

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ТА СИСТЕМ**

«На правах рукопису»
УДК 621.311

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
_____ В.В. Кирик

«__» _____ 201__р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності **141** Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Спеціалізація – «Електричні системи і мережі»

на тему: Аналіз аномальних процесів електричних мереж з ізольованим режимом роботи нейтралі

Виконала: студентка 6 курсу, групи ЕС-61м
(шифр групи)

_____ Наливайська Анастасія Едуардівна
(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Науковий керівник ст. викл., к.т.н., Бесараб Олександр Борисович
(посада, наукова ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент доц., к.т.н., Денисюк Петро Левкович
(посада, наукова ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

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

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра електричних мереж та систем

Рівень вищої освіти – магістерський за освітньо-науковою програмою

Спеціальність – **141** Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Спеціалізація – «Електричні системи і мережі»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

_____ В.В. Кирик
(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ 201__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студентці
Наливайській Анастасії Едуардівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Аналіз аномальних процесів електричних мереж з ізолюваним режимом роботи нейтралі»,

науковий керівник дисертації _____ ст. викл., к.т.н., Бесараб О.Б.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «21» березня 2018 р. №981-С

2. Строк подання студентом дисертації «16» травня 2018 р.

3. Об'єкт дослідження: електричні мережі середнього класу напруги з ізолюваним режимом роботи нейтралі.

4. Предмет дослідження: процеси у схемі нульової послідовності, викликані однофазними замиканнями.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1. Змоделювати конфігурацію електричної мережі середнього класу напруги. 2. Змоделювати чотири режими роботи нейтралі (ізолювана нейтраль, резонансно-заземлена нейтраль, резистивно-заземлена нейтраль та комбінована нейтраль). 3. При відповідній конфігурації електричних мереж домогтися появи ФРП, змодельовавши трансформатор напруги. 4. Змоделювати однофазне дугове замикання на землю.

5. Зміною конфігурації електричної мережі, домогтися появи нелінійних перехідних процесів. 6. На основі проведених моделювань зробити аналіз даної проблематики та висунути пропозицію щодо рішення проблеми виникнення перехідних процесів у мережах з ізольованою нейтраллю.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: 1. Мережі з малими струмами замикання на землю. 2. Модель електромагнітного трансформатора напруги. 3. Модель однофазного дугового замикання на землю. 4. Режим роботи нейтралі в мережах середнього класу напруги. 5. Вплив поперечної ємності мережі на перенапруги при однофазних замиканнях на землю. 6. Вплив напруги джерела живлення на дугові перенапруги в мережі. 7. Вплив поперечної ємності мережі на характер горіння заземлюючої дуги. 8. Вплив поперечної ємності на характер горіння заземлюючої дуги при включенні в мережу антирезонансних ТН.

7. Орієнтовний перелік публікацій: 1.Наливайська А.Е. Моделювання режимів роботи нейтралі в мережах 6-35 кВ // Новината за напреднали наука. – 2018. – с. 36-39. 2.Наливайська А.Е. Дослідження однофазних дугових замикань в мережах з ізольованою нейтраллю // Vědecký pokrok na přelomu tisíciletí. – 2018.(прийнята на публікацію)

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	ст., викл., к.т.н., Бесараб О.Б.		

9. Дата видачі завдання «__» _____ 20__ р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Моделювання конфігурації електричної мережі середнього класу напруги.	24.10.2016-17.03.2017	
2	Моделювання чотирьох режимів роботи нейтралі.	27.03.2017-19.05.2017	
3	Моделювання трансформаторів напруги та ФРП.	09.10.2017-20.10.2017	
4	Моделювання однофазного дугового замикання на землю.	23.10.2017-15.12.2017	
5	Дослідження нелінійних процесів в мережі 35 кВ.	05.02.2018-23.02.2018	
6	Аналіз проведених моделювань.	26.02.2018-23.03.2018	
7	Оформлення отриманих результатів.	02.04.2018-27.04.2018	
8	Оформлення технічних креслень.	30.04.2018-11.05.2018	

Студент

(підпис)

Наливайська А.Е.

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Бесараб О.Б.

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається з пояснювальної записки та графічної частини. Пояснювальна записка виконана на 105 сторінці формату А4, яка включає в себе 66 рисунків, 2 таблиці, 21 джерело використаної літератури. Графічна частина містить 8 аркушів технічних креслень форматом А1.

В дисертації розглянуто процес однофазних дугових замикань на землю, їх вплив на повітряні лінії електропередавання, а також режими роботи нейтралі, як засіб підвищення надійності роботи мережі. Проведено моделювання режимів роботи нейтралі та вплив на неї поперечних ємностей при дугових замиканнях. Сформовано рекомендації щодо вибору оптимальних режимів роботи нейтралі при різних дугових перенапругах в мережі.

Актуальність теми. Розподільчі мережі 6–35 кВ є найпротяжнішими з найбільш важким режимом роботи електроустаткування щодо дії внутрішніх перенапруг. Найпоширенішими причинами аварійних пошкоджень в цих електромережах є дугові та комутаційні перенапруги, а також ферорезонансні процеси. Одним зі способів зменшення рівнів внутрішніх перенапруг в електромережах є зміна режиму заземлення нейтралі. Електричні мережі 6–35 кВ можуть працювати в режимі з ізольованою, резистивно- та резонансно-заземленою нейтраллю. Водночас, в науковому середовищі немає однозначної думки щодо застосування того чи іншого способу заземлення нейтралі. Це пов'язано з тим, що застосування електромереж з ізольованою та резонансно-заземленою нейтраллю має як переваги, так і значні недоліки, а досвід застосування резистивного заземлення нейтралі в електромережах України практично відсутній.

Метою магістерської дисертації є розвиток математичних моделей, методів і засобів, що дозволяють на основі аналізу квазістаціонарних режимів і перехідних процесів мінімізувати негативні наслідки однофазно-несиметричних режимів, що виникають в розподільних мережах 6-35 кВ.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **задачі**:

- змодельовати конфігурацію електричної мережі;
- змодельовати чотири режими роботи нейтралі;
- при відповідній конфігурації електричних мереж домогтися появи ФРП;
- змодельовати однофазне дугове замикання на землю;
- змодельовати однофазне дугове замикання;
- на основі проведених моделювань зробити аналіз даної проблематики та

висунути пропозицію щодо рішення проблеми виникнення перехідних процесів у мережах з ізольованою нейтраллю.

Об'єкт дослідження: електричні мережі середнього класу напруги з ізольованим режимом роботи нейтралі.

Предмет дослідження: процеси у схемі нульової послідовності, викликані однофазними замиканнями.

Методи дослідження. В основу роботи покладено імітаційне математичне моделювання процесів виникнення дугових перенапруг в повітряних лініях електропередавання номінальною напругою 35 кВ. Обробка результатів дослідження виконувалася з використанням сучасного прикладного програмного середовища SimPowerSystem пакету програм MATLAB.

Наукова новизна результатів полягає в розроблені імітаційних моделей електричної мережі 35 кВ, трансформаторів напруги, режимів роботи нейтралі, однофазних дугових замикань.

Публікації за тематикою досліджень:

1. .Наливайська А.Е. Моделювання режимів роботи нейтралі в мережах 6-35 кВ // Новината за напреднали наука. – 2018. – с. 36-39.
2. Наливайська А.Е. Дослідження однофазних дугових замикань в мережах з ізольованою нейтраллю // Vědecký pokrok na přelomu tisíciletí. – 2018.(прийнята на публікацію)

ІЗОЛЬОВАНА НЕЙТРАЛЬ, НАПРУГА НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ, ОДНОФАЗНЕ ДУГОВЕ ЗАМИКАННЯ, ТРАНСФОРМАТОР НАПРУГИ, КРАТНОСТІ ПЕРЕНАПРУГ.

ABSTRACT

Master's thesis consists of an explanatory note and graphical part. The explanatory note is made up of 105 pages of A4 format; it includes 66 figures, 2 tables, 21 references. The graphical part contains 8 sheets of A1 format technical drawings.

The dissertation deals with the process of single-phase arc faults on the ground, their influence on the air lines of power transmission, as well as the modes of neutral operation, as a means to increase the reliability of the network. The simulation of the neutral modes and the influence of transverse capacitances on arc interconnections are carried out. Formed recommendations on the choice of optimal modes of neutral operation at different arc overvoltages in the network.

Relevance of the topic. Distribution networks of 6-35 kV are the most prolonged with the most difficult mode of operation of the electrical equipment regarding the operation of internal overvoltages. The most common causes of emergency damage in these electrical systems are arc and switching overvoltages, as well as ferro-resonance processes. One way to reduce the levels of internal overvoltage in the power grids is to change the neutral grounding mode. 6-35 kV electrical networks can operate in isolation, resistive and resonant-grounded neutral mode. At the same time, in the scientific environment there is no unambiguous idea about the use of one or another method of grounding neutral. This is due to the fact that the use of isolated and resonant-grounded neutral networks has both advantages and significant disadvantages, and the experience of using resistive neutral grounding in the power grids of Ukraine is practically absent.

The purpose of master's thesis is the development of mathematical models, methods and means that allow, on the basis of the analysis of quasi-stationary modes and transient processes, to minimize the negative effects of single-phase and asymmetric regimes that arise in distributive networks of 6-35 kV.

To achieve purpose, it is necessary to solve the following **tasks**:

- simulate the configuration of the electric network of the middle class voltage;
- to simulate four modes of neutral operation;

- at the appropriate configuration of electric networks to achieve the appearance of the FRP;

- simulate single-phase arc fault on the ground;

- simulate single-phase arc circuit;

- on the basis of the simulations carried out, to analyze the given problem and to put forward a proposal for solving the problem of transient processes in networks with isolated neutrality.

Object of the study: electric networks of the middle class voltage with the isolated mode of operation of the neutral.

Subject of the study: processes in the zero-sequence circuit caused by single-phase faults.

Methods of research. The basis of the work is the simulation mathematical modeling of the processes of occurrence of arc overvoltages in air lines of transmission with a nominal voltage of 35 kV. The results of the study were processed using the current application software environment of the SimPowerSystem software package MATLAB.

The scientific novelty of the results consists of developed simulation models of the electric network of 35 kV, voltage transformers, operating modes of neutral, single-phase arc closures.

Publication on research topic:

1. Nalyvaiska A.E. (2018). Simulation of neutral modes in networks 6-35 kV. Novunata za naprednali nayka, 36-39 (ukr).

2. Nalyvaiska A.E. (2018). Research of single-phase arc circuits in networks with isolated neutral. Vědecký pokrok na přelomu tisíciletí.

ISOLATED NEUTRAL, ZERO SEQUENCE VOLTAGE, SINGLE-PHASE ARC CIRCUIT, VOLTAGE TRANSFORMER, RESONANTLY GROUNDED NEUTRAL, RESISTIVE GROUNDED NEUTRAL, MULTIPLICITY OVERVOLTAGE.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ.....	9
ВСТУП.....	10
1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ПЕРЕНАПРУГ В МЕРЕЖАХ З МАЛИМИ ЄМНІСНИМИ СТРУМАМИ НА ЗЕМЛЮ.....	11
1.1 Фізична сутність явища ферорезонансу.....	12
1.2 Огляд існуючих методик аналізу дугових перенапруг в мережах 6-35 кВ.....	20
1.3 Розвиток перенапруг при перемежованому дуговому замиканні на землю в трифазній мережі з ізольованою нейтраллю.....	34
1.4 Перенапруги при перемежованому дуговому замиканні на землю і обриві проводу.....	41
1.5 Перенапруги при перемежованому дуговому замиканні на землю в мережі з дугогасною котушкою.....	43
Висновки до розділу 1.....	45
2 ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ СЕРЕДНЬОГО КЛАСУ НАПРУГИ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB.....	46
2.1 Модель електромережі середнього класу напруги.....	47
2.2 Модель електромагнітного трансформатора напруги.....	53
2.3 Модель режиму роботи нейтралі в мережі.....	63
2.3.1 Модель ізольованої нейтралі.....	64
2.3.2 Модель нейтралі заземленої через дугогасний реактор.....	65
2.3.3 Модель нейтралі заземленої через резистор.....	68
2.3.4 Модель нейтралі із комбінованим заземленням.....	71
2.4 Модель однофазного дугового замикання на землю.....	72
Висновки до розділу 2.....	83

3 АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПОПЕРЕЧНИХ ЄМНОСТЕЙ МЕРЕЖІ НА ХАРАКТЕР ПЕРЕНАПРУГ ПРИ ОДНОФАЗНИХ ДУГОВИХ ЗАМИКАННЯХ НА ЗЕМЛЮ.....	84
3.1 Залежність кратностей дугових перенапруг від величини поперечної ємності мережі.....	84
3.2 Вплив напруги джерела живлення на дугові перенапруги в мережі.....	89
3.3 Вплив поперечної ємності мережі на характер горіння заземляючої дуги.....	94
3.4 Вплив поперечної ємності на характер горіння заземляючої дуги при включенні в мережу антирезонансних ТН.....	98
Висновки до розділу 3.....	103
ВИСНОВКИ.....	104
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	105
Додаток А. Результати перевірки на плагіат.....	106

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

ЛЕП – лінія електропередавання

ПЛ – повітряна лінія

КЛ – кабельна лінія

ТН – трансформатор напруги

ТНКИ – трансформатор напруги контролю ізоляції

ВН – висока напруга

НН – низька напруга

ТВП – трансформатор власних потреб

ПЛ – повітряна лінія електропередавання

ЕРС – електрорушійна сила

ВАХ – вольт-амперна характеристика

СВАХ – статична вольт-амперна характеристика

ПЗ – програмне забезпечення

ОЗЗ – однофазне замикання на землю

ДГР – дугогасний реактор

ММДД – математична модель динамічної дуги

ФРП – ферорезонансний процес

ВСТУП

Розподільчі мережі 6–35 кВ є найпротяжнішими з найбільш важким режимом роботи електроустаткування щодо дії внутрішніх перенапруг. Найпоширенішими причинами аварійних пошкоджень в цих електромережах є дугові та комутаційні перенапруги, а також ферорезонансні процеси. Дугові замикання на землю є небезпечними не лише за своєю величиною, а й тривалістю, внаслідок чого може пошкоджуватись ізоляція електроустаткування, пошкодження можуть переходити у дво- та трифазні короткі замикання. Комутаційні процеси в електромережах характеризуються, передусім, небезпечними величинами перенапруг. Особливо небезпечними є перенапруги, які розвиваються під час комутацій електродвигунів, які зараховують до електроустаткування з полегшеною ізоляцією.

Що ж стосується ферорезонансних перенапруг, то основну небезпеку вони становлять не своєю величиною, а тривалістю ферорезонансного процесу та насиченням магнітної системи вимірювальних трансформаторів напруги. Внаслідок цього значно зростають струми у первинних обмотках трансформаторів напруги, що призводить до їх пошкоджень. Ферорезонансний процес триває доти, доки не розлаштується ферорезонансний контур. Цей процес може тривати декілька хвилин і більше. Протягом цього часу постійно спрацьовуватимуть обмежувачі перенапруг нелінійні та може відбуватись їх термічне пошкодження.

