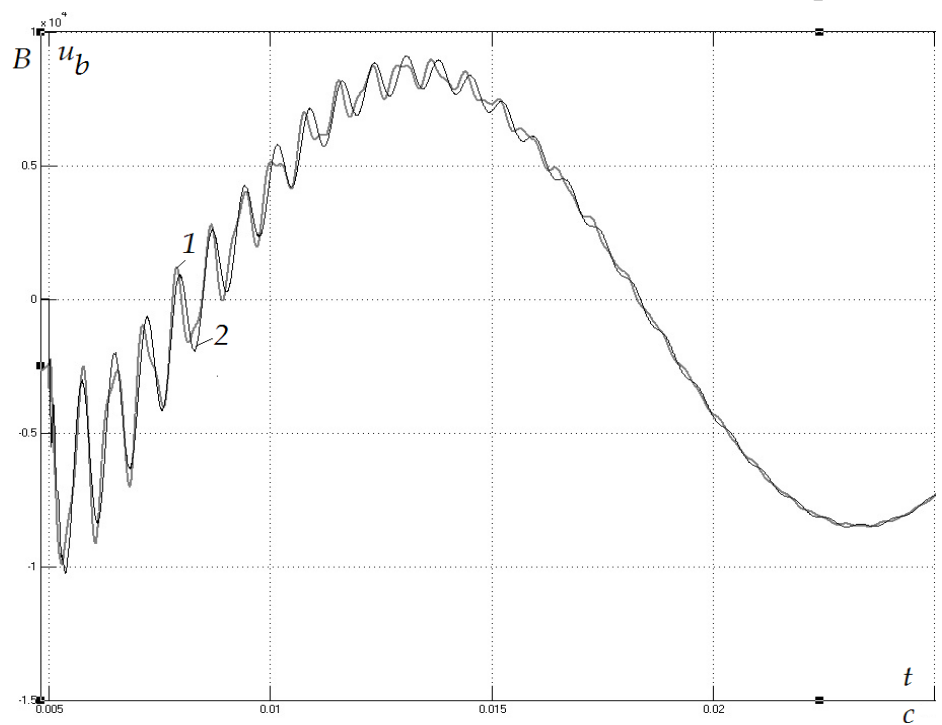


Рисунок 3.6 - Залежність напруги на непошкодженій відстаючій фазі

$u_b(t)$:

1 - моделювання на ЕОМ в системі Matlab; 2 –аналітичне рішення

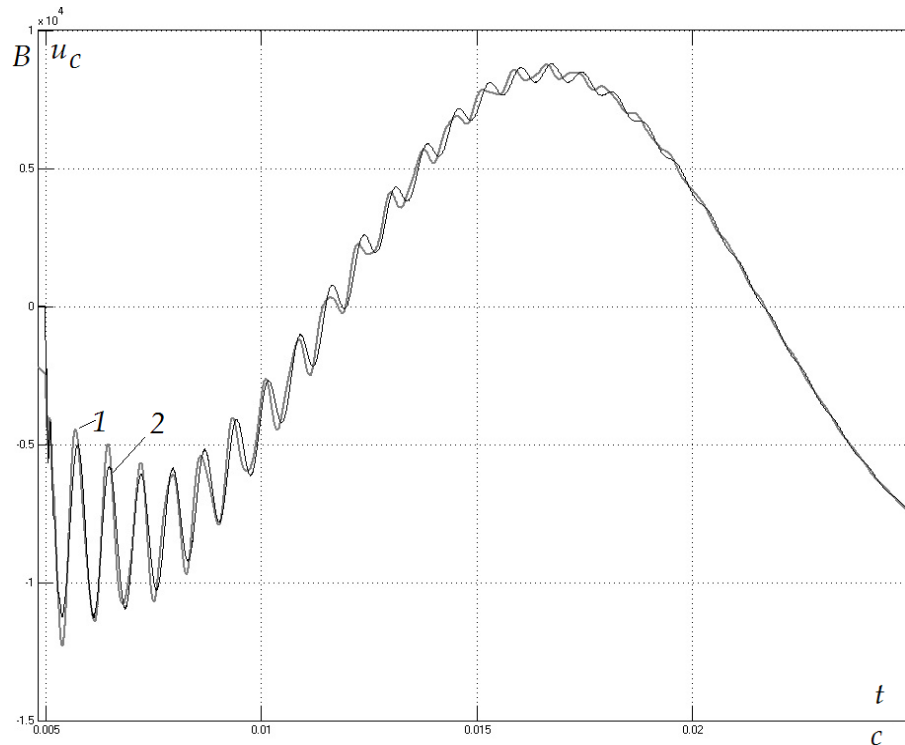


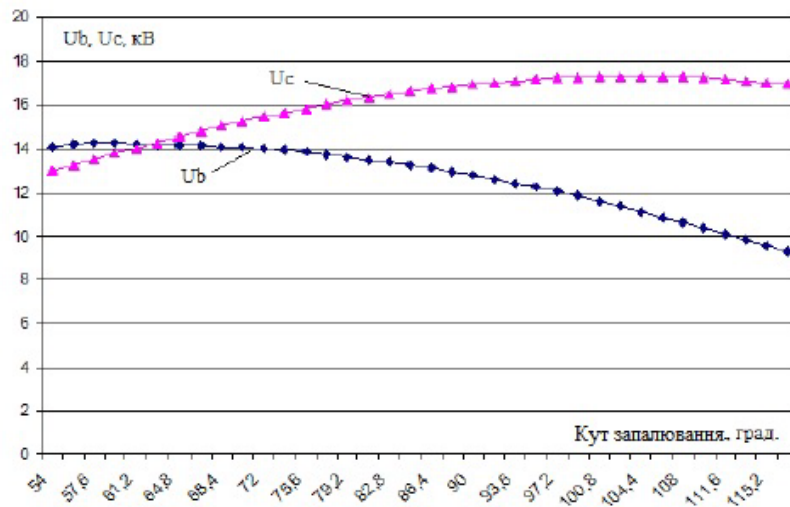
Рисунок 3.7 - Залежність напруги на неушкодженій випереджальній фазі $u_c(t)$: 1 - моделювання на ЕОМ системі Matlab; 2 - аналітичне рішення

Порівняння результатів моделювання на ЕОМ в системі Matlab і аналітичних розрахунків по двочастотній схемою заміщення (рис. 1.4) показало, що похибки останніх не перевищують 10-15%, що прийнятно для інженерних розрахунків

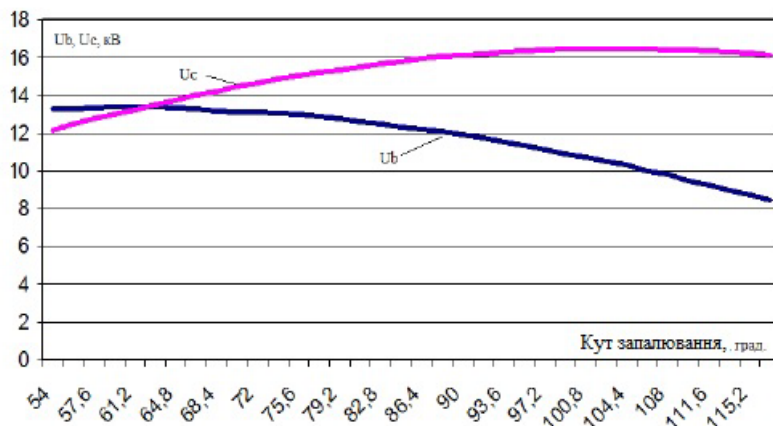
3.3 Застосування аналітичного рішення для дослідження умов виникнення максимальних перенапруг.

Отримане вище аналітичне рішення було використане для дослідження умов виникнення максимальних перенапруг по теорії Білякова Н.М. Аналіз результатів обчислень показав, що з зменшенням кута запалювання φ_3 по відношенню до моменту максимуму напруги на пошкодженій фазі «А» ($\varphi_3 = 90^\circ$) перенапруги на відстаючій неушкодженій фазі «В», як і показано Беляковим Н.Н., збільшуються і при значеннях $\varphi_3 = 65^\circ \dots 70^\circ$ досягають максимуму. Величина перенапруг на випереджальній неушкодженій фазі «З» при цьому зменшується, проте максимальне значення перенапруг на

випереджальній фазі «З» залишається більшим, ніж фазі «В». При збільшенні значення кута запалення φ_3 по відношенню до моменту максимуму напруги на пошкодженій фазі «А» ($\varphi_3 = 90^0$) перенапруги на фазі «В», що відстає, зменшуються, а на випереджувальній фазі «С» збільшуються і досягають максимуму при значеннях $\varphi_3 = 105...110^0$. На рис. 3.10 наведено отримані на основі аналітичного вирішення залежності максимальних перенапруг на непошкоджених фазах «В» та «С» від кута запалення φ_3 .



