

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЧЕРНІГІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

ЗАХИСТ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ВІД ПЕРЕНАПРУГ

Методичні вказівки до лабораторних робіт здобувачам вищої освіти
за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Обговорено і рекомендовано
на засіданні кафедри ЕІ та ІВТ
протокол № 11 від 09.06.2021р.

Чернігів
2021

Захист електричних мереж від перенапруг. Методичні вказівки до лабораторних робіт здобувачам вищої освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» /Укл.: І.В. Діхтярук., А.Л. Приступа – Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2021. – 37 с.

Укладачі: Діхтярук Ігор Віталійович, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри електричних систем і мереж
Приступа Анатолій Леонідович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій.

Відповідальний за випуск: Приступа Анатолій Леонідович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій.

Рецензент: Болотов Максим Геннадійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ОПН – обмежувач перенапруг нелінійний

ПЛ – повітряна лінія;

КЛ – кабельна лінія;

РУ – розподільча установка;

ОЗЗ – однофазні замикання на землю;

ДГК – дугогасна котушка;

ТН – трансформатора напруги.

ВСТУП

Ці методичні вказівки складено для проведення циклу лабораторних робіт з дисципліни “Захист електричних мереж від перенапруг” для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти, що навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Метою лабораторного практикуму є закріплення теоретичних положень та отримання практичних навичок випробувань засобів захисту від перенапруг, моделювання, аналізу та прогнозування рівнів можливих перенапруг для різних режимів роботи електричних мереж.

Лабораторні роботи допомагають здобувачам набути навичок:

- комп'ютерного моделювання електромагнітних процесів в електричних мережах при аварійних та ненормальних режимах їх роботи;
- планування, організації та проведення вимірювань;
- аналізу результату моделювання та вимірювань;
- якісного оформлення звітів виконаних робіт.

При виконанні лабораторних робіт студенти отримують такі фахові компетентності та програмні результати у відповідності до освітньої програми:

ФК1. Здатність застосовувати існуючі та розробляти нові методи, методики, технології та процедури для вирішення інженерних завдань електроенергетики, електротехніки та електромеханіки.

ФК4. Здатність демонструвати знання і розуміння математичних принципів і методів, необхідних для використання в електроенергетиці, електротехніці та електромеханіці.

ПР01. Відтворювати процеси в електроенергетичних, електротехнічних та електромеханічних системах при їх комп'ютерному моделюванні.

ПР05. Володіти методами математичного та фізичного моделювання об'єктів та процесів у електроенергетичних, електротехнічних та електромеханічних системах.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1

ВИВЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СПРАЦЮВАННЯ АПАРАТІВ ЗАХИСТУ ВІД ПЕРЕНАПРУГ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ 6-35КВ

Мета роботи: проаналізувати вплив параметрів апаратів захисту від перенапруг в електричних мережах різних класів напруги на параметри струмів і напруг в ненормальних режимах роботи електричних мереж

1.1 Теоретичні відомості

Для захисту електроустаткування електроустановок напругою 6-750 кВ змінного струму промислової частоти 50 Гц від грозових та комутаційних перенапруг повинні застосовуватись **обмежувачі перенапруги нелінійні (ОПН)**. Це засіб захисту для обмеження перенапруг, який підключається до електричної мережі без іскрових проміжків та робочі елементи якого виготовлені на основі високонелінійних металооксидних резисторів (варисторів) – нелінійних резисторів, які за нормальної напруги промислової частоти мають високий опір, а при перенапругах має малий опір [1-2].

ОПН, порівняно з вентиляними розрядниками, через відсутність іскрових проміжків і високу нелінійність вольтамперної характеристики їх елементів мають ряд переваг, а саме:

- глибокий рівень обмеження всіх видів перенапруг;
- здібність до розсіювання значної енергії;
- стабільність характеристик і стійкість до старіння;
- відсутність супроводжуючого струму після загасання хвилі перенапруги;
- простота конструкції і висока надійність в експлуатації;
- стійкість до зовнішніх забруднень ізоляційного корпусу;
- здатність обмежувати внутрішні перенапруги;
- при використанні полімерного корпусу висока вибухобезпечність;

- малі габарити та вага.

Для забезпечення надійного захисту електроустаткування електроустановок напругою 6-750 кВ від грозових та комутаційних перенапруг ОПН повинні застосовуватись при захисті [2]:

- ізоляції обмоток силових трансформаторів;
- шунтуючих реакторів;
- ізоляції трансформаторів напруги;
- місць переходу повітряних ліній (ПЛ) в кабельні (КЛ) і кабельних вставок;
- нейтралей трансформаторів, якщо вони можуть працювати незаземленими;
- схем грозозахисту машин, що обертаються;
- пунктів секціонування;
- пунктів комерційного обліку електроенергії 6-20 кВ.

Обмежувачі перенапруг повинні застосовуватись одночасно у всіх трьох фазах приєднання до шин розподільчих установок (РУ). Застосування ОПН у різних фазах одного приєднання та в одному трифазному комплекті не допускається.

Розрізняють обмежувачі перенапруг для захисту лінійної ізоляції без іскрових проміжків та із зовнішнім іскровим проміжком (ОПН-Л та ОПН-ЛІ відповідно) [2]. Зовнішній вигляд обмежувачів перенапруг без іскрових проміжків та із зовнішнім іскровим проміжком приведено на рисунку 1.1.

При виборі ОПН необхідно вирішувати ряд технічних задач. Перш за все вибраний ОПН повинен обмежувати комутаційні та грозові перенапруги, до значень за яких буде забезпечена надійна робота ізоляції електрообладнання, що захищається, протягом всього терміну експлуатації ОПН.

Вибір ОПН проводять за наступним алгоритмом:

- вибір найбільшої робочої напруги ОПН;

– уточнення вибору найбільшої тривалої робочої напруги ОПН, якщо в мережі можливі тривалі підвищення напруги понад нормоване значення найбільшої робочої напруги;

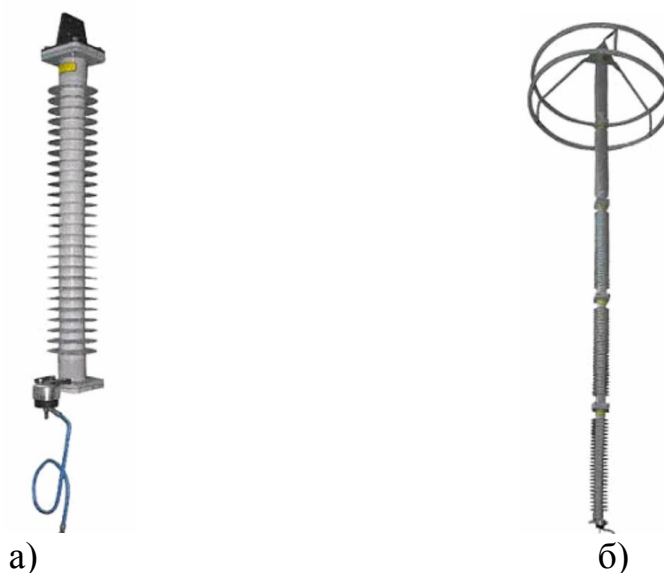


Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд обмежувачів перенапруг: а) ОПН-Л без іскрових проміжків та б) ОПН-ЛІ із зовнішнім іскровим проміжком

- вибір номінального розрядного струму;
- вибір питомої енергоємності та струму пропускну здатності ОПН;
- вибір залишкових напруг ОПН для захисту від комутаційних та грозових перенапруг;
- вибір за умовами вибухобезпечності;
- вибір ОПН залежно від умов експлуатації;
- вибір місця встановлення ОПН.

Рівні найбільшої робочої напруги електрообладнання 6-35кВ залежно від класу напруги, приведено в таблиці 1.1 [3]

Таблиця 1.1 – Рівні найбільшої робочої напруги електрообладнання 6-35кВ

Клас напруги електрообладнання, кВ	Найбільша робоча напруга електрообладнання, кВ	Номінальна напруга електричної мережі, кВ	Найбільша тривало допустима робоча напруга в електричній мережі, кВ
6	7,2	6,0	6,9
		6,6	7,2
10	12,	10,0	11,5
		11,0	12,0
35	40,5	35,0	40,5

Для моделювання розрядників та обмежувачів перенапруг в математичному програмному пакеті *MatLab* використовується блок «*Surge Arrester*», зображення якого в *MatLab* показано на рисунку 1.2 [4].

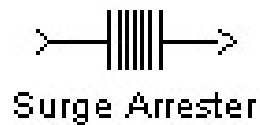


Рисунок 1.2 – Зображення блоку «Surge Arrester» в MatLab

Конструктивно розрядник виконується у вигляді одного або декількох паралельно включених стовпів металооксидних дисків, укладених в діелектричний (фарфоровий) корпус.

Вікно параметрів даного блоку має вигляд зображений на рисунку 1.3, а параметри приведено в таблиці 1.2. В даному вікні вводяться параметри розрядника, який моделюється, з використанням даних з каталогів та коефіцієнтів, визначених з вольт-амперних характеристик.

Таблиця 1.2 – Параметри блоку «*Surge Arrester*»

Англійський варіант	Український варіант
Protection voltage	Значення захисної напруги ОПН, В
Number of columns	Кількість напівпровідникових елементів в пристрої, шт
Reference current per column	значення струму, який протікає через розрядник при захисній напрузі, А
Segment 1 characteristics	К и α параметри сегмента 1.
Segment 2 characteristics	К и α параметри сегмента 2.
Segment 3 characteristics	К и α параметри сегмента 3.