Одним зі способів зменшення рівнів внутрішніх перенапруг в електромережах є зміна режиму заземлення нейтралі. Електричні мережі 6–35 кВ можуть працювати в режимі з ізольованою, резистивно- та резонансно-заземленою нейтраллю. Водночас, в науковому середовищі немає однозначної думки щодо застосування того чи іншого способу заземлення нейтралі. Це пов'язано з тим, що застосування електромереж з ізольованою та резонансно-заземленою нейтраллю має як переваги, так і значні недоліки, а досвід застосування резистивного заземлення нейтралі в електромережах України практично відсутній.

1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ПЕРЕНАПРУГ В МЕРЕЖАХ З МАЛИМИ ЄМНІСНИМИ СТРУМАМИ НА ЗЕМЛЮ

Металеве замикання на землю в мережі з ізольованою нейтраллю приводить до підвищення напруги на здорових фазах до $U_L = \sqrt{3} \cdot U_\phi$ (за відсутності резонансних явищ). Такі напруги нормальна ізоляція цих мереж повинна витримувати тривало. Якщо ж замикання на землю відбувається через нестійку дугу, горіння якої супроводжується повторними згасаннями і запалюваннями, то на здорових, а також на ушкоджених фазах мережі можливий розвиток перенапруг.

Перенапруги виникають при нестійкому горінні заземлювальних дуг і супроводжуються зсувом нейтралі системи, що може бути викликано залишковими зарядами на ємностях при гасінні дуги. Було висунуто дві основні теорії розвитку перенапруг. Відповідно до першої теорії (Петерсена) залишкові заряди в системі зумовлені гасінням дуги замикання на землю в момент проходження через нуль струму високочастотного коливання, що виникає при запалюванні дуги, аналогічно тому, як це має місце у вимикачах при відключенні ємнісного навантаження. Відповідно до другої теорії (Петерс і Слеп'ян) гасіння дуги відбувається при проходженні струму робочої частоти через нульове значення. Імовірність того або іншого механізму гасіння дуги визначається деіонізувальними факторами, що впливають на дугу.

Гасіння відкритої дуги в повітрі звичайно управляється струмом робочої частоти. Дуга в маслі може часто гаснути і при проходженні через нуль високочастотного струму. Більшість дослідників сходяться на тому, що можливі обидва механізми гасіння заземлювальної дуги. Відповідно до того або іншого механізму гасіння дуги будується теорія дугових перенапруг – за Петерсоном або за Петерсом та Слепяном. Обидві теорії дають верхні значення амплітуд перенапруг.

Істотну роль у механізмі розвитку дугових перенапруг відіграє не стільки питання про момент гасіння дуги, скільки фактор відновлення електричної ізоляції дугового проміжку після гасіння дуги. Від швидкості відновлення ізоляції дугового

проміжку залежить можлива амплітуда зсуву потенціалу всієї системи, а отже, і можливі перенапруги.

1.1 Фізична сутність явища ферорезонансу

Дослідження нелінійних процесів в різних фізичних системах є однією з найбільш цікавих і складних проблем фізики. По суті всі завдання фізики нелінійні, але в більшості випадків лінеаризація рівнянь, що описують поведінку системи, призводить до задовільного результату. Для уточнення розрахунку досить ввести деякі поправки в лінійне рішення. Однак існує ряд завдань, в яких лінеаризація в принципі не може дати правильного рішення, так як нелінійність призводить до виникнення явищ, неможливих в лінійних системах. В електротехніці прикладом такого роду завдань є коливання в ланцюгах, що містять котушки індуктивності з насиченим осердям. Вольт-амперна характеристика такого елемента істотно нелінійна. У ланцюгах, що містять ємність і нелінійну індуктивність, можуть виникати ферорезонансні явища [1]. Залежно від способу з'єднання розрізняють ферорезонанс в послідовних і паралельних ланцюгах. При послідовному або паралельному з'єднанні нелінійної котушки індуктивності і ємнісного елемента при плавній зміні напруги або струму джерела живлення спостерігається стрибкоподібна зміна струму в ланцюзі або напруги на елементах ланцюга. Це пояснюється тим, що індуктивність котушки з феромагнітним сердечником нелінійно залежить від струму і, отже, при певному його значенні настає компенсація індуктивної та ємнісної провідності.

У розгалужених ланцюгах з різною схемою з'єднання нелінійних котушок і конденсаторів виникають більш складні явища, які неможливо розглядати окремо як ферорезонанс напруг або струмів. У загальному випадку 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 нелінійної котушки. Якщо обмотка котушки не розрахована на роботу в режимі сильного насичення, то

перенапруги і протікання через обмотку струмів, що перевищують гранично допустимий струм, можуть привести до теплового руйнування ізоляції обмотки і виткових замикань.

Термін «ферорезонанс» відноситься до всіх коливальних процесів в електричних ланцюгах, які повинні містити, принаймні:

- нелінійну індуктивність;
- ємність;
- джерело напруги;
- малі втрати.

Електричні мережі містять велику кількість насичуваних індуктивних елементів: силові і вимірювальні трансформатори, шунтуючі реактори і т.д., а також ємнісних елементів: кабелі, довгі лінії, ємнісні трансформатори напруги, батареї конденсаторів, що вирівнюють ємності вимикачів. Ці елементи потенційно можуть бути, і є в реальності, причиною виникнення ферорезонансних коливань.

Головною особливістю даного явища є можливість виникнення кількох стійких станів при одному і тому ж наборі параметрів ланцюга. Ферорезонанс може бути викликаний перехідними процесами, які є наслідком грозових і внутрішніх перенапруг, комутацій трансформаторів або навантаження, виникнення або усунення короткого замикання і т.д.

Специфічні особливості ферорезонансу особливо чітко проявляються при порівнянні явищ, що протікають в лінійних і нелінійних резонансних контурах. У лінійному резонансному RLC-контурі резонанс може виникнути при будь-якій амплітуді напруги, а параметри елементів і резонансна частота контуру пов'язані однозначним співвідношенням $LC\omega_p^2 = 1$.

Розглянемо характерні особливості ферорезонансних коливань на прикладі вільних коливань в LC-контурі на рис. 1.1 при розряді ємності, зарядженої до напруги U_0 , на нелінійну індуктивність.

Втратами в контурі нехтуємо, спрощена крива намагнічування котушки індуктивності представлена на рис. 1.2. Нижче наведені модельні розрахунки для нелінійного контура, що має наступні параметри:

$C = 10^{-3} \text{ Ф}$ – ємність конденсатора;

$L_{\mu} = 1 \text{ Гн}$ – індуктивність нелінійної котушки на початковій ділянці;

$L_S = 0,01 \text{ Гн}$ – індуктивність насичення котушки;

$\psi_S = 1 \text{ Вб}$ – критичне потокозчеплення;

$i_S = 1 \text{ А}$ – критичний струм.

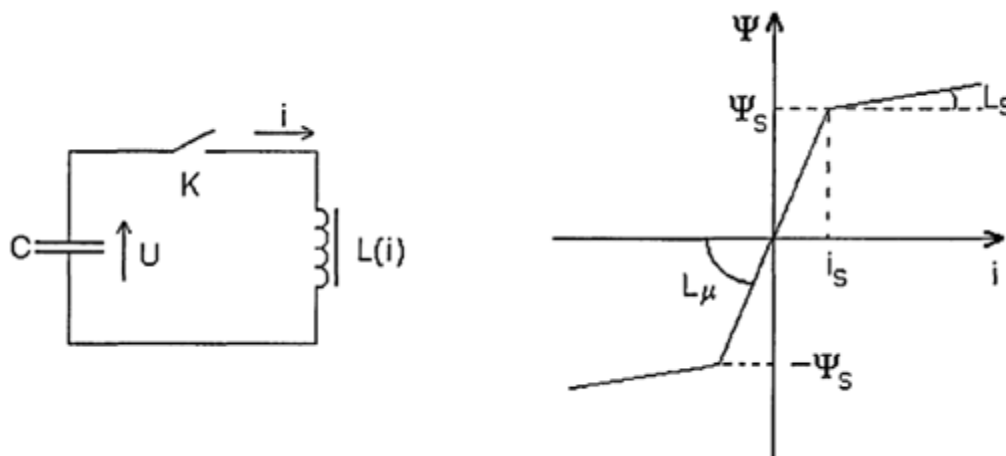


Рисунок 1.1 – Елементарний ферорезонансний контур

Після замикання ключа K в контурі виникають вільні коливання з початковою частотою $\omega_0 = 1/\sqrt{L_{\mu}C}$. Якщо максимальне значення струму $i_{max} = U_0\omega$ не перевищує величини i_S , то частота коливань зберігає своє значення, що зображено на рис. 1.1. Якщо в момент часу t_1 поточне значення струму перевищить значення струму насичення, що зображено, то частота коливань стрибком змінюється до значення $\omega_S = 1/\sqrt{L_S C}$, і зберігається до моменту часу t_2 , коли поточне значення струму стане менше величини i_S . Так як втрат в контурі немає, процес приймає періодичний характер. Період коливань визначається виразом $T = 2\pi\sqrt{L_S C + 2(t_3 - t_2)}$, де проміжок часу від t_2 до t_3 відповідає ненасиченого стану магнітопровода котушки індуктивності. Оцінити цей проміжок можна з таких міркувань. Приріст потоку за час від t_2 до t_3 визначається виразом:

$$\Delta\psi = 2\psi_s = \int_{t_2}^{t_3} u(t)dt.$$

Якщо припустити, що за цей час напруга на ємності змінюється несуттєво і прийняти його рівним U_0 , то з цього виразу випливає, що $t_3 - t_2 \approx 2\psi_s / U_0$. Чим вище початкова напруга на ємності, тим менше цей проміжок часу і тим менше період коливань, який в границі прямує до величини $T = 2\pi / \sqrt{L_s C}$, що зображено на рис. 1.2, в. Таким чином, частота коливань в нелінійній коливальному контурі залежить від початкового заряду на ємності і знаходиться в межах:

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_\mu C}} < f < \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C}}$$

У реальному контурі завжди присутні активні втрати, які призводять до того, що напруга при кожному перезаряді ємності зменшується, а це, в свою чергу, призводить до зменшення частоти коливань. На рис. 1.2, г показано напруга на ємності при тих же початкових умовах, що і на рис 1.2, б, але при активному опорі контура $R = 1$ Ом.

Якщо в контурі присутнє джерело синусоїдальної напруги, що компенсує активні втрати, то, за певних умов, частота коливань в контурі може стати рівною частоті джерела, якщо початкова частота більше частоти джерела, що зображено на рис. 1.3, а, або дільної частоти джерела, якщо початкова частота менше частоти джерела, рис. 1.3, б.

На рис наведено приклади гармонійних і субгармонійних коливань напруги в послідовному контурі з синусоїдальним джерелом з амплітудою 19 В. Інші параметри схеми такі ж, як і на рис. 1.2, г.