а)



б)

Рисунок 3.8 - Залежність максимальних перенапруг на здорових фазах «В» та «С» від кута запалювання φ_3 в мережі 6 кВ з $I_{3\Sigma} = 20$ А при різних значеннях віддаленості місця ОЗЗ від шин $l_3 = 0,1$ км (а) і $l_3 = 1$ км (б)

З рис. 3.8 можна бачити, що зі зменшенням кута запалення дуги φ_3 по відношенню до моменту максимуму напруги на пошкодженій фазі від ($\varphi_3 = 90^\circ$) перенапруги на неушкодженій фазі «В», що відстає, збільшуються і досягають максимуму, як це і обґрунтовується в теорії Белякова Н.М., при $\varphi_3 = 60-68^\circ$, проте залишаються при цьому менше, ніж перенапруги на випереджальній ушкодженій фазі при $\varphi = 90^\circ$.

Максимальні перенапруги при дугових ОЗЗ, що перемежуються, виникають навіть не при $\varphi_3 = 90^\circ$, а при кутах запалення $\varphi_3 = 105\dots110^\circ$. Отримані результати були перевірені моделюванням дугових ОЗЗ, що перемежуються, на ЕОМ. У математичній моделі мережі 6 кВ у системі Matlab було враховано розподілений характер параметрів ліній. При розрахунках параметри моделі мережі з $U_{ном} = 6$ кВ варіювалися в таких межах: сумарний ємнісний струм мережі $I_C = 5\dots25$ А, струм трифазного КЗ на шинах (що визначає індуктивність джерела живлення) $I_k = 5\dots20$ кА, віддаленість місця пробую від шин $l_3 = 0\dots5$ км, кут запалення дуги $\varphi_3 = 60\dots120^\circ$.

Аналіз математичної моделі мережі 6 кВ підтвердив, що максимальні перенапруги виникають не на відстаючій, а на випереджаючій фазі при $\varphi = 105\dots110^\circ$ (наприклад, рис. 3.9).