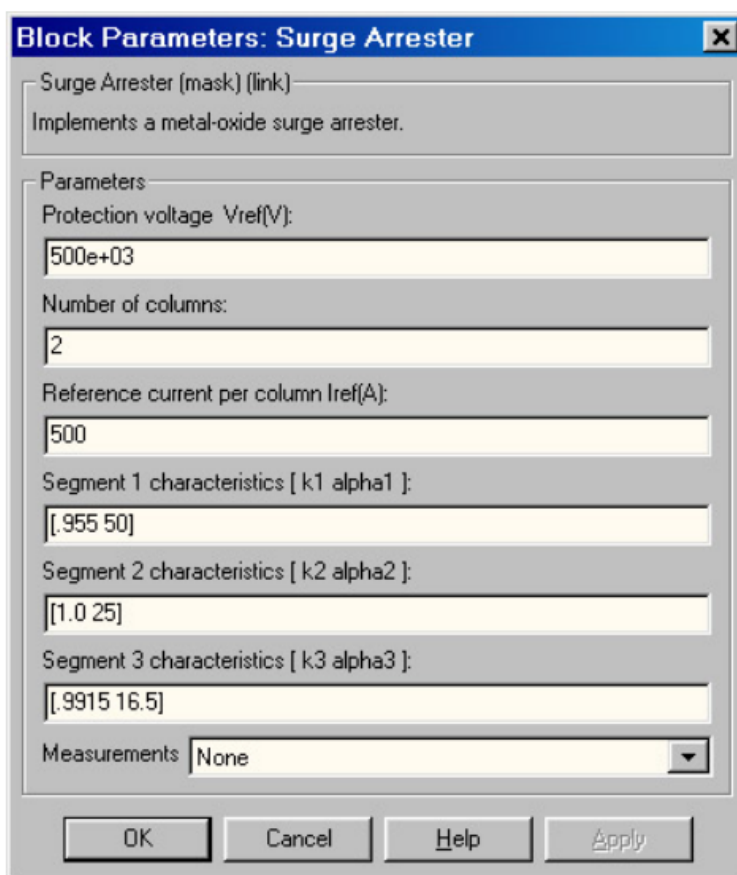


Рисунок 1.3 – Вікно параметрів блоку «Surge Arrester»

Нелінійна вольт-амперна характеристика варистора в блоці «*Surge Arrester*» апроксимується комбінацією трьох експоненційних функцій виду:

$$\frac{U}{U_{ref}} = K_i \frac{I}{I_{ref}}^{\frac{1}{\alpha}}, \quad (1.1)$$

де U та I – напруга та струм розрядника;

U_{ref} та I_{ref} – захисна напруга розрядника та його струм при цій нарузі;

α – коефіцієнт вентильності;

K – коефіцієнт, який характеризує електропровідність та геометричні розміри елемента розрядника чи ОПН.

Стандартні параметри, які приведені за замовчанням у вікні параметрів блоку «*Surge Arrester*» на рисунку 1.3 відповідають усередненим вольт-

амперним характеристикам більшості видів ОПН. Типова вольт-амперна характеристика ОПН, яка використовується в блоці «*Surge Arrester*» приведена на рисунку 1.4 [5].

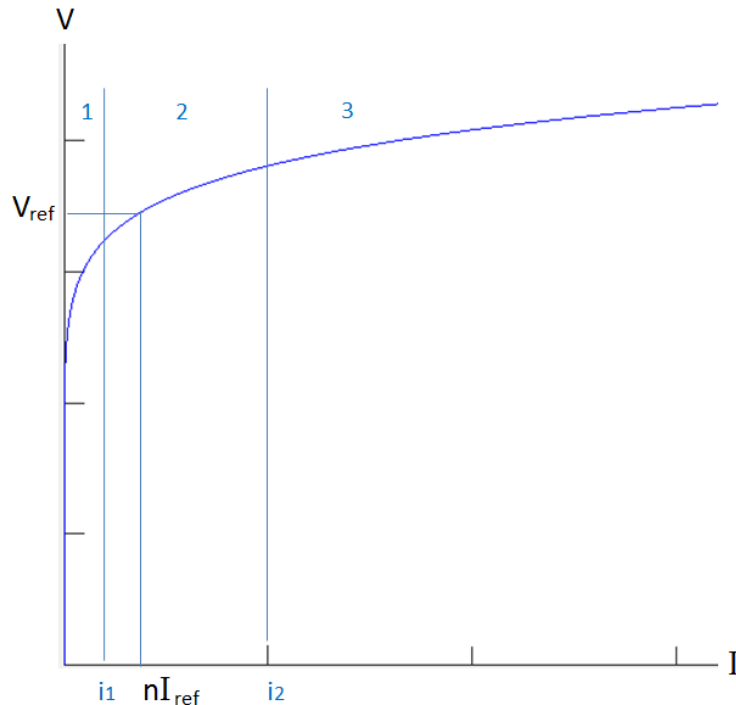


Рисунок 1.4 – Типова вольт-амперна характеристика ОПН, яка використовується в блоці «*Surge Arrester*»

Струми переходу від 1 до 2 та 3-го сегментів вольт-амперної характеристики визначаються за формулами:

$$i_1 = P_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{\alpha_1}{(\alpha_2 - \alpha_1)}} \quad (1.2)$$

$$i_2 = P_2 \left(\frac{P_2}{P_3} \right)^{\frac{\alpha_2}{(\alpha_3 - \alpha_2)}} \quad (1.3)$$

де $P_i = \frac{nI_{ref}}{K_i^{\alpha_i}}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (1.4)$

З формули (1.1) слідує, що якщо $\alpha = 1$, то вентильності не буде і буде виконуватися закон Ома. Якщо $\alpha = 0$, то отримаємо ідеальний вентиль (при будь-якому струмі напруга однакова). Частина вольт-амперної характеристики та спосіб графічного отримання цих коефіцієнтів приведено на рисунку 1.5.

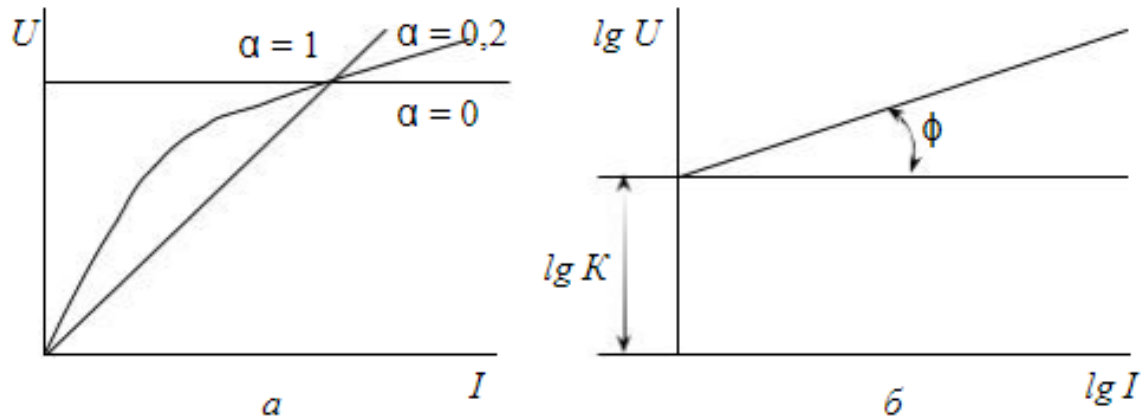


Рисунок 1.5 – Визначення коефіцієнтів α та K з вольт-амперної характеристики розрядника

Для реальних розрядників чи обмежувачів перенапруг вольт-амперна характеристика складається з трьох частин (рисунок 1.6).

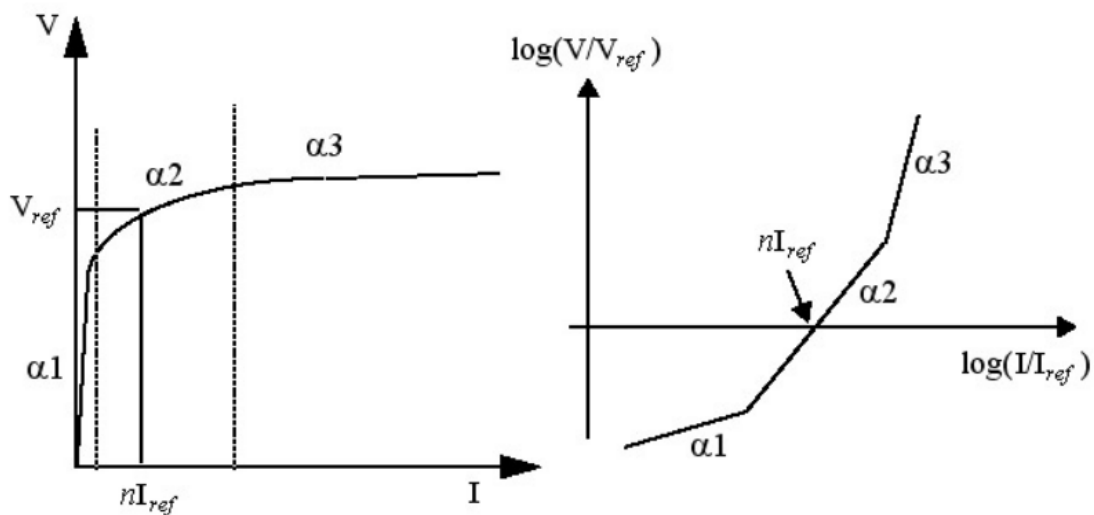


Рисунок 1.6 – Повна вольт-амперна характеристика розрядників в лінійному (зліва) та логарифмічному (справа) масштабах

З вольт-амперної характеристики можна спостерігати те, що при збільшенні напруги на розряднику до номінальної захисної напруги, збільшується поступово струм через нього. При подальшому збільшенні напруги вище за захисну, буде спостерігатися різке зростання струму через розрядник, що призведе до пошкодження ОПН.

Дослідження роботи ОПН будемо проводити в пакеті схемотехнічного моделювання *MatLab*. Для прикладу розглянемо однофазну модель електричної мережі, яка захищається за допомогою ОПН від перенапруг (рисунок 1.7).