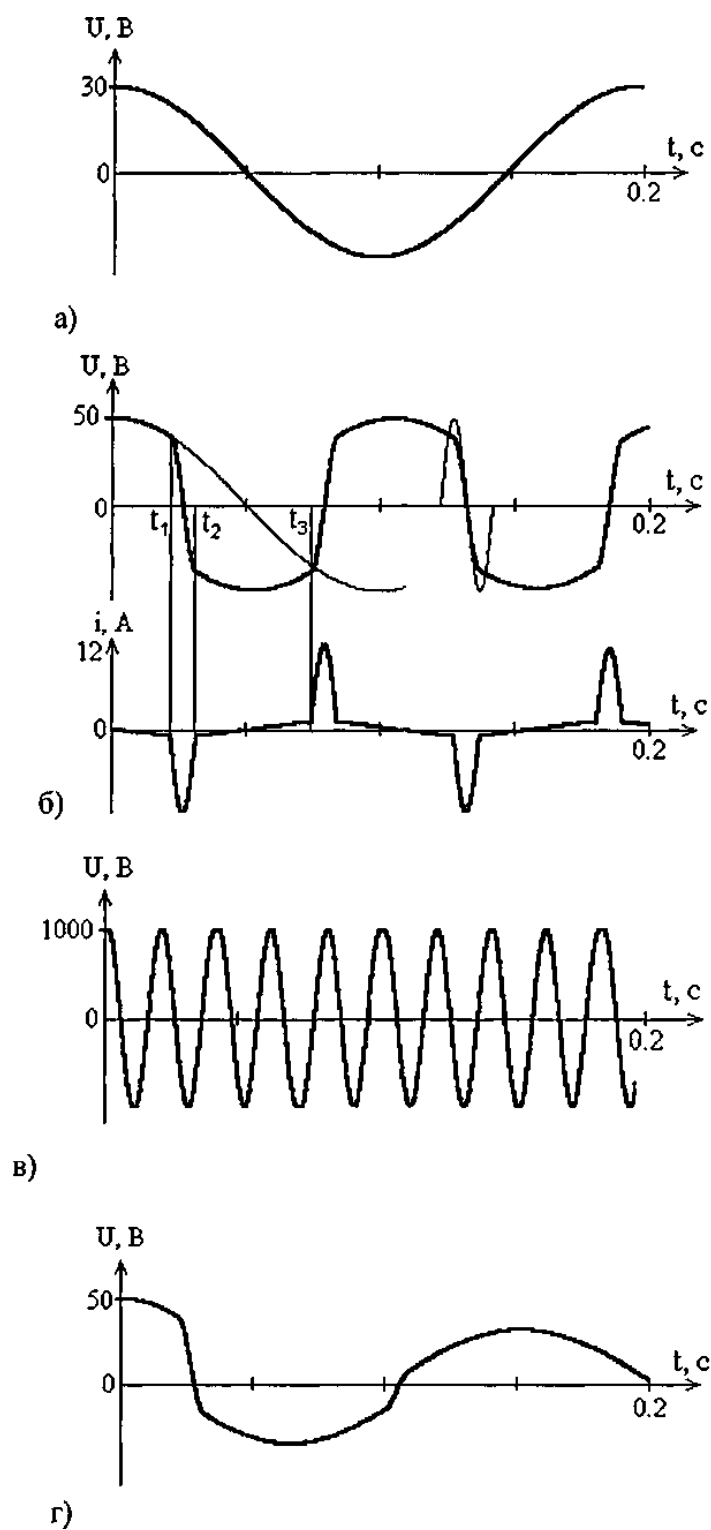


Рисунок 1.2 – Вільні коливання в послідовному ферорезонансному контурі

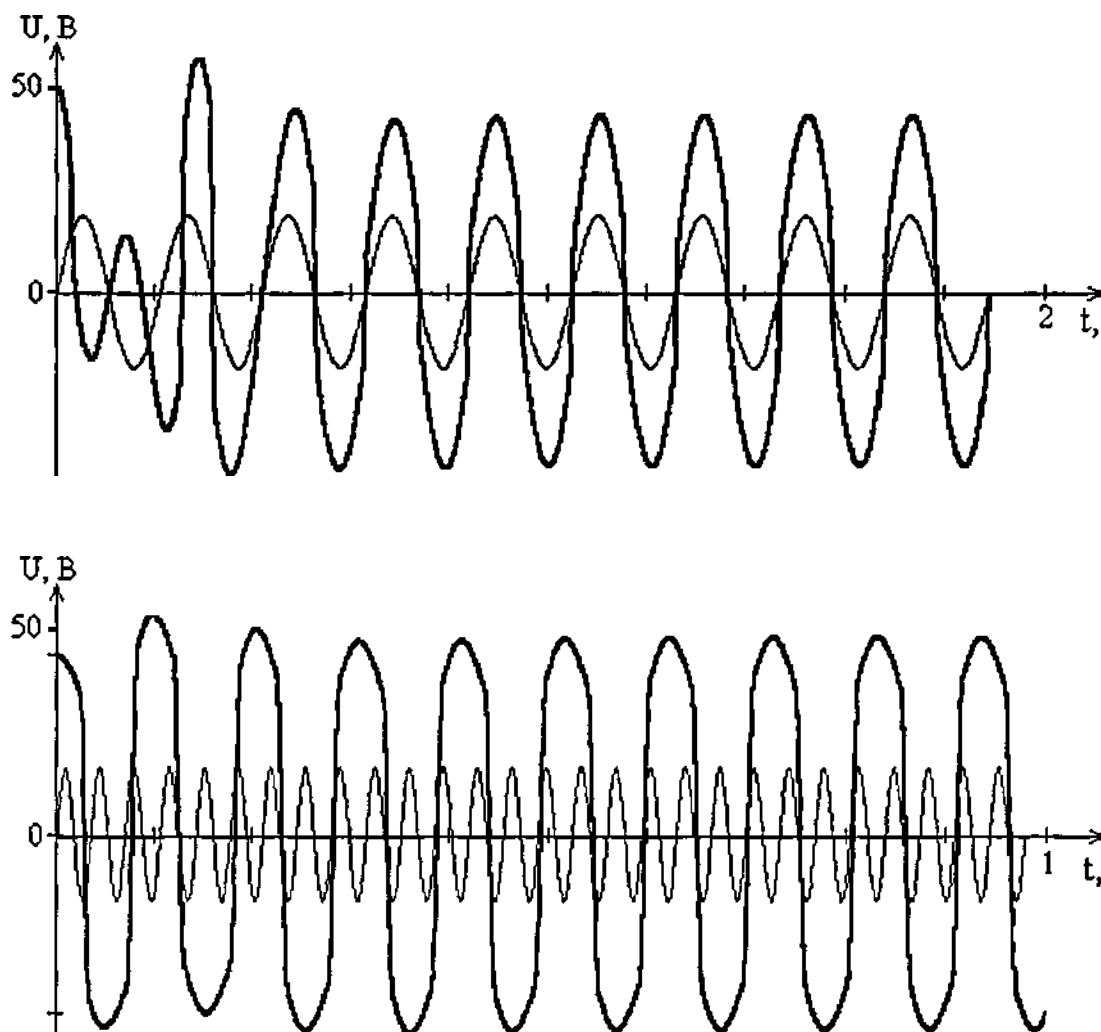


Рисунок 1.3 – Гармонійні і субгармонійні коливання в ферорезонансному контурі

Таким чином, головними відмінностями між ферорезонансними і лінійним резонансним контурами є:

- виникнення ферорезонансу на даній частоті можливо в широкому діапазоні зміни ємності контуру;
- частота напруги і струму в елементах контуру може відрізнятися від частоти синусоїдального джерела напруги;
- в нелінійному контурі можливе існування декількох стійких станів при одній і тій же конфігурації контуру і параметрах елементів. Одним з цих станів є нормальний експлуатаційний режим системи, в той час як інші стани є позаштатними і можуть представляти різного ступеня небезпеку для елементів ланцюга. Початкові умови (заряд конденсаторів, залишкова намагніченість

магнітопроводів трансформаторів, стан комутуючих пристроїв) визначають, який із стійких режимів буде реалізований.

У трифазних ланцюгах можна виділити два типи завдань про ферорезонансні процеси. Перший тип відноситься до трифазних мереж з глухозаземленою нейтраллю, які можна звести до однофазного представлення, описаного вище. Причиною виникнення ферорезонансу в цих мережах можуть бути відключення однієї або двох фаз, перегорання фазних запобіжників, обрив проводів ЛЕП і т.п

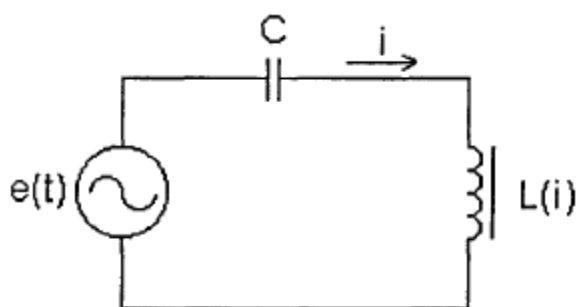


Рисунок 1.4 – Еквівалентний контур трифазної мережі з глухозаземленою нейтраллю

Інакше йдуть справи з завданнями другого типу. Трифазний нелінійний електричний ланцюг з ізольованою нейтраллю неможливо згорнути в однофазний контур, тому навіть спрощені еквівалентні схеми описуються не менше ніж чотирма нелінійними диференціальними рівняннями. Застосування традиційних аналітичних і графоаналітичних методів стикається з труднощами, пов'язаними з надмірною громіздкістю обчислень. Тому основним способом розрахунку подібних ланцюгів є чисельне моделювання на ЕОМ. Лише порівняно недавно почали робитися спроби застосування аналітичних методів, заснованих на застосуванні в ферорезонансних процесах нелінійної динаміки і теорії хаотичних систем.

Нелінійні динамічні системи характеризуються існуванням декількох стійких станів при одному і тому ж наборі параметрів системи. Такі системи є високочутливими до початкових умов, які визначають, який із стійких режимів буде

реалізований. Стійкі коливання в системі можуть бути як періодичними, так і неперіодичними - квазіперіодичними або хаотичними.

У разі ферорезонансу початковими умовами, що визначають стійкий стан, є залишкова намагніченість феромагнітного сердечника, заряд на ємностях фаз і фазні напруги в момент порушення перехідного процесу. Навіть порівняно невеликі відмінності в початкових умовах можуть приводити до абсолютно різних стійких коливальних процесів, в тому числі до ферорезонансу.

Внаслідок такої високої чутливості нелінійних систем до початкових умов, чисельні методи рішення не дозволяють точно визначити області стійкості того чи іншого виду коливань. В даний час робляться спроби використовувати для вирішення цього завдання методи нелінійної динаміки і потрібно зауважити, що дослідження перенапруг надає прекрасну можливість для залучення до цього сучасного і перспективного напрямку науки.

За електричною схемою і складом електрообладнання виділяються наступні ферорезонансні схеми з перенапругами:

- схеми, що утворюються при обриві проводів повітряної лінії електропередачі;
- схеми з неповнофазним постачанням через повітряну лінію електропередачі ненавантажених силових трансформаторів з ізолюваною нейтраллю;
- схеми, в яких відбувається дугове замикання на землю з електромагнітними трансформаторами напруги, що служать для контролю ізоляції мережі.

У даній роботі основна увага приділена вивченню перенапруг, що виникають в розгалужених мережах 6-35 кВ з ізолюваною нейтраллю з трансформаторами напруги.

1.2 Огляд існуючих методик аналізу дугових перенапруг в мережах 6-35 кВ

У нашій країні проблемі пошкодження електрообладнання в електричних мережах через ферорезонансні явища приділяється увага з 30-х років . Причиною цьому послугувало збільшення навантаження споживачів, що зумовило будівництво і розширення наявних електричних розподільних мереж, в яких можливе виникнення режимів роботи, що призводять до ферорезонансних явищ.

До кінця 40-х років в СРСР під впливом вимог селективності дії релейного захисту, що діє на відключення замикань на землю, і роботи систем сигналізації замикання значна частина мереж 6-35 кВ працювала з нейтраліми, заземленими через активні опори не тільки тоді, коли була відсутня компенсація ємнісних струмів замикання на землю, а й при наявності дугогасних апаратів. Були поширені також схеми шунтування і відключення дугогасних апаратів на час на час дії релейних захистів, селективність яких в значній мірі залежала від величини струму, що протікає через місце пошкодження. Для цього деякі розподільні мережі 6-35 кВ працювали навіть з ефективним заземленням нейтралі. Це свідчило про відсутність правильної оцінки залежності між надійністю роботи мережі і станом її нейтралі. Невірні теоретичні передумови при розрахунку дугогасних апаратів приводили до чисельних пошкоджень не тільки ізоляції з зниженою електричною міцністю, але і абсолютно нормальною ізоляції. Складалося враження, що небезпечні перенапруження, що виникають при дугових замиканнях на землю, є серйозним аргументом на користь відмови від експлуатації мереж з ізольованою нейтраллю.

Для оцінки дугових перенапруг використовувалася, як правило, теорія Петерсона без урахування факторів, що знижують перенапруження. така оцінка застосовувалася і при встановленні координації ізоляції ліній електропередачі, підстанцій і устаткування в мережах 6-35 кВ. Впровадження в розподільних мережах неефективних заходів і способів призводило до збитку у вигляді недовідпуску електроенергії, зайвих резервів по обладнанню та запасів по ізоляції.

За кордоном актуальність проблеми пошкодження обладнання в електричних мережах через ферорезонансні явища та дугові перенапруги підтверджується дослідженнями, проведеними в США, Канаді, Франції, Німеччині: Bergmann C., Kieny C., Heuck K., Janssens N., Soudack A.C. і т. д.

Значний внесок у дослідження замикань на землю вніс Ф.А.Ліхачев. Ним проведені детальні експериментальні і теоретичні дослідження замикань на землю в мережах з ізолюваною і компенсованою нейтраллю, розглянуті процеси горіння заземляючої дуги. В роботі наводиться аналіз дугових замикань по теоріям про перенапруження при дугових замиканнях Петерсена, Петерсена-Слепяна і Беякова на основі експериментальних вимірювань в діючих мережах. У його аналізі зроблена спроба встановити ймовірності появи найбільших перенапруг на підставі оцінки впливів окремих параметрів і статистичної обробки результатів.

Дослідження фізичної сутності протікання ферорезонансних явищ при перемежованих дугових замиканнях на землю в мережах з ізолюваною нейтраллю проведено Зіхерманом М.Х. Автором відзначається, що найбільш часто зазначені процеси виникають у мережах з повітряними лініями електропередачі, що мають невеликий струм замикання на землю (1-10 А).

Небезпечною для трансформатора напруги є перемежована дуга. Чергуючи гасіння і запалювання, вона створює такі один за одним перехідні процеси, які впливають на трансформатор як перенапруженнями, так і перезбудженнями магнітної системи. Перезбудження є більш небезпечним, так як перенапруга не перевищує рівня ізоляції.

Наведені результати експериментів, проведених в мережах 6-10 кВ і на їх моделях з натуральними величинами напруги і струму і з реальними трансформаторами напруги, що підтверджують можливість виникнення ферорезонансних явищ при перемежованих дугових замиканнях на землю, при яких ушкоджуються трансформатори напруги. Стрибки струму намагнічування перевищували 5 А, ефективне значення струму нейтралі трансформатора напруги склало 1,5 А. Дослідним шляхом було встановлено, що установка резистора 25 Ом в нейтраль трансформатора напруги не змогла перешкодити його пошкодженню.

Автор наводить статистичні дані про режими роботи трансформаторів напруги в експлуатації, отримані на основі автоматичної реєстрації експлуатаційних режимів. Стверджується, що найчастішими причинами пошкодження трансформаторів напруги контролю ізоляції є дугові замикання на землю і ферорезонанс між ємністю мережі і індуктивністю силового понижуючого трансформатора.

Ліхачовим Ф.А., Бойко В.І., Панасюком Д.І. та ін. розглянуті явища при дугових замиканнях на землю в мережах 6-35 кВ з ізолюваною нейтраллю. Існування подібних форм протікання процесів при дугових замиканнях автори підтверджують експериментальними осцилограмами напруг і струмів нульової послідовності. У роботі наводиться якісний розгляд ферорезонансних явищ даного типу. Для оцінки можливих струмових перевантажень використовується схема заміщення нульової послідовності, представлена на рис 1.5.

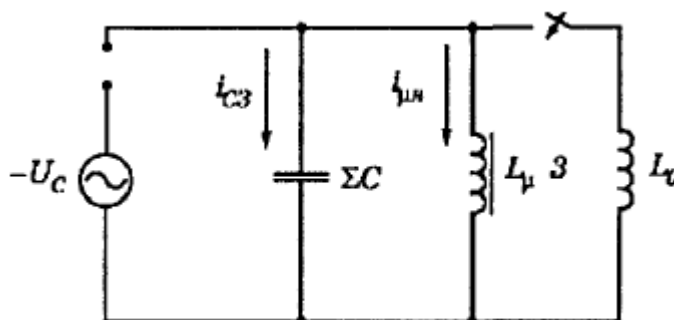


Рисунок 1.5 – Схема заміщення нульової послідовності при дугових замиканнях на землю: ΣC – сумарна ємність мережі відносно землі; L_μ – індуктивність трансформатора напруги; L_0 – компенсаційна індуктивність

Наближене значення струму нульової послідовності визначається виразом:

$$i_{\mu 0} = -i_c = -\Sigma C \frac{dU_0}{dt},$$

де $i_{\mu 0}$ – струм в нейтралі високовольтних обмоток ТНКІ;

i_c – ємнісний струм у місці пошкодження;

ΣC – сумарна ємність мережі;

U_0 – напруга на нейтралі мережі.

Для запобігання небезпечних ферорезонансних явищ при дугових замиканнях на землю авторами пропонується компенсація ємнісних струмів на землю, при якій в схему нульової послідовності паралельно індуктивності $L_\mu / 3$ вводиться лінійна індуктивність L_0 , що визначає частоту вільних коливань U_0 за час безструмових пауз, близьку промисловій частоті мережі. При цьому струми в високовольтних обмотках ТНКИ мають чисту синусоїдальну форму, а їх величина незначно відрізняється від номінального значення (15-20 мА).

У роботах Цапенко Е.Ф. пропонується методика дослідження і розрахунку дугових замикань на землю для мереж з ізольованою і компенсованою нейтраллю. Процеси, що відбуваються в некомпенсованій мережі, при перемежованій дузі досліджуються на принциповій схемі, представленої на рис. 1.6, в якій враховуються індуктивності і активні опори проводів лінії електропередачі і ємності фаз мережі щодо землі. Передбачається, що виникнення дуги відбувається в той момент, коли напруга пошкодженої фази має значення, близьке до амплітудного.

Розрахунок перехідних процесів проводиться операційним методом. При горінні дуги використовується схема, представлена на рис. 1.6, а, а після згасання дуги – схема на рис. 1.6, б.