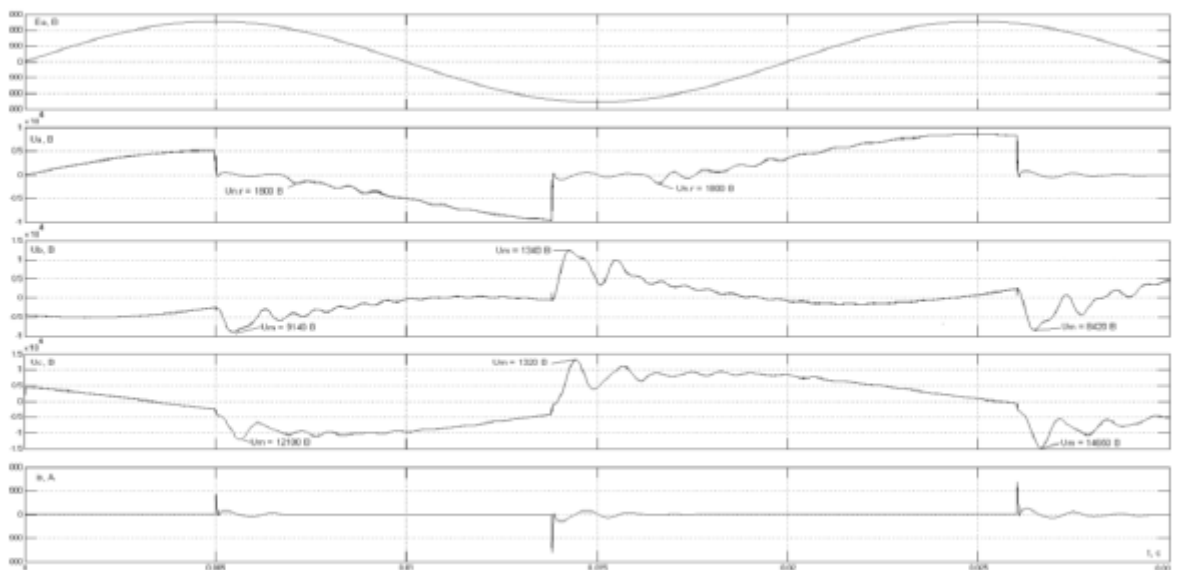


Рисунок 3.9 - Перенапруги на непошкоджених фазах «В» та «С» при

дуговому уривчастому ОЗЗ на фазі "А" в мережі 6 кВ з $I_{3\Sigma} = 25$ А і віддаленості місця ОЗЗ від шин $l_3 = 0,25$ км при різних значеннях кута запалювання φ_3 : 1-й пробій ізоляції при $\varphi = 90^\circ$ 2-й пробій – при $\varphi_3 \approx 68^\circ$ (теорія Белякова Н.М.); 3-й пробій при $\varphi = 110^\circ$

Висновки по третьому розділу

Аналіз математичної моделі показав також, що параметри мережі (сумарний ємнісний струм $I_{C\Sigma}$, струм трифазного КЗ на шинах I_k , віддаленість місця пробою від шин l_3) на вказаний характер залежності максимальних перенапруг на непошкоджених фазах від кута запалювання φ_3 суттєвого впливу не надають, проте впливають на максимальні значення перенапруг: перенапруги збільшуються при збільшенні $I_{3\Sigma}$ і зменшенні індуктивності джерела живлення (тобто струму I_k) і віддаленості l_3 точки ОЗЗ від шин.

ВИСНОВКИ

1. Сформульовано завдання, що потребують досліджень електромагнітних перехідних процесів при ОЗЗ в електричних мережах 6-10 кВ.

2. Показано, що найкращим методом дослідження електромагнітних перехідних процесів при ОЗЗ у мережах 6-10 кВ представляється поєднання аналітичних методів рішення аналізованої завдання на основі спрощених моделей електричної мережі і методу імітаційного моделювання на ЕОМ. Тому вдосконалення і розвиток аналітичних методів дослідження перехідних процесів при ОЗЗ у мережах 6-10 кВ і методів моделювання їх на ЕОМ представляє актуальну завдання.

3. Дано класифікацію підходів та методів отримання аналітичного вирішення рівнянь перехідних процесів при ОЗЗ у мережах 6-10 кВ та їх порівняльний аналіз. Показано, що достатньо точне аналітичне рішення може бути отримане на основі двочастотної схеми заміщення електричної мережі 6-10 кВ, що дозволяє розглядати розрядну і зарядну стадії як єдиний перехідний процес.

4. З використанням аналітичного рішення, отриманого для двочастотної схеми заміщення з застосуванням методу симетричних складових, отримано аналітичне рішення для оцінки перенапруг мережах 6-10 кВ в перехідних режими ОЗЗ.

5. На основі рішення по п. 4 досліджено умови виникнення максимальних перенапруг з теорії Белякова Н.М. Встановлено, що максимальні перенапруги виникають не на відстаючої, а на випереджальної непошкодженою фазі при значеннях кута запалювання $\varphi_3 \approx 105 \dots 110^\circ$.