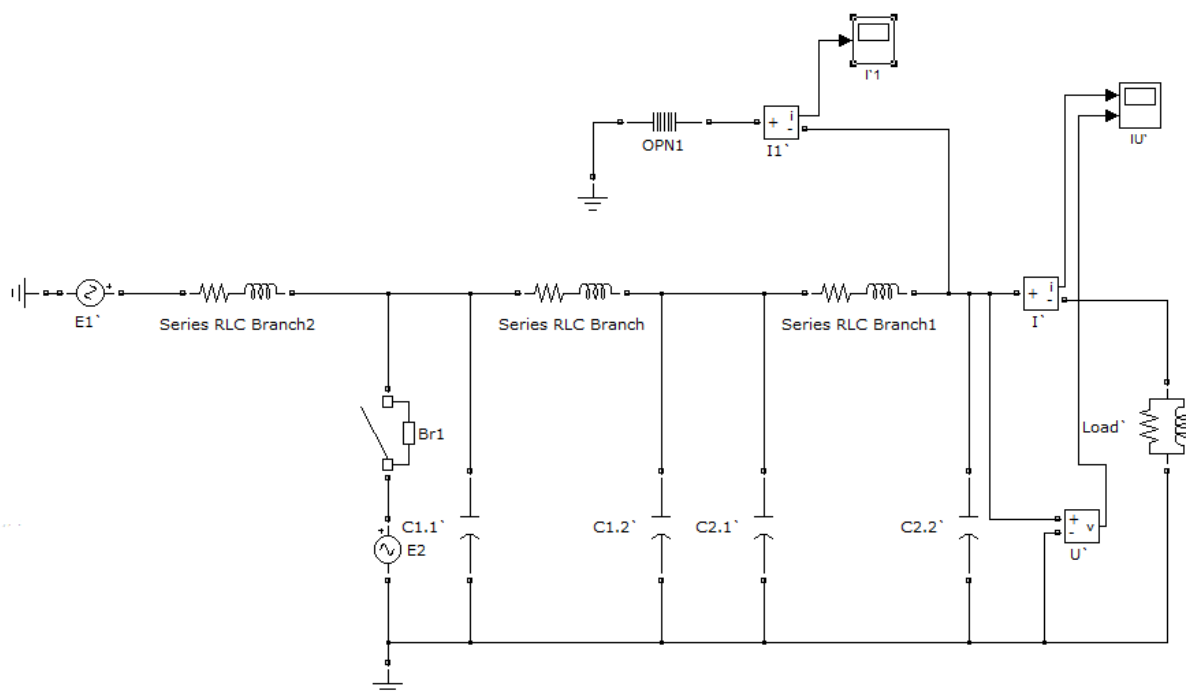


Рисунок 1.7 – Однофазна модель електричної мережі для дослідження параметрів спрацювання ОПН

В якості джерела перенапруги будемо використовувати джерело змінної напруги «*AC Voltage Source*» з декількома значеннями амплітуди напруги. В деякий момент часу «*AC Voltage Source*» буде приєднуватись до електричної мережі, в наслідок чого виникне імпульс перенапруги. Якщо амплітуди джерела напруги буде достатньо для спрацювання ОПН, імпульс перенапруги буде обрізано і в мережі буде присутня лише залишкова напруга ОПН. (див. рисунок 1.8).

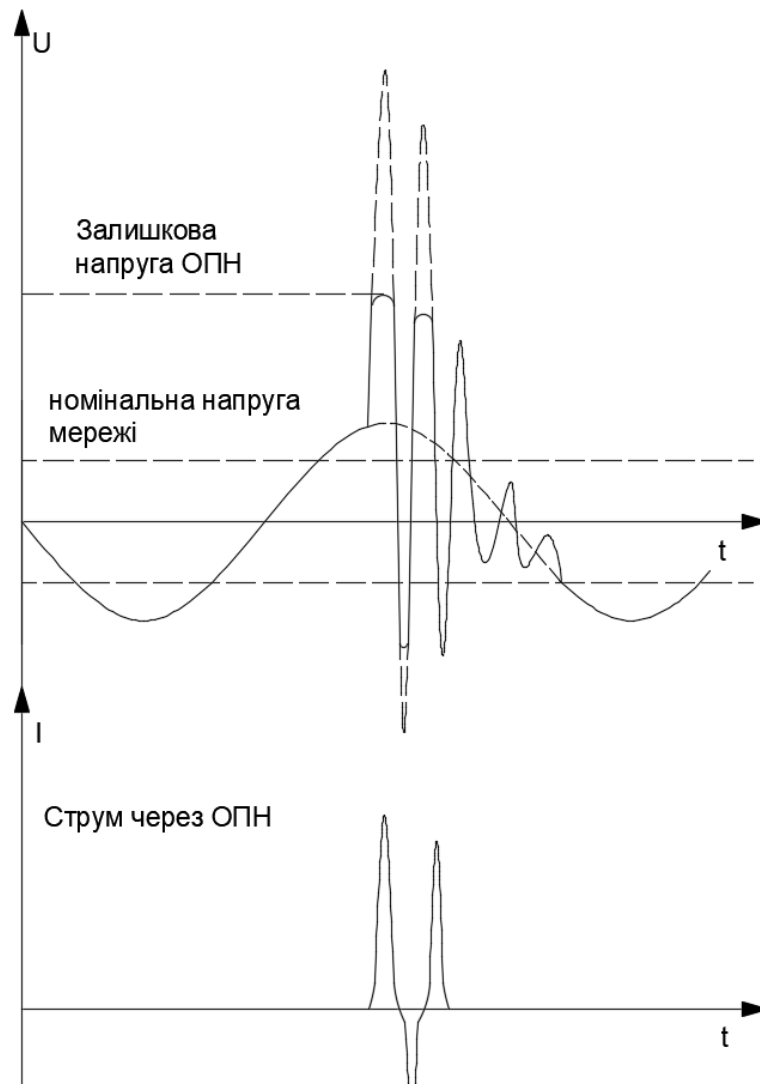


Рисунок 1.8. – Напруга в мережі та струм спрацювання ОПН

1.2 Порядок виконання роботи

1. У відповідності до вказівок викладача, зібрати однофазну або трифазну модель ЛЕП напругою 6...35кВ для дослідження характеристик апаратів захисту від перенапруг.
2. У відповідності до завдання викладача, отримати осцилограми струму та напруги з заданих точках в нормальному режимі роботи мережі.
3. Використовуючи довідникову інформацію (каталоги, журнали, тощо), у відповідності до [1], вибрати нелінійний обмежувач перенапруги (ОПН) для захисту ЛЕП 35кВ від перенапруг.

4. У відповідності до формул (1.1)-(1.4) розрахувати параметри схеми заміщення вибраного ОПН та створити модель для дослідження його характеристик в пакеті схемотехнічного моделювання *Matlab*.

5. Привести осцилограми струму та напруги на ОПН до та після моменту спрацювання.

6. За допомогою створеної моделі побудувати вольт-амперну характеристику спрацювання вибраного ОПН та порівняти її з довідниковими параметрами. Для цього необхідно провести декілька дослідів поступово збільшуючи напругу в електричній мережі до моменту спрацювання ОПН. Отримані результати занести до таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Результати моделювання вольт-амперної характеристики спрацювання вибраного ОПН

$U_{опн}, \text{кВ}$									
$I_{опн}, \text{А}$									

За даними таблиці 1.3 на рисунку 1.9 побудувати вольт-амперну характеристику спрацювання вибраного ОПН

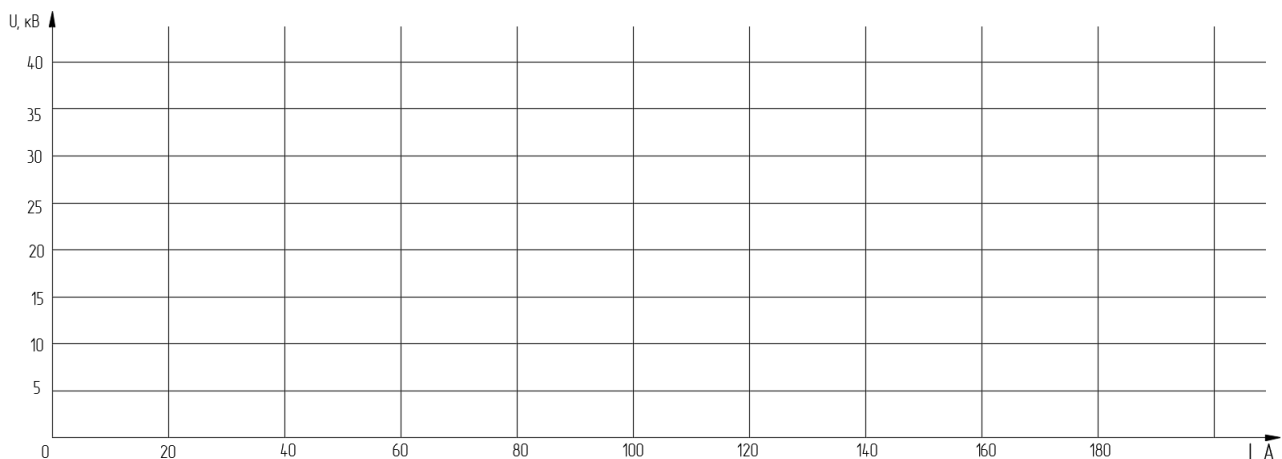


Рисунок 1.9 – Вольт-амперна характеристика спрацювання вибраного ОПН

7. Зробити висновки по роботі.

1.3 Питання для самоконтролю та самоперевірки

1. Для чого використовують обмежувачі перенапруг в електричних мережах?
2. Класифікація засобів захисту елементів електричних мереж від перенапруг.
3. Основні параметри засобів захисту елементів електричних мереж від перенапруг.
4. Які конструктивні особливості нелінійних обмежувачів перенапруг?
5. Захисна характеристики ОПН.
6. Які переваги мають ОПН, порівняно з вентиляними розрядниками?
7. Який блок використовується в *MatLab* для моделювання нелінійних обмежувачів перенапруг?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2

ЗАСТОСУВАННЯ ПАКЕТУ SIMULINK ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ДУГОВИХ ПЕРЕНАПРУГ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Мета роботи: провести аналіз різних режимів роботи нейтралей в електричних мережах. Навчитися моделювати дугові перенапруги в електричних мережах різних класів напруги в пакеті схемотехнічного моделювання *Matlab*.

2.1 Теоретичні відомості

2.1.1 Зв'язок однофазних замикань на землю та перенапруг

Однофазні замикання на землю (ОЗЗ) є переважним видом ушкоджень в електричних мережах 6-35кВ (75-90% від загального числа пошкоджень в мережах з ізольованою нейтраллю) і часто є першопричиною аварій, що супроводжуються значним економічним збитком.

Перевагою такого виду заземлення нейтралі є те, що однофазні замикання на землю не приводять до відключення споживачів.

Для забезпечення максимально можливої надійності роботи мережі необхідно, щоб струм замикання був настільки малий, що протягом досить тривалого часу (необхідного для пошуку і усунення пошкодження) можна було б обійтися без відключення споживачів. Згідно [6] такими допустимими струмами замикання, що не вимагають негайного відключення таких пошкоджених приєднань, вважаються значення струмів замикання на землю 30, 20, 10 А (для мереж 6, 10, 35 кВ відповідно). У мережах генераторної напруги та в мережах, що містять високовольтні електродвигуни, допустимим струмом однофазного замикання вважається струм 5 А. Зауважимо, що в багатьох країнах безпечні значення струмів замикання істотно нижче (близько 3-7 А) [7].

Однофазні замикання в мережі, особливо при малих струмах, рідко переходять в стійкі однофазні пошкодження. Дуговий процес під час замикання, як правило, має нестійкий характер, при якому мають місце багаторазові гасіння і запалювання електричної дуги (дуга набуває переміжного характеру).

Реальна картина горіння заземлюючих дуг визначається великим числом факторів, головними з яких є: розмір і характер (ємнісний, індуктивний, активний) квазіусталеного струму замикання; значення пробивної напруги пошкодженого місця після гасіння дуги. На тривалість горіння і умови гасіння електричної дуги істотно впливають: перехідний опір в місці горіння дуги; вид діелектрика, який безпосередньо контактує з дуговим каналом; інтенсивність охолодження; тиск в зоні горіння дуги; можливість її розтягування та інше.