Автор не враховує впливу трансформаторів напруги на характер перехідного процесу, проте зауважує, що опори, що вносяться трансформаторами напруги, можуть значно впливати на струми витоку і замикань на землю. При несиметричному режимі ці опори пропонується знаходити як відношення напруги нульової послідовності до струму нульової послідовності. Вважається, що індуктивності обмоток трансформатора напруги лінійні.

Запропонована автором модель ферорезонансних схем і її рішення дозволяють отримати якісну оцінку впливу параметрів схеми на протікання перехідних

процесів, що виникають перенапруги і струмові перевантаження трансформаторів напруги.

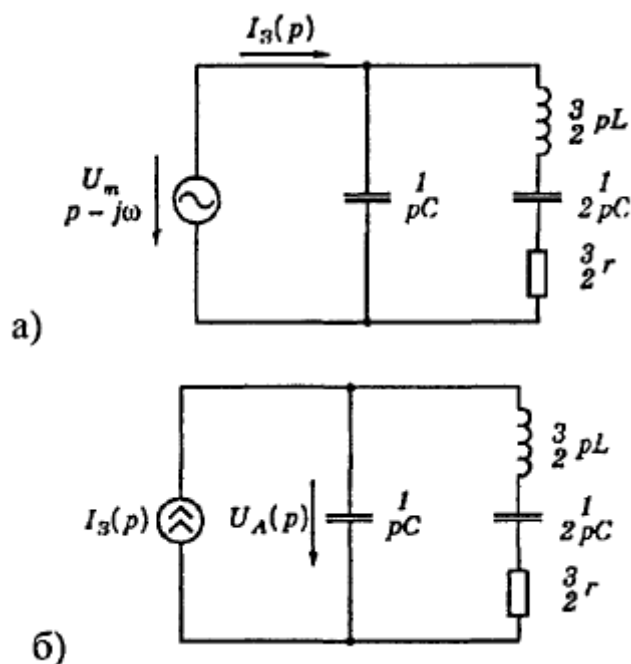


Рисунок 1.6 – Операторні схеми розрахунку струму замикання на землю:

а – при горінні дуги; б - після згасання дуги.

Ферорезонансні явища при перемежованих дугових замиканнях розглядаються Сиротою І.М. як вільні коливання струмів нульової послідовності, що утворюються внаслідок обривів заземлюючої дуги. При цьому автор зауважує, що загальноприйнятий до таких процесів в електричних мережах термін "ферорезонансні" слід вважати умовним і не цілком точним через відсутність іншого стислого найменування, яке більш точно відображало б фізичну сутність даних процесів.

Можливість пошкодження обмоток трансформаторів напруги визначається значними струмами нульової послідовності, що виникають унаслідок обривів заземлюючої дуги. Процеси, що протікають в схемі, розглядаються з точки зору принципу накладання із застосуванням методу симетричних складових. Розрахункова схема заміщення ділянки мережі приведена на рис. 1.7.

Як сама радикальна міра запобігання ферорезонансним процесам при замиканні фази на землю в даній роботі пропонується заземлення нейтралі мережі через дугогасну котушку. Автор пропонує при невеликому ємнісному струмі мережі, близько $I_C \leq 10A$, заземлення нейтралі мережі через високомний активний опір, котрим створюється додатковий активний струм замикання на землю рівний $(0,5-1) I_C$. Відзначається, що при заземленні через активний опір з великою ймовірністю запобігається небезпека подвійних замикань на землю і поліпшуються умови безпеки.

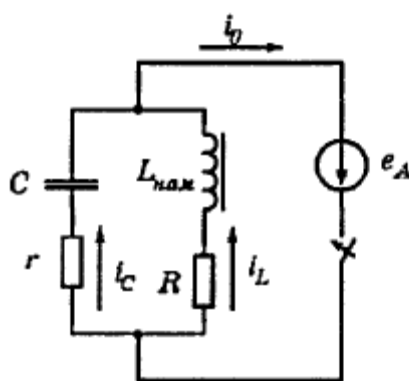


Рисунок 1.7 – Схема заміщення нульової послідовності мережі при дуговому замиканні на землю

На рисунку 1.7 R – активний опір первинної обмотки трансформатора напруги; C – ємність фази щодо землі всієї електрично з'єднаної мережі; r – сумарний поздовжній активний опір мережі; L_{nam} – нелінійна індуктивність намагнічування магнітопроводу трансформатора напруги.

Розглядаються заходи щодо захисту ТНКІ 6-10 кВ при дугових замиканнях на землю. Розземлення нейтралей обмотки ВН (після деякої реконструкції) виключало б пошкодження від струмових перевантажень, але при цьому ускладнюється контроль ізоляції мережі і втрачається канал нульовий послідовності, який використовується для цілей телевимірювання і телесигналізації. Крім того, це призвело б до підвищення рівня дугових перенапруг і небезпеки виникнення великих ферорезонансних перенапруг при неповнофазних режимах.

Включення в нейтраль обмотки ВН ТНКІ високоомного опору 20-30 кОм спричинить за собою:

- підвищення потенціалу на нейтралі до неприпустимого для її ізоляції величини;
- підвищення рівня перенапруг мережі;
- збільшення похибок і зниження класу точності ТНКІ.

Установка опорів 2-10 кОм, як показали експерименти і досвід експлуатації, не забезпечує захист ТНКІ від пошкоджень при дугових замиканнях.

Авторами пропонується захід, що полягає у підключенні паралельно ТНКІ допоміжного трансформатора із заземленою через резистор нейтраллю. Це може бути трансформатор власних потреб (ТВП) підстанції з замкнутою в трикутник компенсаційною обмоткою нижчої напруги і виведеної нульовою точкою обмотки ВН. Зважаючи на велику потужність ТВП, низьку індуктивність нульової послідовності і наявність високоомного резистора нейтралі, трансформатор в цілому являє собою активну провідність, яка шунтує ТНКІ за нульовою послідовності. Це дозволяє обмежити струми через обмотку ТНКІ і знизити напругу на нейтралі до безпечної величини.

Роботи представляють собою дослідження перехідних процесів при дугових замиканнях на землю, проведені Дударєвим Л.Є. і Волошек І.В. Схема ділянки мережі розглядається з урахуванням трифазного живлення і при взаємному впливі всіх фаз.

Досліджуються процеси, що виникають при стійкому дуговому замиканні фази на землю з пропусками пробоїв дугового проміжку в одному і більше періодах напруги пошкодженої фази. В цьому випадку згасання і запалювання дуги призводять до періодичної зміни опору фази по відношенню до землі і визначають тривале існування своєрідного автопараметричного ферорезонансного процесу. Підкреслюється, що такі процеси в мережах з відносно невеликим струмом замикання на землю (до 10 А) призводять до пошкодження обмоток трансформатора напруги.

На рис 1.8 приведена розрахункова схема заміщення. При складанні схеми заміщення і моделювання ділянки мережі приймалися такі припущення:

- розподілені параметри представлені зосередженими;
- не враховувалися падіння напруги від струмів навантаження;
- не враховувалися міжфазні і фазні активні провідності.

Математична модель являє собою систему диференціальних рівнянь, складену за методом контурних струмів в режимі замикання і в режимі обриву зв'язку фази з землею. Автори приймають, що замикання фази на землю відбувається в момент, коли напруга на пошкодженій фазі дорівнює максимальному, а обрив фази з землею - в момент проходження струму в місці замикання через нуль.

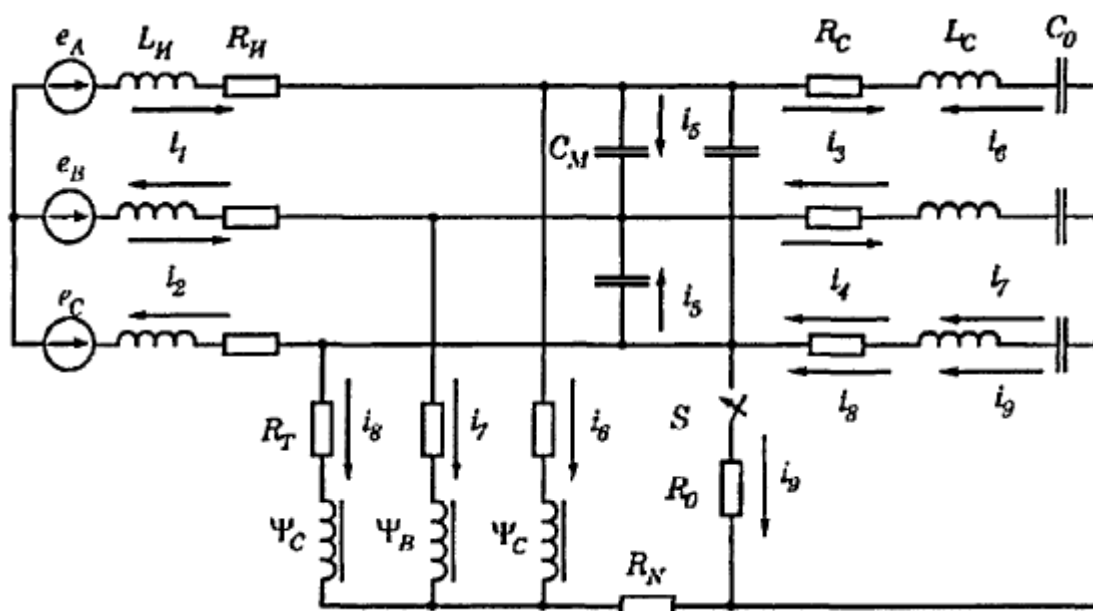


Рисунок 1.8 – Розрахункова схема заміщення мережі при стійкому дуговому замиканні фази на землю

R_C, L_C – активний опір і індуктивність мережі; C_0, C_M – ємність фази мережі відносно землі і міжфазна ємність; R_0 – опір розтікання струму в місці замикання; R_N – активний опір, що включається в нейтраль ТН для захисту від струмових перевантажень; R_H, L_H – активний опір і індуктивність джерела; $R_T, \Psi_A, \Psi_B, \Psi_C$ – активний опір і потокозчеплення обмоток трансформатора напруги.

Для припинення ферорезонансних явищ автори пропонують заходи, засновані на включенні в первинні ланцюги трансформаторів напруги додаткових активних опорів. Вказується, що трансформатори серії ЗНОЛ не мають виведеної нейтралі, тому додаткові опори можна включати тільки в ланцюзі фазних обмоток.

В роботі виділяють два різновиди ферорезонансних явищ при дугових замиканнях на землю:

- стійкі процеси на частоті 25 Г, що виникають після короточасних перенапруг, в тому числі і після обриву зв'язку фази з землею при однофазному замиканні;

- при стійких дугових замиканнях фази на землю з паузами між пробоями 20 мс і більше. В цьому випадку при параметрах мережі, які обумовлюють затухаючі ферорезонансні явища, кожний наступний пробій дугового проміжку відбувається при ще не затухаючому процесі і має місце підживлення. В результаті ферорезонанс стає автопараметричним, а струмові навантаження трансформатора напруги стабільними і мало відрізняються від першого випадку.

Перший різновид ферорезонансних явищ автори називають стійкими процесами, а другу - автопараметричними, стійкість яких залежить від стабільності дугового замикання.

При чисельному аналізі перехідних процесів по залежності $\psi(i)$ для кривої намагнічування трансформатора напруги, на холостому ходу на кожному кроці інтегрування визначаються фазні струми намагнічування, по яким визначаються фазні струми первинної обмотки.

Основним заходом по зниженню стійких ферорезонансних явищ автори вважають включення в ланцюг вторинної обмотки трансформатора напруги, з'єднаної в розімкнутий трикутник, активного опору 25 Ом. Однак, за їхніми ж зауваженням, в ряді випадків цього недостатньо. Існуючі рекомендації про короточасне замикання вторинної обмотки трансформатора напруги на опір 12,5 Ом і менше також не вирішують проблеми. Тому, пропонується включення в ланцюг первинної обмотки додаткового опору, величина якого виявляється меншою в порівнянні з випадком відсутності опору в ланцюзі вторинної обмотки.

Підкреслюється, що струмові перевантаження трансформаторів напруги при автопараметричному ферорезонансному процесі можуть бути обмежені тільки за рахунок активних опорів, що включаються в ланцюзі первинних обмоток або в нейтраль трансформатора напруги, причому значення цього опору може бути значно зменшено за рахунок активного опору в ланцюзі вторинної обмотки.

В роботі зроблена спроба провести аналітичну оцінку можливості виникнення ферорезонансних процесів, що призводять до пошкодження трансформаторів напруги, для мереж, що працюють з ізольованою нейтраллю. По одній зі своїх версій автори вважають, що в ланцюзі виникає ферорезонанс струмів, який і призводить до пошкодження обмоток трансформаторів напруги. За результатами своїх досліджень автори приводять дані про величину фазної ємності мережі, при якій можливе виникнення зазначених процесів. Відзначається, що реальні мережі 6, 10 і 35 кВ, приєднані до шин конкретних підстанцій, в більшості випадків на один - три порядки перевищують наведені величини. Тому, ферорезонансні процеси для реальних мереж в зоні робочої напруги є подією малоймовірною і практично неможливою.

В другому випадку дослідники розглядають перехідні процеси при перемежованих дугових замиканнях на землю з розрядом ємностей мережі на обмотки трансформаторів напруги. При цьому вважається, що процеси не є ферорезонансними, а самостійними нелінійними коливальними процесами зі збільшеним періодом. В даному випадку період коливального процесу розряду ємності через трансформатор напруги має бути в два рази більше, ніж період промислової частоти. По розрахункам авторів дана ситуація можлива при величинах ємнісних струмів, визначених для попереднього випадку.

В третьому випадку розглядаються ферорезонансні процеси при мимовільному зміщенні нейтралі, які розвиваються без замикань на землю (для мереж 35 кВ з струмами замикання на землю до 5 А). Виходячи з аналізу випадків пошкодження трансформаторів напруги типу НТМИ і ЗНОМ-35 автори роблять висновок про те, що не завжди трансформатори напруги є першопричиною

нелінійних коливань мережі, а вся мережа в цілому за певних умов втрачає стабільність, яка проявляється у виді самовільного зміщення нейтралі.

В електричних мережах 6-35 кВ з повітряними лініями електропередачі спостерігалися випадки пошкодження трансформаторів контролю ізоляції мережі при виникненні однофазного замикання на землю, причиною якого були обриви і падіння проводів ліній. В роботі авторами розглядаються умови, при яких можливі подібні ферорезонансні процеси. Індуктивність холостого ходу, що живить мережу трансформатора зашунтувана мережею вищої напруги (35 або 110 кВ) і не може вступити в ферорезонанс з ємністю мережі. Трансформатори напруги малопотужні і тому не можуть вступати в ферорезонанс з великими ємностями розгалуженої мережі. Резонувати з ємностями ліній, рівними 0,5-5 мкФ, у розгалуженої мережі з струмом замикання на землю в декілька ампер можуть тільки силові понижуючі трансформатори 6-10-35/0,4 кВ потужністю 630-1000 кВА. Вони мають три стержневий магнітопровід та ізольовану нейтраль обмотки ВН.