6. Результати аналітичних досліджень по п. 5 перевірені з використанням математичного моделювання на ЕОМ у системі Matlab на моделі мережі 6 кВ, що враховує розподіл характеру параметрів ліній.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сиротинський Л.І. Техніка високих напруги. Хвильові процеси і внутрішні перенапруги в електричних системах. М.: Держенерговидав. 1959. 368 с.
2. Вільгейм Р., Уотерс М. _ Заземлення нейтралі в високовольтних системах. - М.-Л.: Держенерговидав, 1959.
3. Лихачов Ф.А. Замикання на землю в мережах з ізольовані нейтраллю і з компенсацією ємнісних струмів. - М.: Енергія, 1971.
4. Petersen W. Unterdrückung des aussetzenden Erdschlusses durch Nullpunkt widerstände und Funkenableiter // ETZ - 1918, U. 35 - С.341.
5. Шалит Г.М. Підвищення ефективності профілактики ізоляції в кабельних мережах // Праці ВНДІЕ. Вип. 8. - М.: Держенерговидав. - 1959. - З. 77 -97.
6. Сирота І.М., Кисленка С.М., Михайлов А.М. Режими нейтралі електричних мереж. – Київ: Наукова Думка, 1985.
7. Сирота І.М. Про режими нейтралі мереж 6 – 35 кВ // Електричні станції. - 1988, № 6. - С. 69 – 73.
8. Вайнштейн Р.А., Головка С.І., Коломієць Н.В. Режими нейтралі в електричних системах. Уч. допомога.- Томськ: Томськ. Політехн. ін-т.- 1981. 79с.
9. Євдокунін Г.А., Гудилін С.В., Корепанів А.А. Вибір способу заземлення нейтралі в мережах 6 - 10 кВ // Електрика. - 1998, № 12. - З. 8-22.
10. Шуїн В.А. Розрахунок перенапруг при дугових переривчастих замикання на землю. Залежність від режиму заземлення нейтралі. // Новини ЕлектроТехніки - № 4(58) - 2009. - С.
11. Шуїн В.А., Солодов С.В. Про ефективності обмеження перенапруги при дугових замикання на землю різних режимів заземлення нейтралі електричних мереж 6-35 кВ // Вісник ІДЕУ - 2006 -№ 2.
12. Шуїн В.А. Вплив розряду ємності пошкодженою фази на перехідний процес при замикання на землю в кабельних мережах 3-10

кВ// Електрика, 1981. – С. 4-9.

13. Добрягіна О.А. Дослідження і розробка методів і коштів підвищення динамічної стійкості функціонування струмових захистів від замикань на землю в мережах 6-10 кВ /Діс. канд. техн. наук. - Іваново, Іванівськ. держ. енерг. ун-т, 2011 року.

14. Шуїн В.А. Теорія та практична реалізація захистів від замикань на землю, заснованих на використанні електричних величин перехідного процесу, для електричних мереж 6-35 кВ // Дис. ... докт. техн. наук. - Москва: ВНДІЕ. - 1994.

15. Біляков Н.М. Дослідження перенапруг при дугових замиканнях на землю в мережах 6 і 10 кВ // Електричні станції, 1957, № 5. - С. 31-36.

16. р. Обердорфер . Замикання на землю і боротьба з ними. - М.-Л.: Енерговидав, 1932.

17. Golding S. Дослідження перехідних процесів при замиканнях на землю у кабельних мережах. Вибір захисту від замикань на землю // Релейна захист. Пров. доповідь. СІGRE за ред. А.М. Федосєва. - М.: Держенерговидав, 1963. - С. 323-334.

18. <http://www.atpdesigner.de/>

19. Осцилографи світлопроменеві. Загальні технічні умови ГОСТ 9829-81. - М.: Видавництво стандартів, 1994.

20. Каганов З.Г. Хвильова напруга в електричних машинах. М.: Енергія. - 1970.

21. Koch W. Короточасні замикання на землю та їх дія на реле // Енергетичне огляд. Електротехнічний випуск, 1936, № 7.

22. Сирота І.М. Перехідні процеси при замиканнях на землю в компенсованій мережі при замиканні фази на землю / Запитання стійкості автоматики енергетичних систем. - Київ: Вид-во АН УСРСР, 1959. - З. 55-76.

23. Сирота І.М., Масляник В.В. Вільні кісткові струми замикання на землю в мережах малими струмами замикання на землю // Електрика. -

1977. -№ 3. - З. 38-43.

24. Сирота І.М., Кісленко С.М., Михайлов А.М. Режими нейтралі електричних мереж. - Київ: Наукова Думка, 1985.

25. Шуляк В.Г. Перехідні процеси в сірках з ізольовані нейтраллю при замиканні на землю // Звістки вишів. Енергетика. - 1969. -№ 1. - З. 1-6.

26. Шуляк В.Г. Дослідження релейних захистів від однофазних замикань на землю в мережах з ізольовані нейтраллю // Дис. ... канд. техн. наук. - Новочеркаськ, Новочеркаськ. політехн. ін-т, 1968.

27. Левінштейн, М.Л. Операційне обчислення в завданнях електротехніки. Вид. 2-ге, дод. - Л., «Енергія», 1972.