Цей процес супроводжується виникненням значних перенапруг, які самостійно, чи накладаючись на інші види, наприклад комутаційні, можуть приводити до пошкодження ізоляції.

Головними причинами аварій, що виникають внаслідок ОЗЗ в електричних мережах 6-35кВ, в більшості випадків є переходи ОЗЗ в подвійні і багатомісні замикання через перенапруги на непошкоджених фазах в перехідних режимах замикання на землю. Тому питання про найбільш ефективний режим заземлення нейтралі електричних мереж 6-35кВ в основному, пов'язано з проблемами обмеження перенапруг при дугових переміжних ОЗЗ.

На рисунку 2.1 показаний процес виникнення перенапруг при дуговому замиканні на землю в мережі 6кВ. [8]

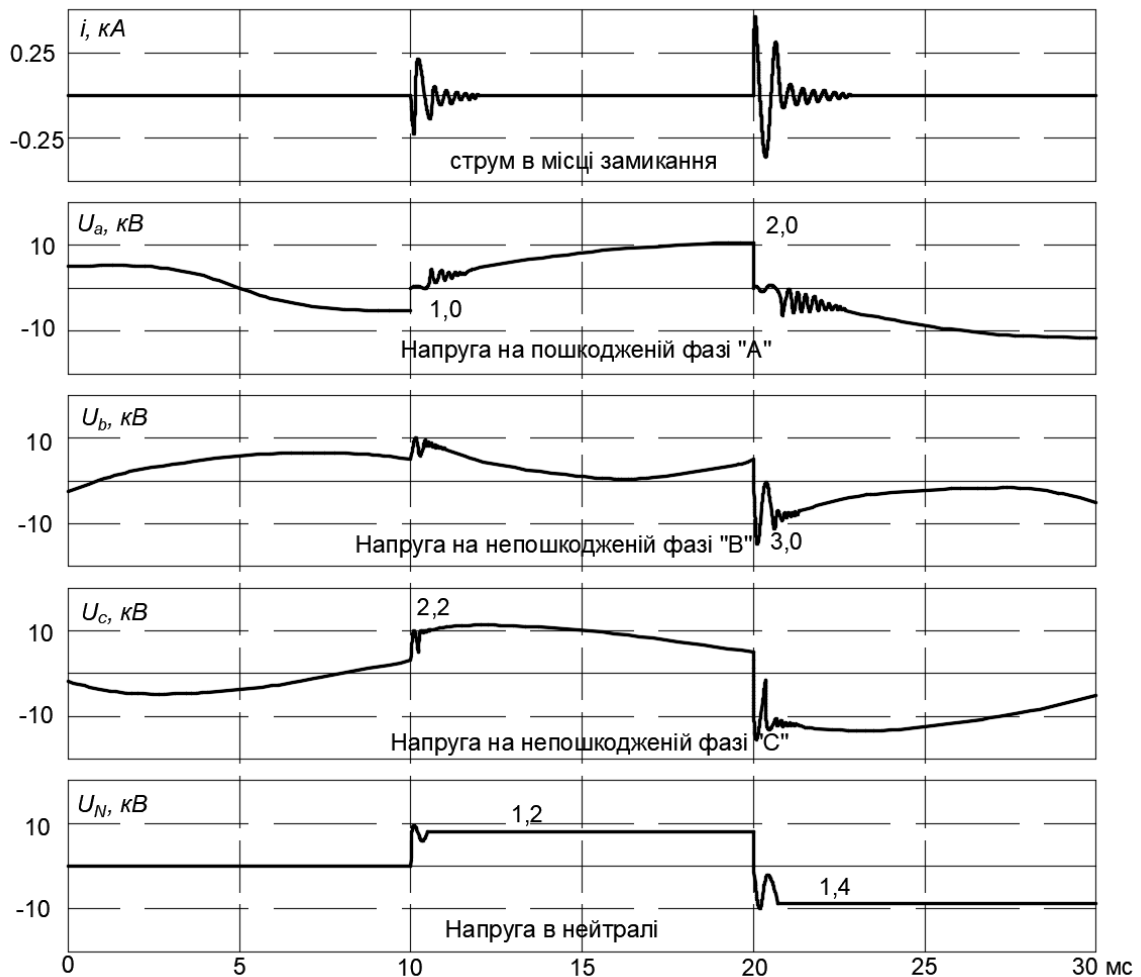


Рисунок 2.1 – Осцилограми струмів і напруг при дуговому замиканні на землю в мережі 6кВ (струм однофазного замикання на землю 5А)

Момент першого замикання на землю відбувається на максимумі фазної напруги. Після моменту запалення дуги напруга в пошкодженій фазі зменшується о нуля (фаза «А» на рисунку 2.1) і до моменту погасання дуги не змінюється. Після погасання дуги напруга в фазі «А» починає відновлюватись, а повторне запалювання відбувається вже при підвищеній напрузі $U_{пр} = 2,0$. Як видно з рисунку 2.1, виникнення перенапруг в непошкоджених фазах (фаза «В» та «С») корелює з моментами запалювання дуги, а максимальне значення кратності перенапруг на непошкоджених фазах складає 2,2 і 3,0 в.о. відповідно. Запалювання та згасання дуги приводить до виникнення напруги зміщення нейтралі, яка змінює свою полярність при замиканні в кожен напівперіод. В

даному випадку **кратність** перенапруги на нейтралі складає 1,4 для повторного запалювання дуги.

Перенапруги в мережах з ізольованою нейтраллю не зростають нескінченно, а часом мають тенденцію до досягнення деякої граничної величини, **яку визначають** активні провідності ізоляції на землю і зниження пробивної напруги в місці пошкодження через руйнування ізоляції дугою. Як правило, кратність дугових перенапруг в мережах з ізольованою нейтраллю не перевищує величини 3,0-3,5 (виняток становлять мережі з ізольованою нейтраллю при наявності струмообмежуючих реакторів). [8]

Небезпека дугових перенапруг визначається не стільки їх величиною, скільки тривалістю їх існування і тим, що вони охоплюють **всю електричну мережу**, створюючи можливість пробоїв ослаблених місць ізоляції непошкоджених фаз в інших точках мережі. Пробій ізоляції на неушкодженій фазі веде до виникнення подвійного замикання через землю. Подвійне замикання означає, що фаза, пошкоджена на одному з приєднань, має зв'язок через опір ґрунту з пошкодженням на іншому приєднанні. Така ситуація часто веде до протікання по петлі замикання значних струмів, величина яких може бути менше уставки дії релейного захисту, але більше номінального струму обладнання. Такі струми, які тривалий час не відключаються захистом, викликають термічне руйнування комірок розподільних пристроїв і вигорання кабелів, на яких існує замикання, викликаючи тим самим міжфазні короткі замикання. Крім того, пошкоджуються кабелі, прокладені поруч в кабельних каналах і тунелях, через загоряння ізоляції. **В результаті** такого розвитку аварії, пошкоджені приєднання відключаються дією захистів від міжфазних коротких замикань, знеструмлюючи всіх споживачів, що живляться від даної підстанції. Навіть в тому випадку, якщо захисти мають достатню чутливість до подвійних замикань, існує небезпека пошкодження струмообмежуючих реакторів, а також небезпека перенапруг, що виникають при відключенні одного з пошкоджених приєднань [9,10]. Таким чином, дугові замикання на землю є серйозним чинником, що знижує надійність роботи систем електропостачання.

2.1.2 Дюгові перенапруги в електричних мережах з нейтраллю, заземленою через високоомний резистор

Величину дугових перенапруг і число повторних замикань на землю можна зменшити за рахунок включення в нейтраль мережі високоомного резистора, який забезпечує стікання заряду нульової послідовності. Резистор створює в місці пошкодження активну провідність, яка приблизно дорівнює ємнісній. На рисунку 2.2. показані **осцилограми струмів і напруг** для мережі, аналогічної рисунку 2.1, але з високоомним резистором $R_N = 700 \text{ Ом}$, включеним в нейтраль. [8]