У роботі наведені результати експериментальних досліджень, проведених в змішаній повітряно-кабельної мережі 6 кВ з струмом замикання на землю 4 А.

Як зазначалося вище, виникнення ферорезонансних коливань можливе не тільки в разі стійкого однофазного дугового замикання на землю і в неповнофазних режимах, але також і при різких підвищеннях напруги на слабконавантажених шинах, пов'язаних з самоліквідацією однофазного замикання, або включенням трансформаторів на холості шини і лінії.

Явище самовільного зміщення нейтралі ізольованій мережі 35 кВ при виникненні ферорезонансу, викликаного комутаційними процесами в мережі. Він зазначає появу стійких коливань напруги нейтралі з частотою, рівною потрійний, подвійний і половинній величини робочої частоти. Прилади контролю ізоляції при цьому реєструють замикання фази на землю, які іноді послідовно переходять однієї фази на іншу. Аналіз схеми підстанцій показав, що ферорезонанс виникає при наявності в схемі однофазних трансформаторів напруги контролю ізоляції. Ємність мережі і нелінійна індуктивність трансформатора утворюють паралельний резонансний контур, тому для усунення зміщення нейтралі автор ще в 1945 році

запропонував вносити в нього активний опір для розладу контуру. Опір 200 Ом включався паралельно реле контролю ізоляції, встановленого в розірваний трикутник додаткової вторинної обмотки. Ефективність схеми була підтверджена тривалим досвідом експлуатації (ймовірно, на обмеженій кількості підстанцій, так як у подальшому була виявлена мала ефективність даного заходу в масштабах всієї енергосистеми країни).

Шаргородський В.Л. провів цикл експериментальних, аналітичних та чисельних досліджень ферорезонансних процесів в мережах 35 кВ з ізолюваною нейтраллю. Поштовхом до проведення досліджень стали масові аварії з трансформаторами напруги ЗНОМ-35-54, що відбулися при штучних металевих замиканнях на землю під час випробувань під станційного захисту. Пошкодження спостерігалися в мережах 35 кВ з протяжністю ліній 7, 9, 12 і 25 км при наявності одного ТН на фазу, і в мережах з лініями довжиною 70 км з двома ТН на фазу. Для вивчення явища були проведені експерименти на моделі, що складається з низьковольтних вимірювальних ТН типу УТН-1 і зосереджених ємностей. В результаті експериментальних досліджень з різними величинами ємностей було визначено межі існування процесу, амплітуди і частотні спектри напруг і струмів в фазах і нейтралі. Виникненню процесу передують підвищення напруги в мережі, пов'язане з однофазним замиканням на землю. Процес виникає після зникнення замикання і може існувати як завгодно довго.

Гармонійний аналіз напруг і струмів показує наявність в них складових 25, 50, 75 і 100 Гц. Амплітуди сигналів коливаються з періодом, який змінюється залежно від величини ємності, в межах від 0.26 с при найбільших ємностях мережі, до 1,7 с при мінімально можливих за умовами існування процесу ємностях. Процес швидко затухає при збільшенні активних втрат в ланцюгах нульовий послідовності, що дозволяє визначити шляхи усунення даного явища. Автор вважає, що найбільш раціональним є включення активного опору в ланцюг розімкнутого трикутника додаткової обмотки або в розсічку проводу, що з'єднує нуль первинних обмоток трансформаторів напруги з землею. На фізичній моделі були визначені величини

цих опорів і побудовані номограми для визначення необхідного для гасіння ферорезонансу значення в залежності від довжини лінії.

Автор також зробив спробу аналітичного дослідження явища, яке він класифікував як автоколивальний субгармонійний процес з параметричним самозбудженням і самоіндукцією. В якості еквівалентної була прийнята схема на рис 1.9. Опір R враховує втрати в сталі трансформаторів і опорах, що включаються в розімкнутий трикутник; r – втрати в обмотках трансформаторів і опорах, що включаються в нульовий провід; L_i – повна індуктивність первинної обмотки ТН; C – ємність фази мережі. Аналіз ведеться за припущення, що в струмах і напругах присутні тільки складові основної частоти ω і субгармонік $\omega/2$, а у потокозчеплення, крім того, є постійна складова ψ_0 . Індуктивність ТН є нелінійною і струм пов'язаний з потокозчепленням залежністю $i_L = \alpha\psi + \beta\psi^3$.

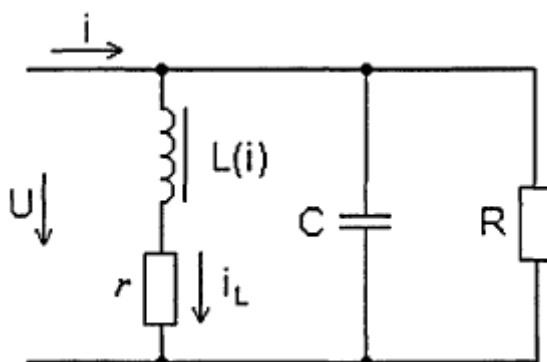


Рисунок 1.9 – Еквівалентна схема заміщення однієї фази мережі з незаземленої нейтраллю

За допомогою даної моделі були отримані аналітичні залежності для значень опорів r і R , при яких неможливе існування стійких ферорезонансних коливань і побудовані криві залежностей величин цих опорів від ємності фаз, які практично збіглися з кривими, отриманими на фізичній моделі. Крім того, було зроблено важливий висновок про те, що для даної мережі характерна максимальна ємність, подальше збільшення якої веде до припинення ферорезонансних процесів.

Автор також одним з перших отримав систему диференціальних рівнянь, що описують перехідний процес в трифазній несиметричній ферорезонансній мережі з ізольованою нейтраллю і провів чисельний розрахунок на ЕОМ для визначення зон найбільших амплітуд напруги нульової послідовності.

Одним з перших найбільш повних описів областей існування ферорезонансних процесів є робота Bergmann С. Автор роботи, виходячи з твердження, що комутаційний процес є лише поштовхом до виникнення коливань, а характер самого процесу визначається структурою і параметрами контуру, запропонував схему заміщення, представлену на рис 1.10. У цій схемі три фазні ємності замінені однією, що включена між нульовим проводом мережі та нульовою точкою ТН. Як виявилось, при симетрії параметрів елементів всіх фаз ланцюга, така заміна ніяк не позначається на характері явищ, що протікають в фазах і контурі нульової послідовності.

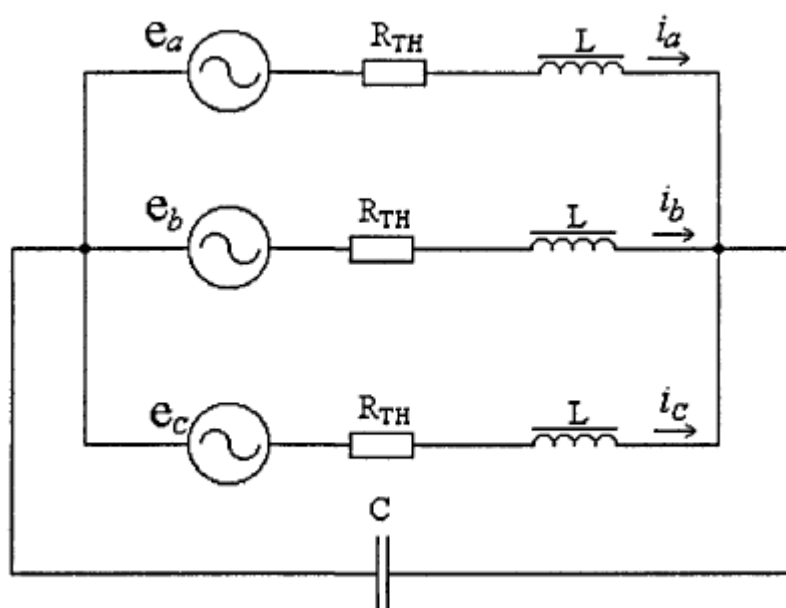


Рисунок 1.10 – Еквівалентна схема заміщення мережі з незаземленою нейтраллю.

Області існування були отримані експериментально на фізичній моделі, складеної за схемою рис 1.10. В якості індуктивностей L застосовувалися котушки

на осерді з практично прямокутною кривою намагнічування, що дозволило отримати області існування різних ферорезонансних режимів з різко вираженими межами. Були виявлені такі характерні ферорезонансні області:

- ферорезонанс на основній частоті мережі;
- субгармонічні коливання на частоті, близькій, але не рівній половині частоти мережі;
- коливання з подвоєною частотою мережі;
- коливання з потроєною частотою мережі;
- нерегулярні неперіодичні коливання (згодом названі хаотичним ферорезонансом).

Крім феноменологічного опису самих областей існування, автором також була зроблена спроба дати фізичне обґрунтування явища на основі аналізу кривих напруг і струмів в фазах і нейтралі мережі.

1.3 Розвиток перенапруг при перемежованому дуговому замиканні на землю в трифазній мережі з ізольованою нейтраллю

Припустимо, що в трифазній мережі виник режим однофазного замикання на землю, як показано на рис. 1.11, в результаті чого відбувся ряд повторних запалювань і загасань дуги, а також накопичився вільний заряд, який після чергового загасання дуги рівномірно розподіляється по ємностях фаз b_ϕ і створює на нейтралі напругу зсуву U_{3C} .

Напруга U_{3C} накладається на фазні е.р.с. джерела e_a, e_b, e_c і створює напруги на фазних ємностях мережі [2]. Напруга, зображена на рис. 1.12, на ушкодженій фазі а відновлюється після гасіння дуги з власною частотою мережі $\omega_0 \gg 1$ з нульового значення до значення $u_a = e_a + U_{3C}$. У ході високочастотного коливального процесу напруга u_a досягає максимального значення – піка гасіння U_{n2} . Величина цього піка обмежена відновленням ізоляції дугового проміжку.

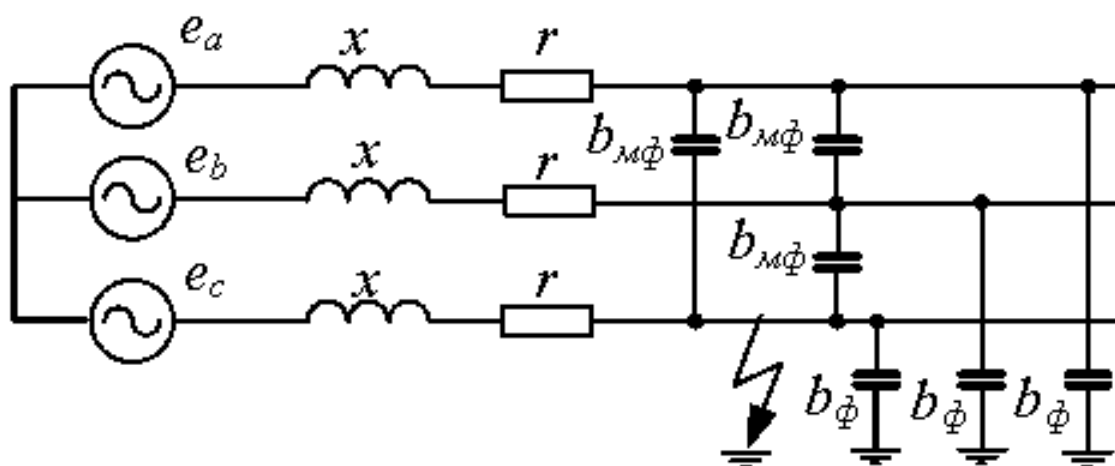


Рисунок 1.11 – Трифазна система з ізольованою нейтраллю
при дуговому замиканні на землю

Найбільша величина $U_{пг}$ виникає, якщо дуга гаситься в момент мінімуму напруги $e_a + U_{3C}$ на фазі, як це показано на рис. 6.2. В цьому випадку $U_{n2} = 2(U_{3C} - U_{\phi})$, звідки:

$$U_{3C} = U_{\phi} + \frac{U_{n2}}{2}.$$

Коливальне відновлення напруги на ураженій фазі а не призводить до негайного повторного запалювання дуги лише в тому випадку, якщо U_{n2} буде менше відновлювальної ізоляції дугового проміжку. Обробка багатьох осцилограм, знятих під час спеціальних дослідів в мережі 6-10 кВ, показала, що максимальна величина $U_{пг}$ обмежена ізоляцією дугового проміжку і становить $0,4U_{\phi}$. Тоді знаходимо, що максимальна величина U_{3C} рівна $1,2U_{\phi}$ (додатного або від'ємного знака).

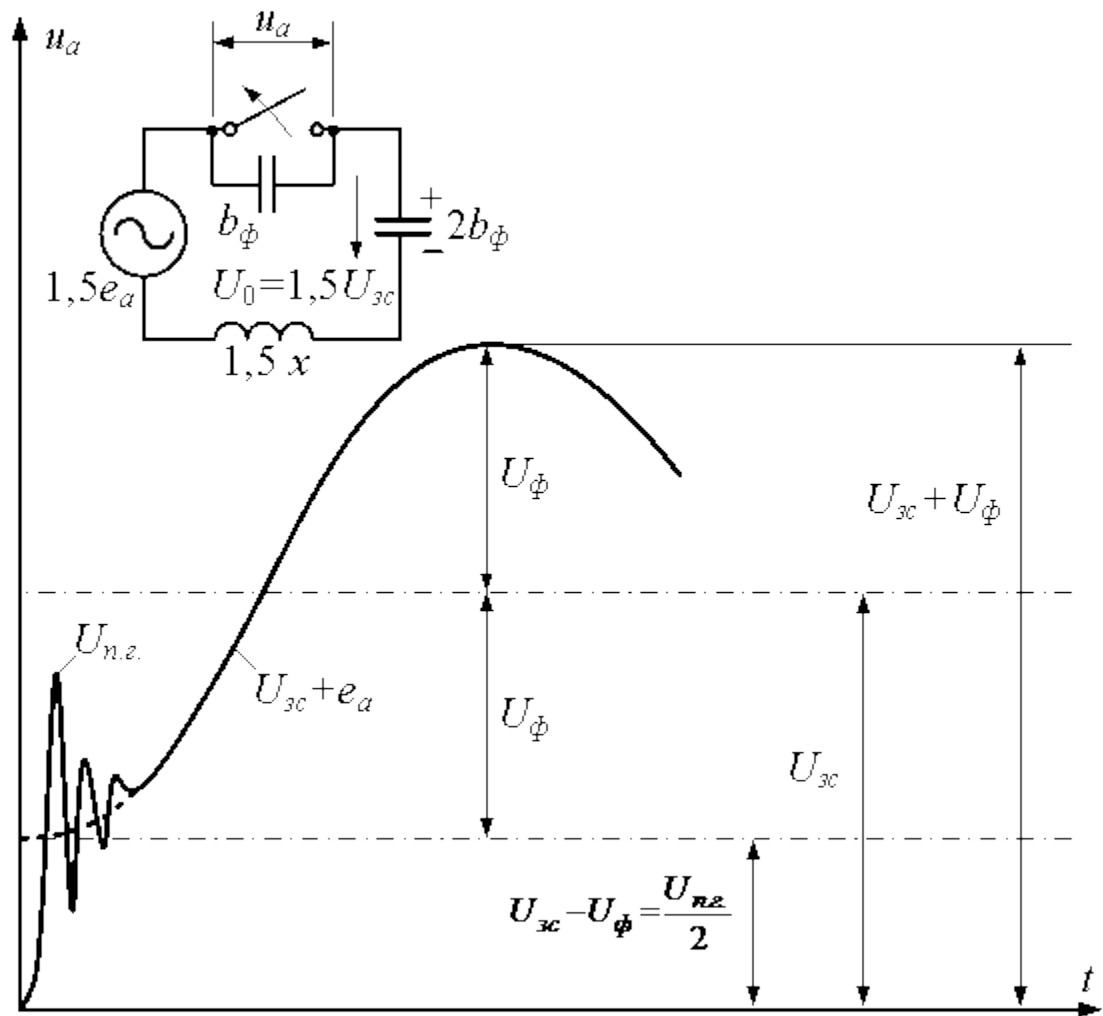


Рисунок 1.12 – Відновлення напруги на ушкодженій фазі при гасінні ємнісної дуги замикання на землю

Визначимо тепер можливі перенапруги в трифазній мережі. Величина перенапруги визначається за формулою:

$$u_{nep} = u_{yct} + (u_{yct} - u_n) \frac{b_\phi}{b_\phi + b_{m\phi}} (1 - d),$$

де $u_{уст}$ і u_n – встановлена і початкова напруги на фазах при повторному запалюванні;

$\frac{b_\phi}{b_\phi + b_{мф}}$ – коефіцієнт, що враховує зменшення амплітуди коливань через

вплив міжфазних ємностей;

d – коефіцієнт загасання високочастотних коливань.