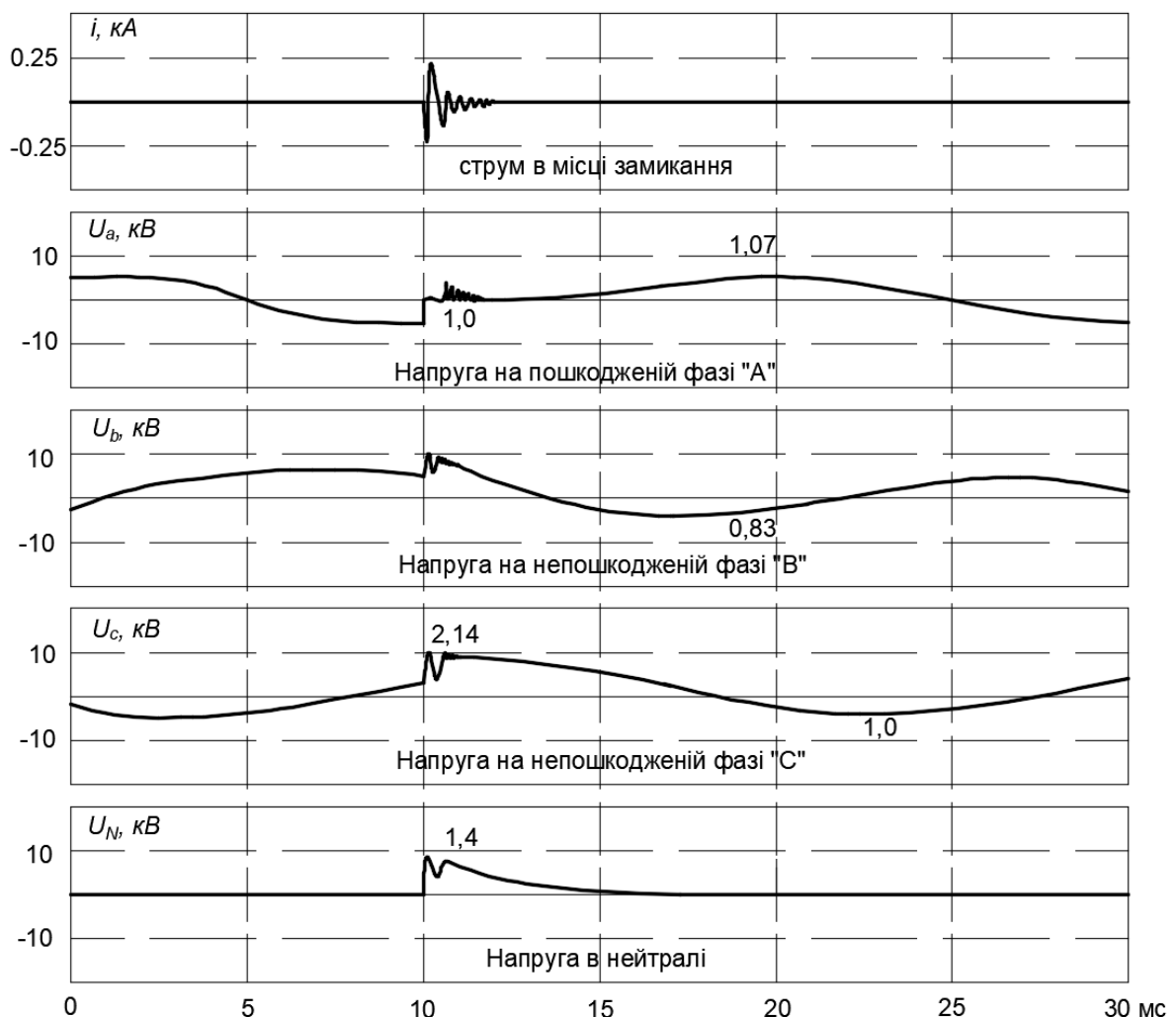


Рисунок 2.2 – **Осцилограми струмів і напруг** при дуговому замиканні на землю в мережі 6кВ з високоомним резистором $R_N = 700 \text{ Ом}$, включеним в нейтраль мережі (струм однофазного замикання на землю 5А)

З рисунку видно, що перше замикання супроводжується перенапругами приблизно такої ж кратності, проте, до моменту повторного запалювання дуги, забезпечується майже повне стікання заряду нульової послідовності, про що свідчить зменшення напруги в нейтралі практично до нуля. Таким чином напруга в фазах мережі під час повторних запалювань дуги не перевищує допустимих значень. Навіть, якщо відбуватимуться повторні запалювання дуги, то перенапруги не перевищать значення при першому запалюванні, тобто 2,2...2,5.

2.1.3 Дугові перенапруги в мережах з компенсацією ємнісного струму

В електричних мережах 6, 10, 35кВ зі струмами замикання на землю більше 30, 20 и 10А відповідно, згідно з [6] застосовується їх компенсація шляхом встановлення в нейтраль мережі дугогасної котушки (ДГК).

При резонансній настройці ДГК, коли **еквівалентний** ємнісний опір **електричної мережі** на землю дорівнює індуктивному опору котушки, можна отримати ряд позитивних умов для протікання процесів при однофазних замиканнях на землю, таких як мінімальний струм замикання, мінімальна швидкість відновлення напруги на пошкодженій фазі після погасання дуги, мінімальний рівень дугових перенапруг.

Осцилограми струмів і напруг при однофазному замиканні на землю в мережі 10кВ з нейтраллю, заземленою через ДГК, приведені на рисунку 2.3.

На відміну від системи з ізольованою нейтраллю однократне запалювання дуги викликає коливальний затухаючий **перехідний** процес зміни напруги в нейтралі. Кратність перенапруг при першому запаленні дуги складає 2,0-2,3 в непошкоджених фазах, та в подальшому зменшується до нормальних значень. В пошкодженій фазі «А», після **згасання** дуги, напруга відновлюється майже до нормального значення. Частота коливального процесу тим ближча до промислової, чим ближче коефіцієнт компенсації до 1.

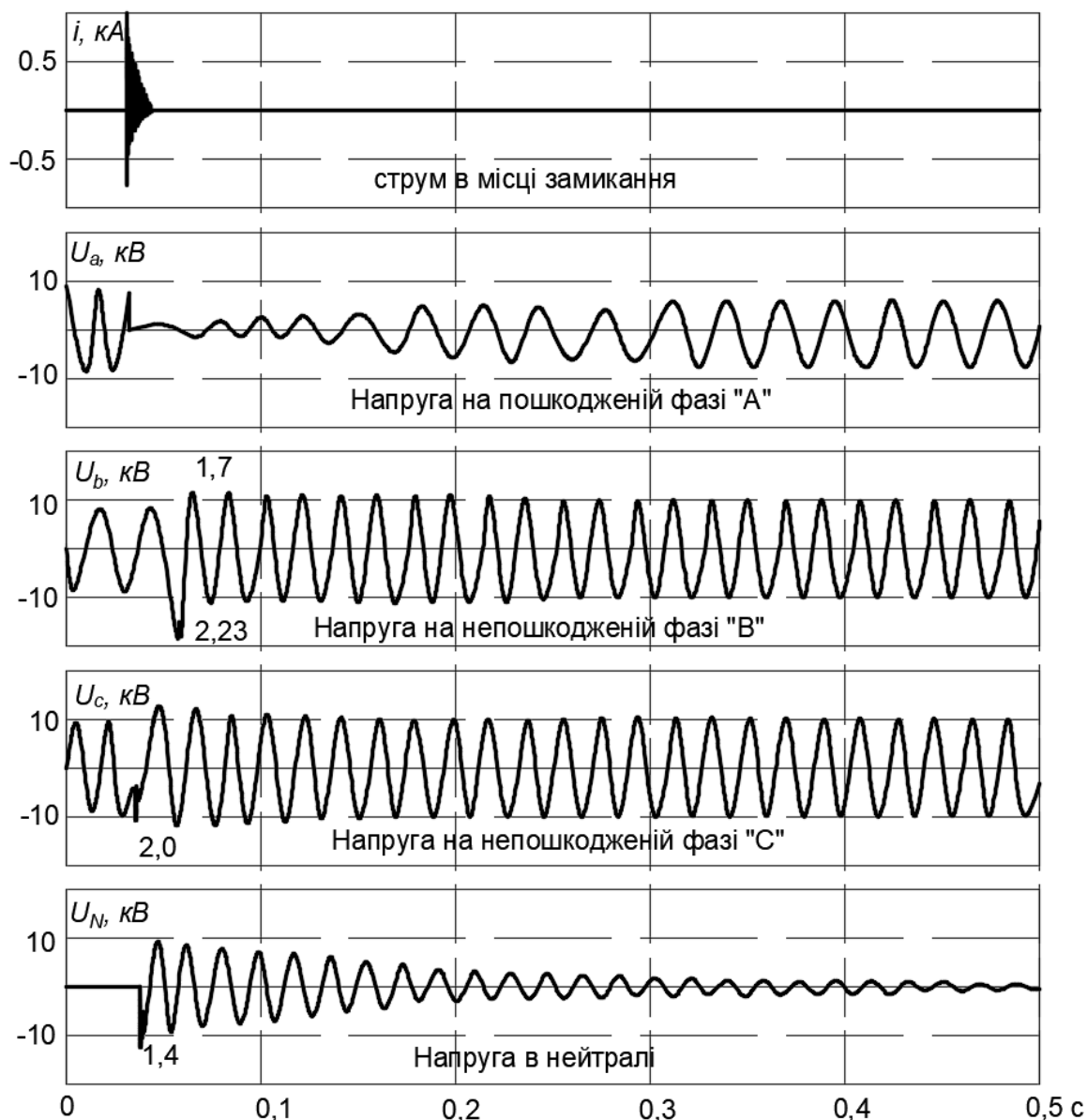


Рисунок 2.3 – Осцилограми струмів і напруг при однофазному замиканні на землю в мережі 10кВ з нейтраллю, заземленою через ДГК. Ємнісний струм замикання на землю 70А. Коефіцієнт компенсації ємнісного струму $K=1$

Вільна складова напруги в нейтралі створюється коливаннями в контурі: індуктивність реактора L_p та потроєна ємність мережі на землю $3C_0$, та визначається рівнянням:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p \cdot 3C_0}} \quad (2.1)$$

Коефіцієнт компенсації ємнісного стуму:

$$K = \frac{1}{3\omega^2 L_p C}, \quad (2.2)$$

де $\omega = 2\pi f_{ном}$ и $f_{ном}$ – номінальна частота напруги в мережі

Виражаючи величину $3L_p C$ з (2.2) та підставляючи в (2.1) отримаємо рівняння **залежності** частоти вільної складової або частоти напруги в нейтралі **від коефіцієнту компенсації ємнісного стуму:**

$$f = \frac{f_{50}}{\sqrt{K}} = 50\sqrt{K} \quad (2.3)$$

Залежність частоти вільної складової від **коефіцієнту** компенсації, отримана по формулі (2.3), приведена на рисунку 2.4.

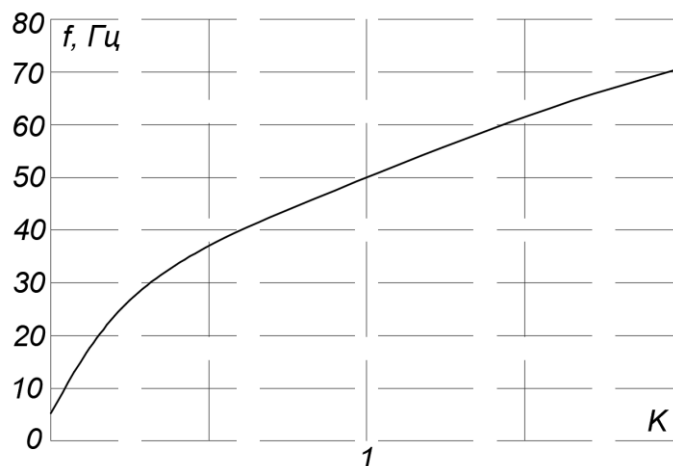


Рисунок 2.4 – Залежність частоти вільної складової напруги в нейтралі від **коефіцієнту** компенсації після згасання заземлюючої дуги

З **рисунку 2.4** видно, що відхилення **K** від **1** призводить до **недокомпенсації**, коли частота вільної складової буде меншою за 50Гц, та **перекомпенсації** – коли частота буде більшою.

На рисунку 2.5 показано **осцилограми струмів та напруги** в мережі 10кВ з нейтраллю, заземленою через ДГК, при однократному замиканні на землю та подальшому погасанні дуги в умовах недокомпенсації та перекомпенсації.

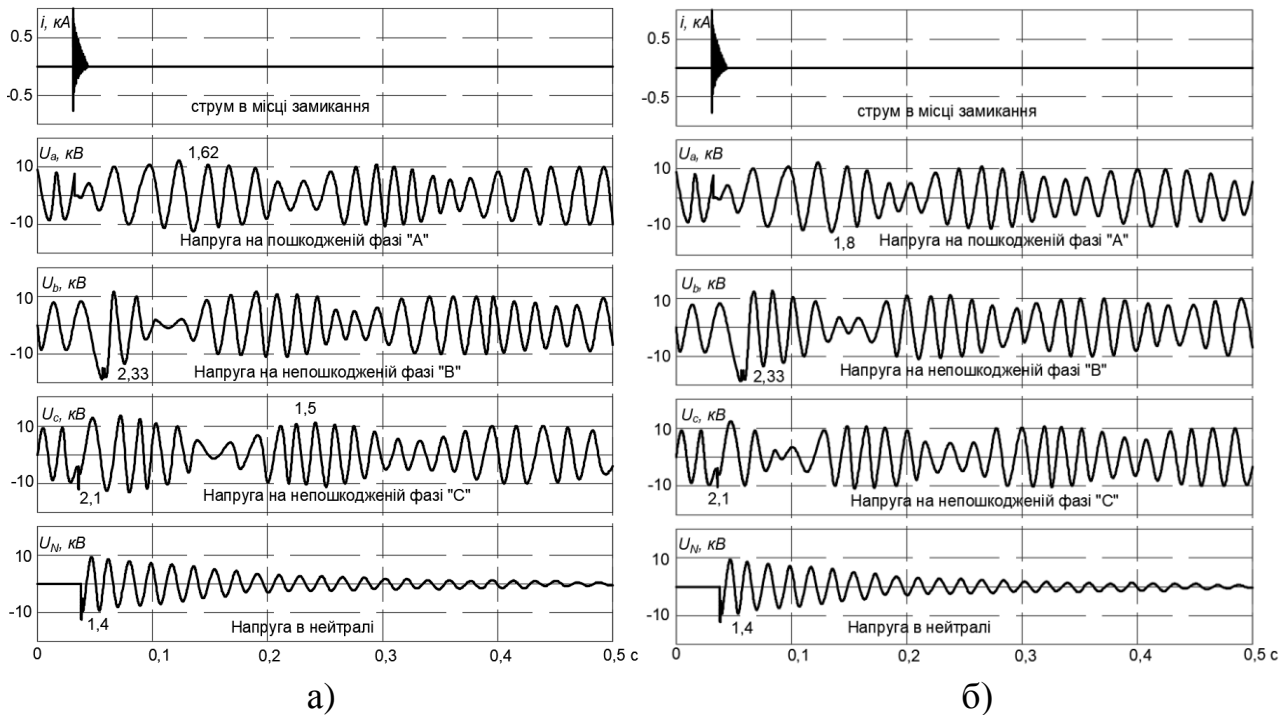


Рисунок 2.5 – **Осцилограми струмів і напруг** в мережі 10кВ з нейтраллю, заземленою через ДГК при однократному замиканні на землю та подальшому погасанні дуги в умовах: а) перекомпенсації $K=1,2$ та б) недокомпенсації $K=0,8$.

На відміну від повної компенсації ємнісного струму замикання на землю, ліквідація дугових перенапруг супроводжується процесом биття: накладанням на усталену напругу промислової частоти вільної складової близької за частотою. При биттях кратність перенапруг може досягати значень 1,6-1,8, що сприяє виникненню пробоїв ослаблених місць ізоляції в мережі і, як наслідок, виникненню перенапруг більшої кратності.

Слід зауважити, що в реальних умовах резонансної настройки нейтралі досягти практично неможливо, тому [11] рекомендує налаштовувати ДГК з незначною перекомпенсацією, оскільки в такому випадку кратності перенапруг є меншими ніж при недокомпенсації.

Зниження кратності перенапруг при розстройці ДГК може бути досягнуто шляхом включення в нейтраль мережі високоомного резистора, паралельно до котушки. В такому випадку кратність перенапруг буде близькою до ідеального налаштування ДГК. Також високоомний резистор дозволяє зменшити тривалість дії перенапруг навіть при резонансній настройці ДГК, що є перевагою в його використанні разом з ДГК.

Для дослідження розглянутих вище процесів виникнення перенапруг при однофазних замиканнях на землю будемо використовувати модель мережі напругою 6-35кВ, зображену на рисунку 2.6.

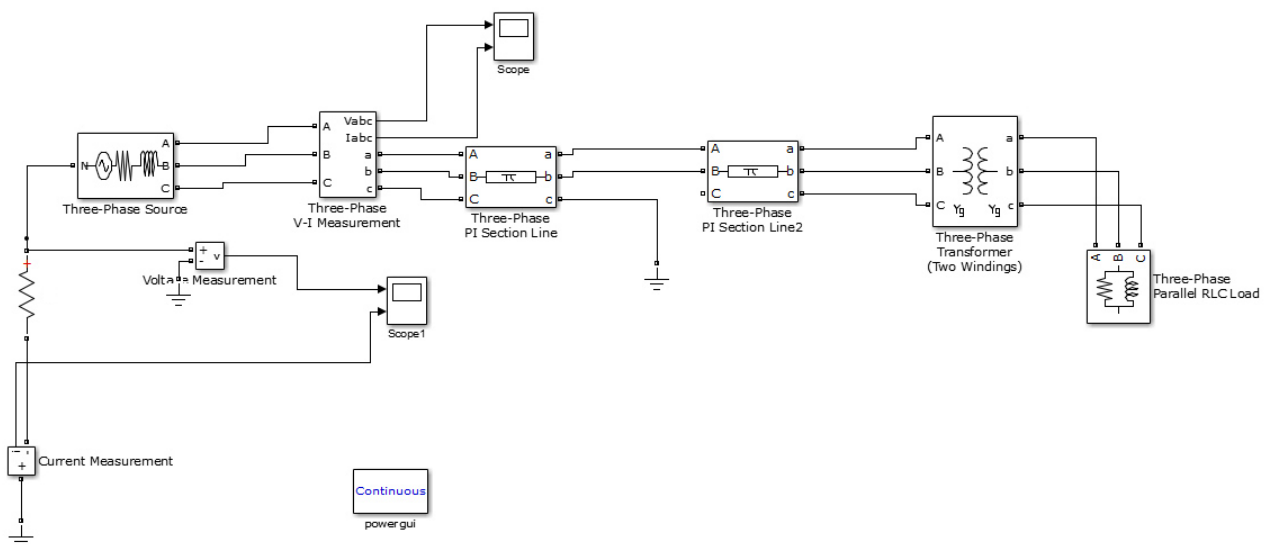


Рисунок 2.6 – Модель електричної мережі 6-35кВ, створена в *Matlab* для дослідження перенапруг при однофазному замиканні на землю

2.2 Порядок виконання роботи

1. Отримати у викладача завдання для розрахунку параметрів схем заміщення.

2. В програмному пакеті *Matlab* створити модель лінії електропередавання з ізолюваною нейтраллю (6-35 кВ), **приведену на рисунку 2.6.**

3. За допомогою створеної моделі отримати осцилограми струму та напруги в нормальному режимі роботи моделі ЛЕП.

4. Для моделі визначити струми та напруги у всіх фазах, струм та напругу в нейтралі у випадку замикання на землю однієї з фаз. Привести осцилограми напруг у пошкодженій та непошкоджених фазах. Результати звести до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати моделювання у випадку замикання на землю однієї з фаз

U_a , кВ	U_b , кВ	U_c , кВ	U_n , кВ	I_a , А	I_b , А	I_c , А

5. У створених моделях (п.1) дослідити вплив заземлення нейтралі через дугогасні котушки та високоомні резистори різного номіналу на величину перенапруг в мережі. Отримані результати звести до таблиць 2.1 та 2.2.

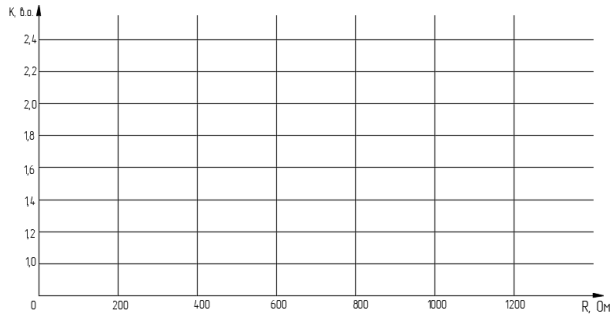
Таблиця 2.2 – Результати моделювання залежності кратності перенапруг від значення активного опору, включеного в нейтраль джерела живлення

Опір резистора, Ом								
Кратність перенапруг, в.о.								

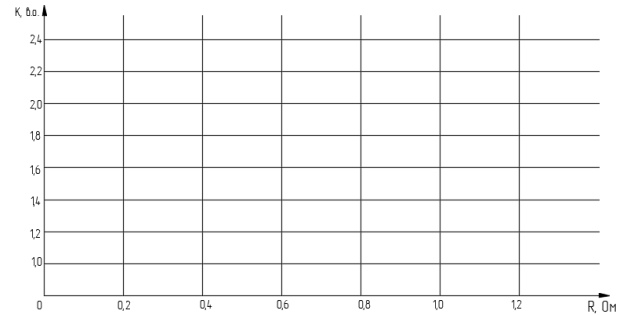
Таблиця 2.3 – Результати моделювання залежності кратності перенапруг від значення індуктивності, включеної в нейтраль джерела живлення

Індуктивність, Гн								
Кратність перенапруг, в.о.								

6. За даними, отриманими в п.4, на рисунку 2.7 побудувати залежності кратності перенапруг від величини індуктивності дугогасної котушки та опору високоомного резистора.



а)



б)

Рисунок 2.7 – Залежність кратності перенапруг при дугових замиканнях на землю від значення: а) активного опору, включеного в нейтраль; б) індуктивності, включеної в нейтраль

6. Зробити висновки.

2.3 Питання для самоконтролю та самоперевірки

1. В чому полягає небезпека при виникненні однофазних замикань на землю в електричних мережах 6-35кВ?
2. Які причини виникнення перенапруг при однофазних замиканнях на землю в електричних мережах 6-35кВ?
3. Які засоби зниження кратності перенапруг можуть бути використані в мережах з ізолюваною нейтраллю?
4. В чому полягають особливості використання ДГК для зменшення перенапруг в електричних мережах 6-35кВ?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З УРАХУВАННЯМ ФЕРОРЕЗОНАНСНИХ ПЕРЕНАПРУГ В МАТЕМАТИЧНОМУ ПАКЕТІ MATLAB

Мета роботи: провести аналіз впливу параметрів електричної мережі 110кВ на параметри ферорезонансних перенапруг.

3.1 Теоретичні відомості

Ферорезонанс – це явище резонансу в нелінійних електричних колах, що може виникати в будь-яких схемах електричної мережі з нелінійною індуктивністю та ємністю та супроводжуватися тривалими перенапругами та надструмами.