Напруга на будь-якій із здорових фаз до повторного запалювання:

$$u_n = U_\phi \sin(\tau + \psi) + U_{см}.$$

Після повторного запалювання та загасання перехідного процесу напруга на фазі досягає лінійної і дорівнює:

$$u_{уст} = \sqrt{3}U_\phi \sin(\tau + \psi + \frac{\pi}{6}).$$

Момент повторного запалювання повинен бути обраний так, щоб $u_{пер}$ досягала максимального значення. Пояснимо походження коефіцієнта $\frac{b_\phi}{b_\phi + b_{мф}}$. Після запалювання дуги ємність b_ϕ ушкодженої фази є закороченою, а ємності здорових фаз b_ϕ з'єднуються паралельно з міжфазними ємностями $b_{мф}$, зображеного на рис. 1.13

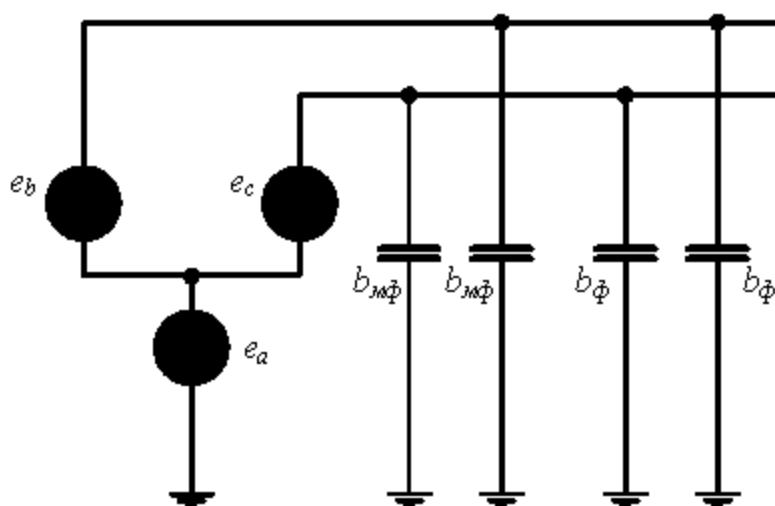


Рисунок 1.13 – Перетворення схеми, що ілюструє зниження $u_{пер}$

При таких з'єднаннях відбувається перерозподіл вільного заряду між ємностями і зниження напруги вільних коливань $u_v = u_{уст} + u_n$ відповідно до коефіцієнта $\frac{b_\phi}{b_\phi + b_{мф}}$. Значення коефіцієнта для ліній ≤ 35 кВ становить в середньому 0,75.

Коефіцієнт загасання (1-d) можна прийняти рівним 0,9.

На рис. 1.14 наведено криві напруг на одній із здорових фаз при величині $U_{зс} = -1,2U_\phi$. Максимальна перенапруга на здоровій фазі виникає при повторному запалюванні поблизу максимуму напруги $u_{уст}$; досить близьке значення ми одержимо, якщо для спрощення розрахунку приймемо, що повторне запалювання відбувається точно в момент максимуму $u_{уст}$. Тоді:

$$u_{уст} = \sqrt{3}U_\phi \sin \frac{\pi}{2} = \sqrt{3}U_\phi;$$

$$u_n = U_\phi \sin \frac{2\pi}{3} + U_{зс} = U_\phi \frac{\sqrt{3}}{2} - 1,2U_\phi = -0,34U_\phi.$$

Прийmemo:

$$\frac{b_{\phi}}{b_{\phi} + b_{m\phi}} = 0,75$$

$$I (1-d) = 0,9.$$

Тоді:

$$U_{пер} = 1,73 + (1,73 + 0,34)0,75 \cdot 0,9 = 3,13U_{\phi}.$$

Максимальні перенапруги виявляються порядку:

$$(3,0 \div 3,2)U_{\phi}.$$

Численні вимірювання, виконані за останні роки, показали, що вказані значення дійсно є граничними для перенапруг дугових замикань на землю. Досліди ставилися при горінні дуги як у повітрі, так і в маслі. Для виникнення максимальної перенапруги достатньо одного циклу «гасіння-запалювання». Причиною збільшення перенапруг до кінця горіння дуги є поступове зростання напруг запалювання внаслідок розтягування дуги. З ростом ємнісного струму дуга стає більш стійкою, що веде до зниження імовірності виникнення високих перенапруг.

Короткочасні перенапруги порядку $3U_{\phi}$ безпечні для нормальної ізоляції на робочих напругах до 35 кВ включно. Але досить тривалі перенапруги можуть призвести до перекриття забрудненої ізоляції.

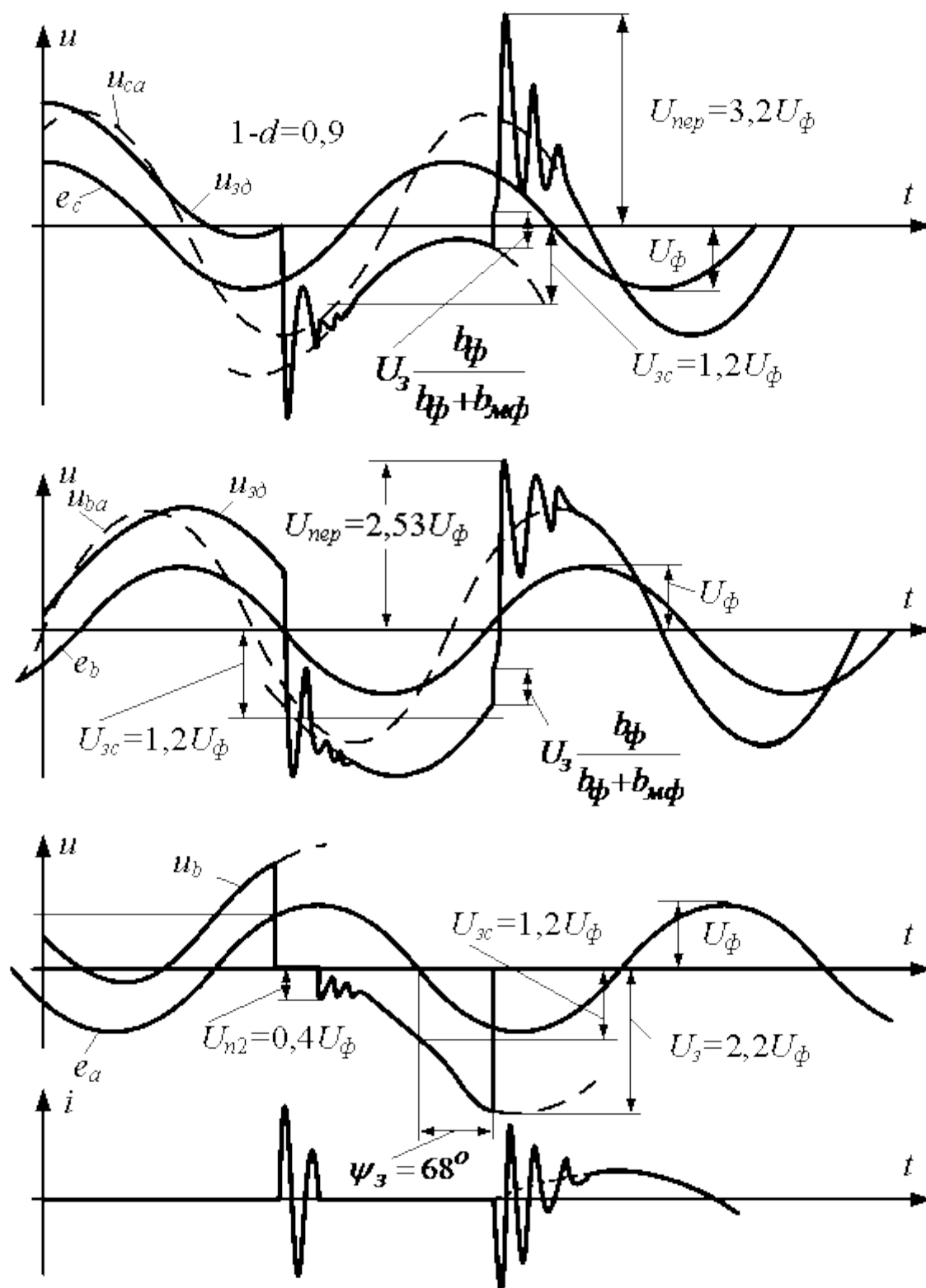


Рисунок 1.14 – Осцилограми розвитку перенапруг в трифазній мережі з ізольованою нейтраллю

1.4 Перенапруги при перемежованому дуговому замиканні на землю і обриві проводу

Істотне підвищення перенапруг відбувається при дуговому замиканні на землю, що супроводжується обривом фазного проводу, зображено на рис. 1.15, а. Такий обрив може бути наслідком теплової дії заземлювальної дуги. Причину зростання кратності перенапруг легко визначити з еквівалентної схеми на рис. 1.15, б.

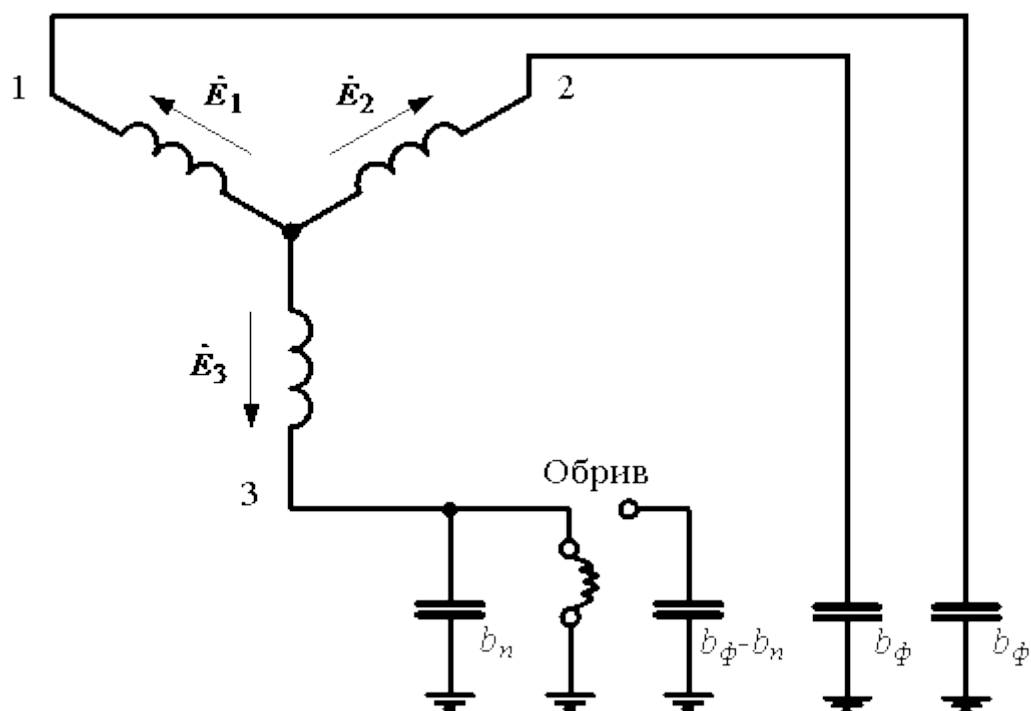
Внаслідок обриву проводу ємність пошкодженої фази $b_n < b_\phi$. Міжфазна напруга $E_e = 1,5U_\phi$ створює на проводах потенціали (напруги відносно землі), рівні $E_e \frac{b_e}{b_e + b_n}$ на пошкодженій фазі та $E_e \frac{b_e}{b_e + b_n}$ на здоровій фазі. Напруга зміщення нейтралі при згасанні дуги буде дорівнювати:

$$U_{зм} = E_e \frac{b_e}{b_e + b_n} + \frac{U_{nz}}{2}.$$

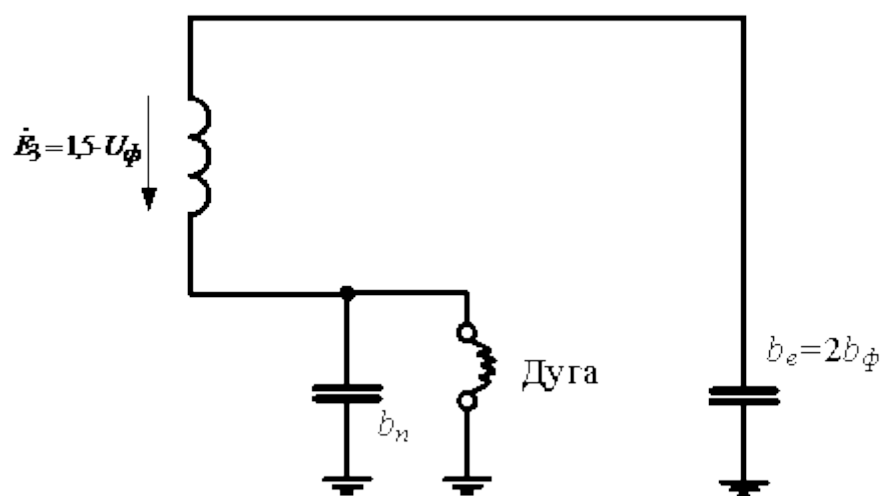
При $b_n = 0$ (втрата всієї ємності фази:

$$U_{зм} = 1,5U_\phi + \frac{U_{nz}}{2}.$$

На рис. 1.16 побудовані в залежності максимальних перенапруг від відношення b_n/b_ϕ . Криві розраховані для трифазної мережі за умови $U_{nz} = 0,4U_\phi$. Як видно з кривих, при малому b_n/b_ϕ , тобто при від'єднанні більшої частини ємності ушкодженої фази, можливі небезпечні для ізоляції перенапруги.