Наявність нелінійної індуктивності в поєднанні з ємністю призводить до небезпеки виникнення ферорезонансних явищ [12] в електричних мережах.

Насичення осердя трансформатора напруги (ТН) призводить до того, що його індуктивність нелінійно змінюється. Ферорезонансні явища характеризуються стрибкоподібним переходом з режиму сильного насичення осердя феромагнітної котушки індуктивності в слабо насичений режим або навпаки. При цьому виникають стрибки напруги і струму в обмотці ТН. Якщо ТН не розрахований на роботу в режимі сильного насичення, то перенапруги і протікаючі через обмотку струми, значення яких перевищують гранично допустимий струм, можуть привести до теплового руйнування ізоляції обмотки і міжвиткових замикань.

Однією з основних причин виникнення ферорезонансу є неповнофазне включення силових трансформаторів: перегорання плавких вставок високовольтних запобіжників в одній або двох фазах, неповнофазні комутації роз'єднувачами або вимикачами, обриви проводів повітряних ліній. Як тільки ферорезонанс з'явився, система буде працювати при ферорезонансі до тих пір,

поки джерело буде здатне забезпечувати необхідну енергію для підтримки цього явища.

Можна виділити наступні відмінні особливості ферорезонансних процесів:

1) можливість виникнення ферорезонансу обумовлюється параметрами лінійних та **нелінійних** елементів, що входять в контур (індуктивності, активні опори, ємності), початковими умовами, а також значенням напруги мережі;

2) ферорезонанс супроводжується значними спотвореннями форми **кривої** напруги на елементах кола і струмів в них;

3) на характер процесів в складних колах можуть впливати електромагнітні зв'язки між елементами, створювані, наприклад, наявністю спільної для всіх трьох фаз магнітної системи трансформаторів.

Режим ферорезонансу виникає при рівності **ємнісного опору мережі** та нелінійного індуктивного опору ТН у відповідності з виразом:

$$n \cdot \omega \cdot L_{ТН} = \frac{1}{n \cdot \omega \cdot C_{мережі}} \quad (3.1)$$

де ω – частота напруги мережі,

n – номер гармоніки, на якій виникає ферорезонанс,

$C_{мережі}$ – еквівалентна ємність мережі,

$L_{ТН}$ – індуктивний опір ТН.

Ферорезонанс можливий як на основній і вищих (3, 5) гармоніках, так і на субгармоніках (1/3, 1/5). Індуктивний опір намагнічування ТН нелінійно і різко знижується при насиченні (на декілька порядків). Насичення магнітопровода ТН, як правило, відбувається при підвищенні напруги.

Оскільки ТН це малопотужні трансформатори, то і дотримання резонансних умов, як правило, задовольняються при невеликих ємностях

мережі. Ця умова частіше виконується в повітряних мережах, так як ємності на землю ПЛ істотно менше, ніж ємності кабельних ліній того ж класу напруги.

Ферорезонанс у послідовному контурі, що містить джерело ЕРС, ємність і нелінійну індуктивність, вкрай чутливий до активних втрат в контурі. Струм ферорезонансного контуру, проходячи по джерелу еквівалентної ЕРС, отримує з нього енергію і доставляє її в контур. **Значення** цієї енергії дорівнює добутку ефективних значень першої гармоніки струму і ЕРС, помноженому на косинус кута між ними.

При сталому ферорезонансі існує баланс активних та реактивних потужностей, тобто потужність втрат в контурі дорівнює активній потужності джерела, а результуюча реактивна потужність контура дорівнює реактивної потужності джерела. Баланс реактивних потужностей контуру визначається в основному підвищеними напругами на ємності та індуктивності, вектори першої гармоніки яких спрямовані протилежно і взаємно компенсуються. Небаланс, що залишається після компенсації, покривається за рахунок реактивної потужності джерела.

У електричних мережах з трансформаторами напруги можливість виникнення та існування ферорезонансного процесу визначається наступними трьома умовами:

1) Величина еквівалентної ємності мережі повинна знаходитися в межах, обумовлених межами зміни індуктивності трансформатора напруги;

$$\frac{1}{\omega^2 \cdot L_{xx}} \leq C_{\text{екв}} \leq \frac{1}{\omega^2 \cdot L_{\text{нас}}} \quad , \quad (1.11)$$

де L_{xx} – індуктивність холостого ходу, Гн;

$L_{\text{нас}}$ – індуктивність насичення, Гн;

ω – кутова частота напруги мережі, 1/с.

Збудження ферорезонансного процесу пов'язано з нелінійною зміною індуктивності ТН. Причому, плавна зміна індуктивності відбувається до тих пір, поки не виникнуть умови резонансу. Цим зумовлено виникнення ферорезонансу з одним і тим же ТН в схемах з різною еквівалентної ємністю.

2) Для збудження ферорезонансу в контурі з параметрами, що відповідають першій умові, необхідна подія, що приводить до зміни індуктивності ТН. Це можуть бути комутації ненавантажених ошиновок багаторозривними вимикачами або неповнофазний режим роботи лінії електропередачі.

3) Кількість енергії, що надходить в ферорезонансний контур при кожній зміні параметра (індуктивності ТН), повинна бути більше значення втрат в ньому.

Спрощено, ферорезонансний контур з ТН наведено на рисунку 3.1. Втрати в контурі зосереджені виключно в трансформаторі напруги, в його міді і сталі (модельовані відповідно опорами r_1 і r_2). Ферорезонанс загасає за умови, якщо в контурі є такі втрати, що максимально можлива активна потужність джерела при заданій ЕРС невзможі їх компенсувати.

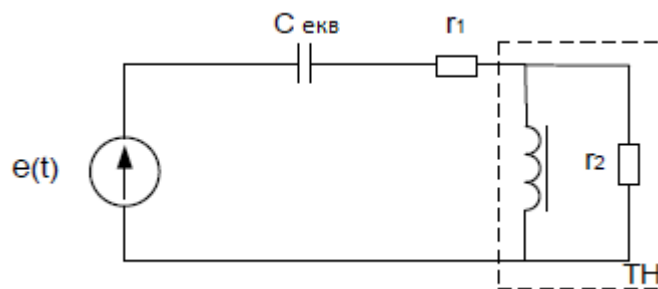


Рисунок 3.1 – Схема заміщення резонансного контура, що включає в себе модель трансформатора напруги

В схемі на рисунку 3.1 позначено:

r_1 – опір, що моделює втрати в міді трансформатора;

r_2 – опір, що моделює втрати у сталі магнітопровода;

$e(t)$ – джерело ЕРС;

$C_{екв}$ – еквівалентна ємність мережі.

Для дослідження ферорезонансних процесів в пакеті схемотехнічного моделювання *Matlab* зберемо схему заміщення мережі напругою 110кВ, представлену на рисунку 3.2. На схемі показані ємності проводів щодо землі C_3 , місце розриву і відповідні міжфазні ємності $C_{мф}$. Модель, створена в *Matlab* приведена на рисунку 3.3.

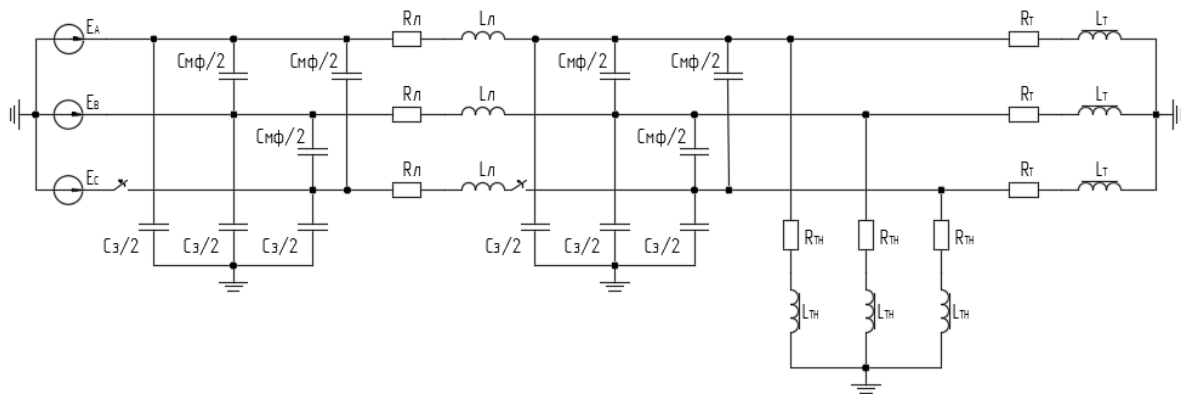


Рисунок 3.2 – Схема заміщення електричної мережі 110 кВ для дослідження ферорезонансних процесів

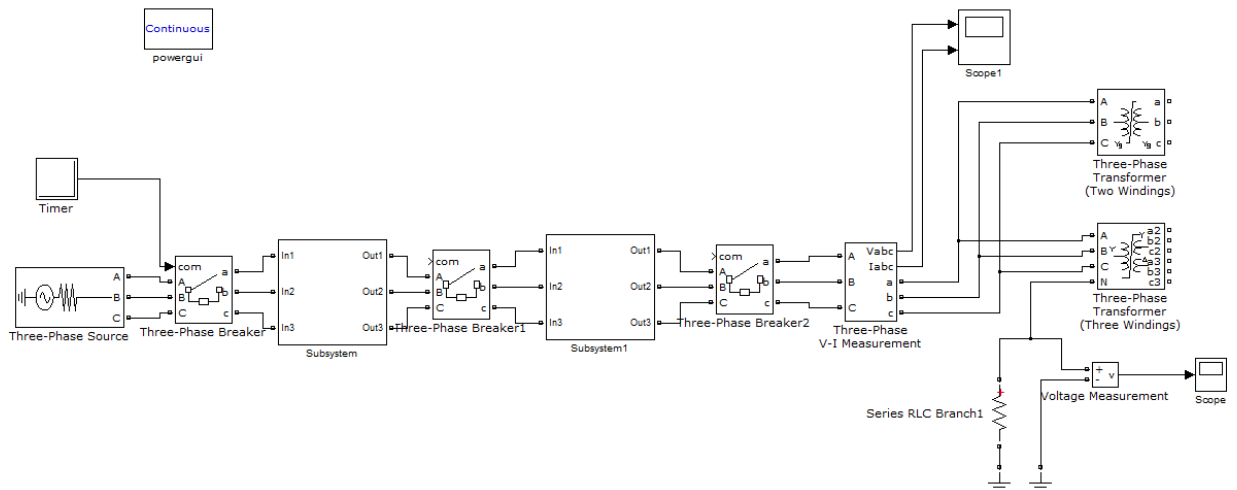


Рисунок 3.3 – Модель, зібрана в *Matlab* для дослідження ферорезонансних процесів

В даній моделі ЛЕП 110кВ розбита на дві частини, а для заміщення самої лінії використовується П-подібна схема заміщення, представлену на рисунку 3.4.