а)



б)

Рисунок 1.15 – Замикання на землю з обривом частини ємності пошкодженої фази: а – трифазна схема; б – розрахункова однофазна схема

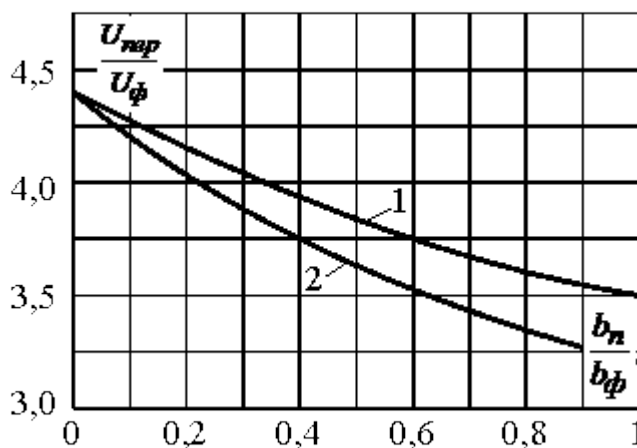


Рисунок 1.16 – Залежності перенапруг від відношення b_n/b_ϕ : 1 – за відсутності міжфазної ємності $b_{\text{мф}}=0$; 2 – за міжфазної ємності $b_{\text{мф}}=1/3 b_\phi$

1.5 Перенапруги при перемежованому дуговому замиканні на землю в мережі з дугогасною котушкою

Дугогасильна котушка гасить дугу однофазного замикання на землю і тим самим усуває причину розвитку перенапруг. Однак у тих випадках, коли замикання на землю супроводжується різким зниженням рівня ізоляції, наприклад, у випадках пробоем або руйнування ізоляторів, падіння проводів на землю і т.д., дуга замикання на землю не гасне й може отримати нестійкий, перемежований характер з повторними гасіннями і запалюваннями. В цих випадках на ємностях мережі при черговому гасінні дуги можуть зберегтися залишкові заряди, що піднімають потенціал нейтралі до U_{3C} . Як і у випадку з ізольованою нейтраллю, перехід напруги на ушкодженій фазі від нульового значення до $U_{3C} + U_\phi$ відбувається шляхом коливання з високою частотою $\omega\theta \gg 1$ зображена на рис. 1.17.

Одночасно в контурі розвиваються коливання з низькою частотою:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{3b_\phi x_\kappa}},$$

де x_κ – індуктивний опір дугогасильної котушки.

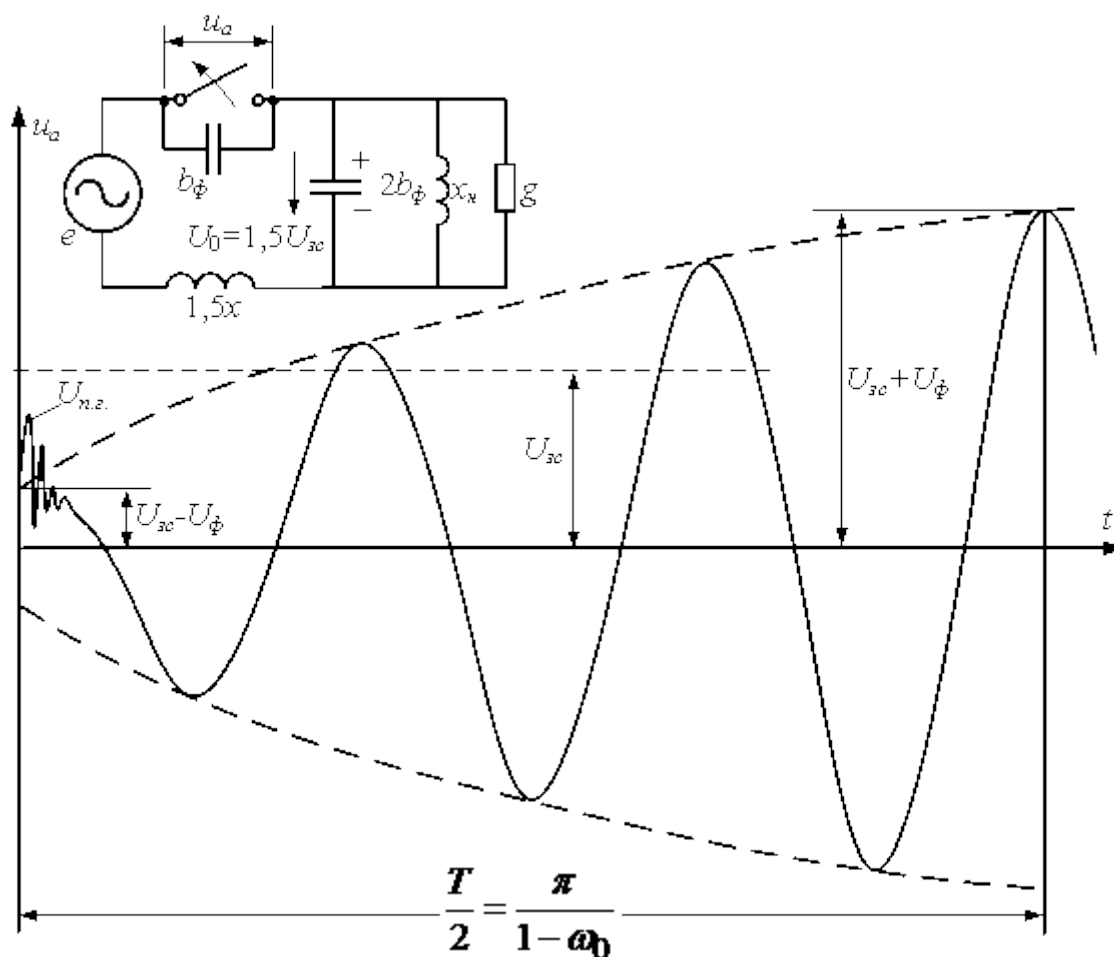


Рисунок 1.17 – Відновлення напруги на ушкодженій фазі при гасінні дуги в мережі з дугогасильною котушкою

Частота ω_0 близька до 1, що приводить до виникнення биття із частотою $(1 - \omega_0)$, як це показано на рис 1.17.

Через півперіод биття $\frac{T}{2} = \frac{\pi}{1 - \omega_0}$ напруга на ушкодженій фазі стає рівною

$U_{3c} + U_\phi \cdot e^{-\delta \frac{T}{2}}$ аналогічно тому, як це мало місце і у випадку ізольованої нейтралі.

Якщо в цей (або близький до нього) момент відбудеться запалювання дуги на ушкодженій фазі, то перенапруги на здоровій фазі в результаті коливань, як і раніше де:

$$u_n = U_\phi \sin(\tau + \psi) + U_{3C} \cdot e^{-\delta \frac{T}{2}}$$

З цього співвідношення видно, що можливі перенапруги тим нижчі, чим більше $\delta \frac{T}{2}$ – тобто, при заданому δ більше період биття T , або дугогасна котушка менш налагоджена $\nu = 1 - \omega_0^2$.

Отже, покращення налагодження котушки призводить до зниження можливої кратності дугових перенапруг. З іншого боку, при великих розладах котушки можливі перенапруги, що не відрізняються за амплітудою від тих, які розвиваються при ізольованій нейтралі. У деякому відношенні котушка навіть може сприяти розвитку перенапруг. Внаслідок зростання відрізка часу від моменту згасання дуги до максимуму напруги на дузі зростає також інтервал часу деіонізації дуги і повторне замикання дуги стає вірогіднішим в найбільш несприятливий момент часу, відповідний максимуму $u_{пер}$.

Висновки до розділу 1

Ферорезонансні процеси виникають в електромережі з ізольованою нейтраллю та призводять до пошкоджень, насамперед, вимірювальних електромагнітних трансформаторів напруги та обмежувачів перенапруг нелінійних. Численні вимірювання перенапруг при перемежованому дуговому замиканні, виконані за останні роки, показали, що вказані значення $(3,0 \div 3,2)U_\phi$ дійсно є граничними для перенапруг дугових замикань на землю, але тривала дія перенапруги призводить до пошкодження обладнання. Для виникнення максимальної перенапруги достатньо одного циклу «гасіння-запалювання». Причиною збільшення перенапруг до кінця горіння дуги є поступове зростання напруг запалювання внаслідок розтягування дуги.

2 ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ СЕРЕДНЬОГО КЛАСУ НАПРУГИ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

Розподільні мережі 6–35 кВ є найпротяжнішими з найбільш важким режимом роботи електроустаткування щодо дії внутрішніх перенапруг. Найпоширенішими причинами аварійних пошкоджень в цих електромережах є дугові та комутаційні перенапруги, а також ферорезонансні процеси. Дугові замикання на землю є небезпечними не лише за своєю величиною, а й тривалістю, внаслідок чого може пошкоджуватись ізоляція електроустаткування, пошкодження можуть переходити у дво- та трифазні короткі замикання [3]. Комутаційні процеси в електромережах характеризуються, передусім, небезпечними величинами перенапруг. Особливо небезпечними є перенапруги, які розвиваються під час комутацій електродвигунів, які зараховують до електроустаткування з полегшеною ізоляцією.

Що ж стосується ферорезонансних перенапруг, то основну небезпеку вони становлять не своєю величиною, а тривалістю ферорезонансного процесу та насиченням магнітної системи вимірювальних трансформаторів напруги. Внаслідок цього значно зростають струми у первинних обмотках трансформаторів напруги, що призводить до їх пошкоджень. Ферорезонансний процес триває доти, доки не розлаштується ферорезонансний контур. Цей процес може тривати декілька хвилин і більше. Протягом цього часу постійно спрацьовуватимуть обмежувачі перенапруг нелінійні та може відбуватись їх термічне пошкодження.

Одним зі способів зменшення рівнів внутрішніх перенапруг в електромережах є зміна режиму заземлення нейтралі.

Електричні мережі 6–35 кВ можуть працювати в режимі з ізолюваною, резистивно- та резонансно-заземленою нейтраллю. Водночас, в науковому середовищі немає однозначної думки щодо застосування того чи іншого способу заземлення нейтралі. Це пов'язано з тим, що застосування електромереж з ізолюваною та резонансно-заземленою нейтраллю має як переваги, так і значні

недоліки, а досвід застосування резистивного заземлення нейтралі в електромережах України практично відсутній.

У даному розділі описуються насупні елементи електричної мережі, які були змодельовані у середовищі MATLAB: електрична мережа середнього класу напруги, електромагнітний трансформатор напруги, чотири режими роботи нейтралі (ізолювана, резонансно-заземлена, резистивно-заземленої нейтраль, а також комбіноване заземлення нейтралі) та модель дугового замикання на землю.

2.1 Модель електромережі середнього класу напруги

Кожна елементарна ділянка електричної мережі як завгодно малої довжини має поздовжні і поперечні опори. Поперечні опори визначають струми витoku, що з'являються внаслідок недосконалості ізоляції між проводами. Поздовжні опори утворені активними складовими проводів і індуктивностями двох протиборчих одна одній ділянок лінії.

Отже, електрична мережа або її частина може бути представлена у вигляді сукупності елементарних ділянок, що складаються з послідовно включених активного і індуктивного опорів і паралельно включених активної провідності і ємності. При цьому струм, що входить в кожную з цих елементарних ділянок, що не дорівнює струму, який виходить з нього.

Процеси в лініях електропередачі в загальному випадку досліджують на підставі теорії електричних ланцюгів з розподіленими параметрами. Однак відносно невелика протяжність мереж напругою до 35 кВ в порівнянні з довжиною хвилі дозволяє вважати струм в кожен момент часу в будь-якій точці лінії однаковим. Тому можна розглядати такі лінії з зосередженими, а не розподіленими параметрами.

Активний опір повітряної лінії обумовлено нагріванням проводів внаслідок протікання електричного струму. Для сталевих алюмінієвих проводів, які є основними для повітряних ЛЕП, активний опір визначається головним чином алюмінієвої

частиною. Активний опір залежить від матеріалу провідника, його довжини і перетину:

$$R = \rho \frac{l}{F},$$

де ρ – питомий опір провідника, Ом · мм² / км;

l – довжина лінії, км;

F – перетин, мм².

Зазвичай в довідкових матеріалах наводиться питомий опір лінії для стандартних перетинів R_0 , Ом / км, тоді еквівалентний опір визначається як:

$$R_e = \frac{R_0 l}{n},$$

де n – число паралельних ліній електропередачі.

Погонний індуктивний опір фази одноланцюгової транспонованої лінії з проводами із кольорових металів (мідь, алюміній, сталеалюміній) розраховується з урахуванням взаємодії фаз по співвідношенню:

$$x'_0 = 0.144 \lg \frac{D_{cp}}{r_e} + \frac{0.016}{n} \cdot \mu,$$

де D_{cp} – середньгеометрична відстань між проводами різних фаз;

r_e – еквівалентний радіус фази;

n – кількість проводів у фазі;

μ – магнітна проникність (для кольорового металу $\mu=1$)

При розщепленні фази на декілька проводів еквівалентний радіус розщепленої фази дорівнює:

$$r_e = \sqrt{r \cdot a} = \sqrt{\frac{d}{2} \cdot a},$$

де a – крок розщеплення.

Індуктивний реактивний опір:

$$X'_l = x'_0 \cdot l.$$

Активна провідність. Для зниження або усунення напруженості електричного поля крім розщеплення проводів обмежується мінімально допустимий переріз проводу. Проте, при деяких несприятливих атмосферних умовах корона може виникати. Зазвичай у довідковій літературі приводяться дані по максимальним і мінімальним питомим (на 1 км довжини ПЛ) втратам активної потужності (ΔP_{k0}) на корону. З цієї величини визначається погонна поперечна активна провідність фази ПЛ:

$$g_0 = \frac{\Delta P_{k0} 10^{-3}}{U_n^2},$$

де ΔP_{k0} – втрати активної потужності на корону;

U_n – номінальна напруга мережі.

Активна поперечна провідність лінії:

$$G_l = g_0 \cdot l,$$

Ємнісна провідність лінії визначається струмами зміщення за рахунок електростатичного поля лінії (між фазами і по відношенню до землі). Ця провідність

створює так званий зарядний, або ємнісний струм, вектор якого випереджає на 90° вектор напруги лінії.

Ємнісна погонна провідність визначається за формулою:

$$b'_0 = \frac{7.58}{\lg \frac{D_{cp}}{r_e}} 10^{-6}.$$

Величина ємнісної поперечної провідності лінії з розщепленими фазами :

$$B'_l = b'_0 \cdot l.$$

При розрахунку режиму роботи електричної мережі повітряна трифазна лінія змінного струму напругою до 500 кВ і завдовжки до 300 км може бути представлена схемою заміщення з зосередженими параметрами П-подібного виду на рис. 2.1.