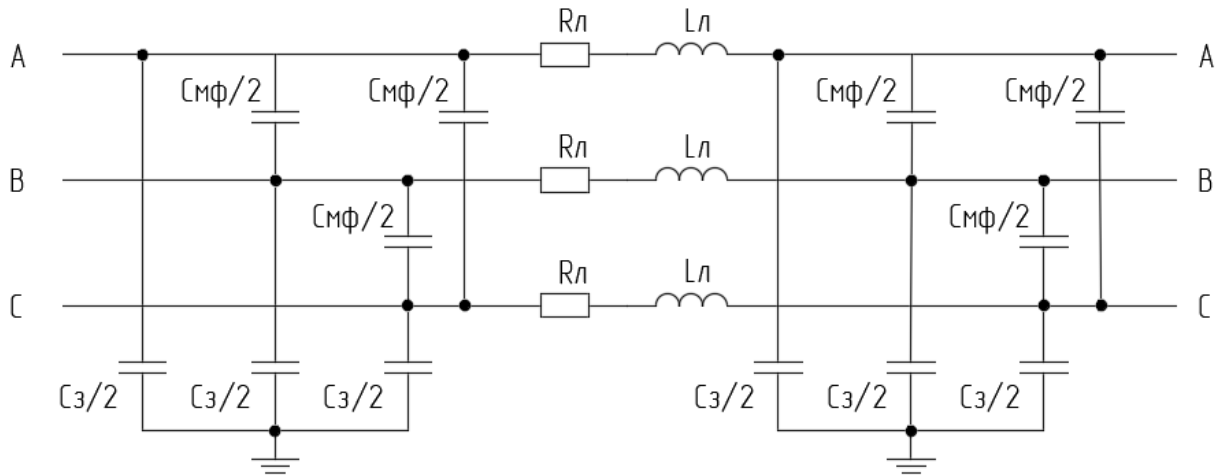


Рисунок 3.4 – Трифазна П-подібна схема заміщення лінії електропередавання напругою 110кВ

На рисунку 3.4 $C_{M\phi}$, C_3 – ємність фази лінії щодо землі та міжфазні ємності; L_{ϕ} , R_{ϕ} – індуктивність та активний опір фази лінії.

За допомогою моделі було отримано осцилограми напруг у фазах силового трансформатора при обриві фази, показані на рисунку 3.5.

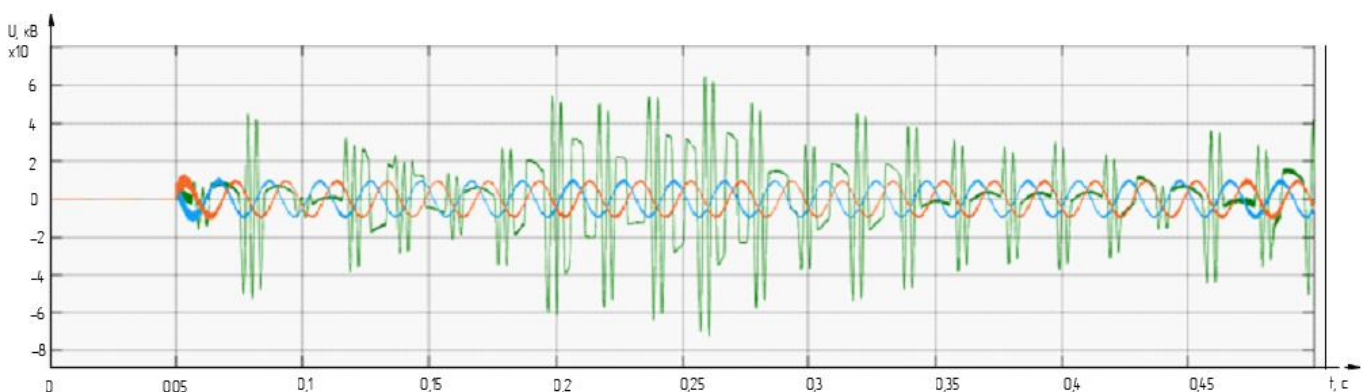


Рисунок 3.5 – Осцилограми напруг у фазах силового трансформатора при неповнофазному включенні (момент комутації 0,05 с; довжина приєднаної ЛЕП – 10 км)

З рисунку 3.5 бачимо, що при обриві фази виникають значні ферорезонансні перенапруги на пошкодженій фазі, що досягають $\sim 7U_{\phi}$ на основній частоті. На нейтралі при цьому виникає змінна напруга, що і свідчить про явище зсуву нейтралі силового трансформатора.

При складанні розрахункової схеми заміщення ділянки мережі 110 кВ із повітряною лінією електропередачі та ненавантаженим силовим трансформатором приймаються такі припущення:

1) живлення ділянки електричної схеми моделюється трифазним джерелом змінної напруги нескінченної потужності;

2) розподілені активні опори, індуктивності, ємності повітряних ліній електропередачі вважаються лінійними елементами і розглядаються як зосереджені параметри;

3) використовується П-подібна схема заміщення повітряної лінії електропередачі;

4) не враховуються втрати на гістерезис і вихрові струми в магнітопроводах силових трансформаторів;

5) індуктивності розсіювання силових трансформаторів вважаються лінійними.

Розподілені параметри електрообладнання станцій і підстанцій (активні опори, індуктивності, ємності) приймаються зосередженими виходячи з того, що їх протяжність в порівнянні з довжиною хвилі промислової напруги на кілька порядків менше. Для ліній електропередачі дане припущення також справедливе, так як в ферорезонансних схемах, які розглядаються, довжина лінії не перевищує 30 км.

3.2 Порядок виконання роботи

1. Отримати у викладача завдання для розрахунку параметрів схем заміщення.

2. В програмному пакеті *Matlab* створити модель лінії електропередавання напругою 110кВ, приведену на рисунку 3.3.

3. За допомогою створеної моделі отримати:

– осцилограми струму та напруги в нормальному режимі роботи моделі ЛЕП;

– осцилограми напруги у фазах та нейтралі силового трансформатора мережі при неповнофазному включенні;

– осцилограми напруги в обмотках ВН вимірювального трансформатора напруги 110кВ при неповнофазному включенні.

5 Дослідити вплив довжини лінії та фази робочої напруги в момент комутації на величину перенапруг в обмотках ВН вимірювального трансформатора напруги 110кВ. Отримані результати занести до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати моделювання залежності кратності ферорезонансних перенапруг від фази в момент включення та довжини лінії

Фаза напруги в момент комутації, °	Довжина лінії, км									
	1	2	5	10	20	30	50	70	100	150
0°										
15°										
30°										
45°										
60°										
75°										
90°										

6. На рисунку 3.6 побудувати залежність кратності перенапруг від довжини лінії та фази робочої напруги в момент комутації.

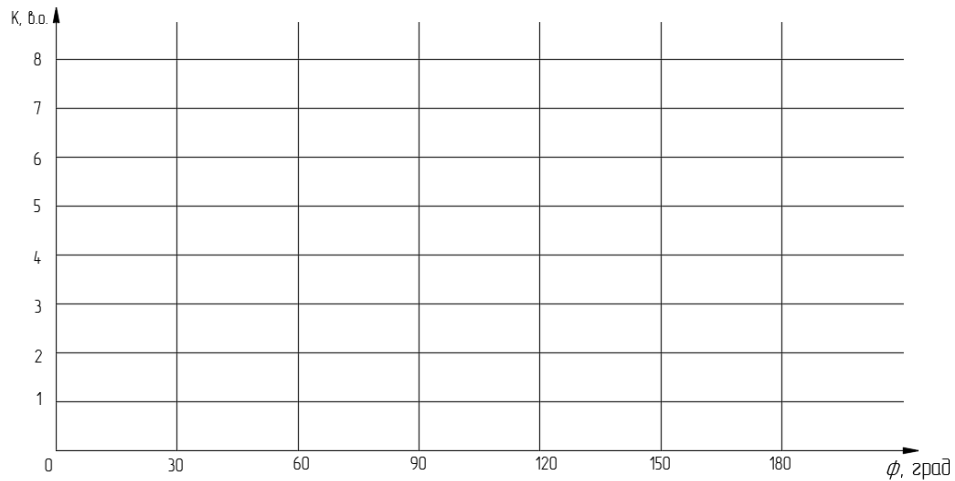


Рисунок 3.6 – Залежність кратності перенапруг від фази в момент включення

7. Зробити висновки.

3.3 Питання для самоконтролю та самоперевірки

1. В чому полягає небезпека при виникненні ферорезонансних явищ?
2. Які умови виникнення ферорезонансу в електричних мережах?
3. Які особливості протікання ферорезонансу в електричних мережах?
4. Які причини виникнення ферорезонансних перенапруг?
5. Які елементи електричних мереж є найбільш чутливими до ферорезонансних перенапруг?

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. СОУ-Н МЕВ 40.1-21677681-67:2012 Обмежувачі перенапруг нелінійні напругою 6-35кВ. Настанова щодо вибору та застосування у розподільчих установках.
2. СУ-ННН 40.1-00100227-100:2014 Інструкція із застосування, монтажу та експлуатації засобів захисту від перенапруг в електроустановках напругою 6-750 кВ.
3. ГОСТ 1516.3-96 Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции.
4. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Прес; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
5. Surge Arrester. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://docs.exponenta.ru/physmod/sps/powersys/ref/surgearrester.html>
6. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х.: Форт, 2017. – 760с.
7. IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. (IEEStd 142-1991), Published by the IEEE inc., NJ, 1992
8. Евдокунин Г. А., Титенков С. С. Внутренние перенапряжения в сетях 6-35кВ. - СПб: Издательство Терция, 2004.- 188стр., силл.
9. Конов Ю.С., Малышев А.В. Повышение надежности работы электроустановок со сдвоенными токоограничивающими реакторами//Электрические станции. -1984. - № 1. - с.56-58
10. Конов Ю.С., Малышев А.В., Богаченко А.В. Анализ работы токоограничивающих реакторов 6-10 кВ при двойных замыканиях на землю//Электрические станции. -1987. - № 6. - с.48-50
11. ГКД 34.20.507-2003 Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила (у редакції 2019 року).
12. Ph. Ferracci, "Ferroresonance," Cahiers Techniques Schneider, Collection Technique Groupe Schneider, No. 190, 1998.