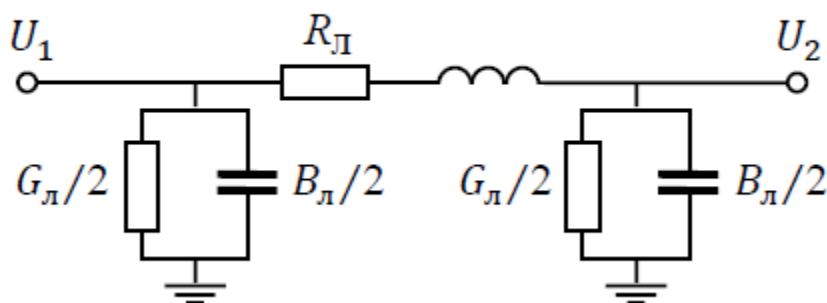


Рисунок 2.1 – П-подібна схема заміщення повітряної ЛЕП

Мережі 6-10 кВ переважно кабельні. Кабельні лінії електропередачі характеризуються малою погонною індуктивністю. Крім того, зазвичай довжини кабельних ліній 6-10 кВ досить невеликі. Все це призводить до того, що позовжніми індуктивностями КЛ при дослідженні повільних процесів можна знехтувати. Ємності КЛ, власні і взаємні, навпаки, дуже великі і, в основному,

визначають всю ємність мережі (можна знехтувати ємностями іншого обладнання, за винятком спеціальних ємнісних пристроїв).

Таким чином, при дослідженні дугових замикань на землю в мережах 6-10 кВ можна знехтувати індуктивностями КЛ, і представити всю мережу у вигляді зосереджених ємностей між фазами і між фазами і землею. Всі трансформатори напруги, якщо їх декілька, виявляються з'єднаними паралельно. Всі джерела напруги (живлячі силові трансформатори) також можуть бути об'єднані в одне джерело. Навантаження мережі також можна знехтувати, так як в мережі з ізолюваною нейтраллю ферорезонанс існує в контурі нульової послідовності, на який навантаження не впливає.

У мережах 35 кВ повітряних ліній електропередачі значно більше, ніж в мережах менших класів напруги. Повітряні лінії володіють великою погонною індуктивністю. Проте при дослідженні процесів в цих мережах також зазвичай нехтують індуктивностями ліній.

Схема заміщення мережі 6-35 кВ, яка використовується для дослідження процесів дугового замикання на землю при різних режимах роботи нейтралі наведена на рис. 2.2.

При моделюванні мережі в середовищі MATLAB міжфазними ємностями та поперечними активними опорами можна знехтувати, оскільки дані параметри мають незначний вплив на результати досліджень режимів роботи нейтралі та дугових замикань.

На рис.2.3 зображена цифрова модель мережі середнього класу напруги розроблена в програмному середовищі MATLAB.

Систему живлення моделюємо симетричною трифазною зіркою фазних ЕРС E_a , E_b , E_c (з ізолюваною нейтраллю) з відповідними індуктивностями, фазними ємностями та активними опорами лінії $L_a = L_b = L_c = L$; $C_{фа} = C_{фb} = C_{фc} = C$; $R_a = R_b = R_c = R$ [4].

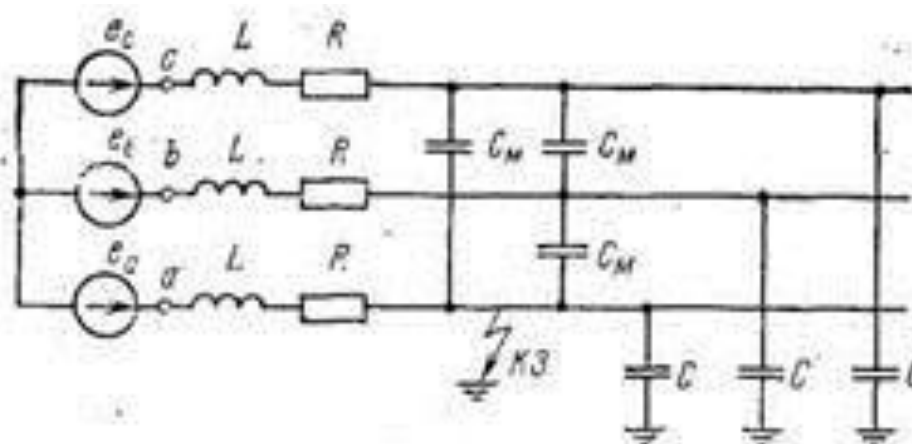


Рисунок 2.2 – Схема заміщення мережі 6-35 кВ

Миттєві значення ЕРС мереж 6-35 кВ визначаємо як:

$$e_k = U_m \sin(2\pi f t + \varphi_k),$$

де U_m – номінальне амплітудне значення робочої фазної напруги мережі з номінальною міжфазною робочою напругою $U_{ном} = (6, 10, 35) \cdot 1000$;

$k = A, B, C$ – найменування фаз мережі;

$f = 50$ – номінальна робоча частота джерела живлення мережі;

t – час;

φ_k – фаза напруги, де $\varphi_A = 0$; $\varphi_B = -2\pi/3$; $\varphi_C = 2\pi/3$.

Значення амплітуди фазної напруги мережі розраховують як:

$$U_{mj} = \frac{\sqrt{2}U_{номj}}{\sqrt{3}},$$

де $U_{номj}$ - номінальна напруга мережі (6,10,35 кВ).

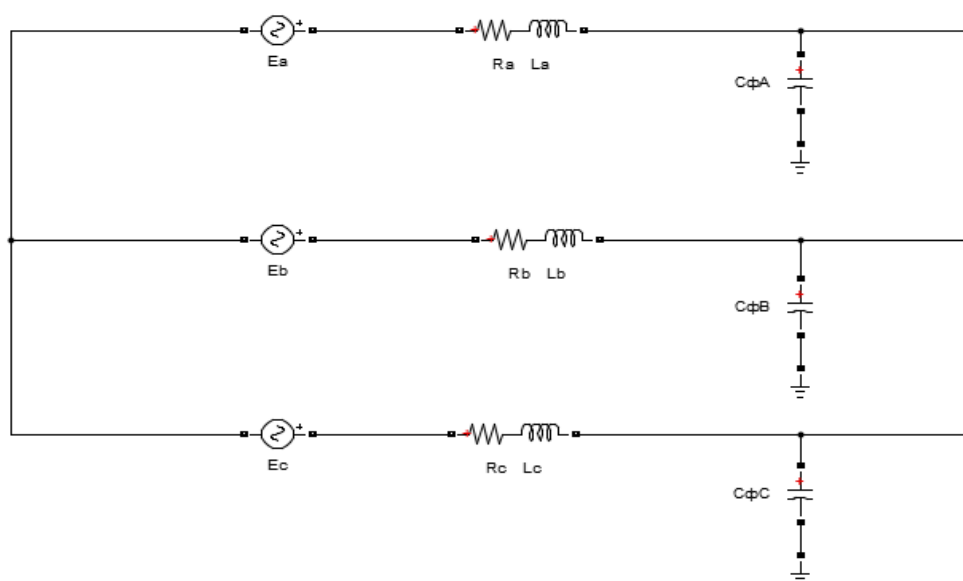


Рисунок 2.3 – Цифрова модель мережі 6-35 кВ в ПЗ MATLAB

2.2 Модель електромагнітного трансформатора напруги

В даній дисертації була розроблена математична та імітаційна моделі електромагнітного трансформатора напруги в середовищі MATLAB для моделювання ферорезонансних процесів у мережі середнього класу напруги з ізольованим режимом роботи нейтралі.

Складність проведення експериментального вивчення ферорезонансних процесів (ФРП) та пов'язана із цим небезпека пошкодження обладнання підстанції сприяли становленню математичного моделювання основним способом вивчення цих. Найбільш складною частиною математичної моделі для дослідження ФРП є модель нелінійного електромагнітного трансформатора напруги (ТН). Проблемі дослідження ферорезонансних процесів присвячена велика кількість робіт, як вітчизняних так і закордонних авторів, однак є підстави вважати що проблема вирішена не остаточно. Всі автори при формуванні математичної моделі електромагнітного ТН здійснюють значні спрощення: магнітну систему враховують лише за основною кривою намагнічування, використовуючи кусочно-лінійну апроксимацію тощо [5,6]. Враховуючи велику чутливість розвитку ферорезонансного процесу до початкових умов та точності опису параметрів схеми

заміщення реальних елементів будь-які спрощення розрахункової схеми призводитимуть до похибок при моделюванні.

Схема заміщення електромагнітного трансформатора напруги.

Трансформатори типу ЗНОМ широко використовуються в мережах середніх класів напруг 6-35 кВ з ізольованим режимом роботи нейтралі. Характерною особливістю трансформаторів даного типу є однофазне виконання.

Кожна фаза представляє собою окремий трансформатор із нерозгалуженим магнітопроводом, зображена на рис.2.4. Тому магнітний потік через усі котушки одного каскаду будемо вважати однаковим.

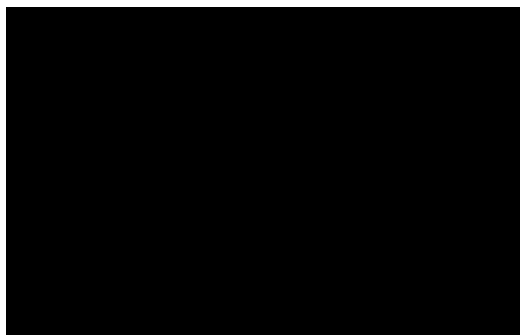


Рисунок 2.4 – Магнітна система каскаду ТН

Електрична схема заміщення каскаду ТН представлена на рис. 2. Активні опори та індуктивності розсіювань представлені елементами R_1, R_2, L_1, L_2 . n_1, n_2 – кількості витків відповідно первинної та вторинної обмоток.

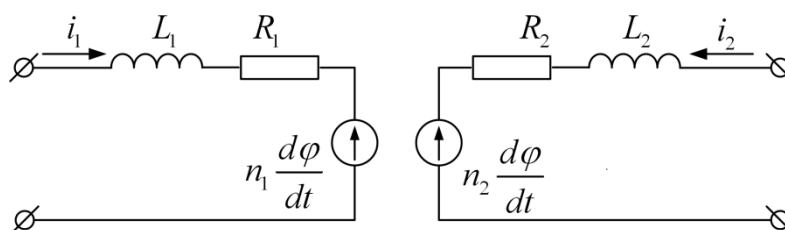


Рисунок 2.5 – Електрична схема заміщення трансформатора

Напруженість магнітного поля, викликана струмами у обмотках трансформатора визначається за співвідношенням:

$$H = \frac{i_1 n_1 + i_2 n_2}{l_{cp}},$$

де l_{cp} – середня довжина магнітної силової лінії.

Магнітний потік розраховується за формулою:

$$\varphi = B(H) \cdot S$$

де S – переріз магнітопроводу ТН.

Функції апроксимації кривих намагнічування.

Для моделювання нелінійних індуктивних елементів застосовують, як правило, основну криву намагнічування, що представляє собою геометричне місце вершин гістерезисних циклів, які отримують при циклічному перемагнічуванні осердя. Вона може бути представлена у вигляді залежностей потокозчеплення від струму намагнічування обмотки $\Psi = f(i)$ або магнітної індукції від напруженості магнітного поля $B = f(H)$. Також можуть використовуватися обернені функціональні залежності. У роботі [7] автором пропонується до використання низка способів апроксимації кривих намагнічування. Розглянемо їх детальніше.

Кусочно-лінійна апроксимація передбачає заміну реальної кривої ламаною з кількома точками злому. Кількість лінійних ділянок залежить від необхідної точності відображення кривої намагнічування та діапазону її зміни. Основною перевагою використання кусочно-лінійної апроксимації є можливість переходу до розв'язку лінійної задачі. А основним недоліком даного наближення є стрибкоподібна зміна похідної при переході від однієї ділянки до іншої, що може призвести до недопустимих неточностей під час використання числових методів. Тому при дослідженні ферорезонансних схем використання даної функції апроксимації є обмеженим.

Гіперболічна апроксимація основної кривої намагнічування має наближення до реальної кривої лише у областях сильних полів, тому, при дослідженні

ферорезонансних схем, використання даної апроксимації є недопустимим.

Логарифмічна та експоненціальна апроксимації обмежені задачами розрахунку магнітних кіл із постійними полями, тому при дослідженні ферорезонансних схем використання даної функції апроксимації є недопустимим.

Широке застосування має використання степеневих функцій, так як вони дозволяють виконувати розрахунки магнітних кіл зі змінними магнітними полями. Точність апроксимації реальної кривої степеневим поліномом пропорційна кількості членів поліному. Однак збільшення кількості членів поліному призводить до ускладнення визначення коефіцієнтів поліному.

Функції гіперболічних синуса та тангенса при розкладанні в ряд перетворюються у степеневі поліноми. Апроксимації гіперболічними синусом та тангенсом близькі до апроксимації степеневим поліномом та дають гарну збіжність із даними натурних експериментів.

Метод сплайнів є доволі ефективним за умови пред'явлення жорстких вимог до точності апроксимації кривої намагнічування. За рахунок застосування різних апроксимуючих функцій, на окремих ділянках кривої намагнічування, досягається неперервність не тільки самої сплайн-функції, але і її похідної. Обмеженням використання методу сплайнів є громіздкість розрахунків.

Високої точності апроксимації кривої намагнічування вдається досягнути використанням раціональних функцій. Однак для визначення коефіцієнтів апроксимації необхідно використовувати велику кількість експериментальних точок $(2n+1)$, що не завжди можливо через обмеженість вихідних даних.

Широкого розповсюдження набуло застосування арктангенсних функцій при апроксимації кривих намагнічування нелінійних індуктивних елементів. Оскільки має просте обчислення як самої функції так і її похідної. У даній моделі була застосована арктангенсна функція апроксимації з трьома коефіцієнтами та лінійним членом [5]:

$$B = \alpha \cdot \arctg(\beta H) + \gamma H$$

де α , β , γ – коефіцієнти апроксимації.

Моделювання магнітного гістерезису.

При моделюванні ферорезонансних процесів за основною кривою намагнічування явище гістерезису пропонується враховувати введенням до розрахункової моделі активної поперечної провідності. Однак таке врахування явища гістерезису накладає певні неточності, що у поєднанні із чутливістю ферорезонансних процесів може призвести до хибних результатів моделювання. Тому при моделюванні ферорезонансних процесів слід використовувати моделі гістерезису. У більшості комп'ютерних стимуляторів явище гістерезису описують за моделями Дж.Чана [8] та Джилса-Атертона [9]. Модель Дж.Чана є простішою, однак вона не дозволяє достатньо точно відтворити основну криву намагнічування, що є дуже важливим при моделюванні ферорезонансних процесів. Основою моделі Джилса-Атертона є безгістерезисна крива, яка представляє собою залежність безгістерезисної намагніченості від напруженості магнітного поля. Модель Джилса-Атертона дозволяє максимально точно відобразити основну криву намагнічування, тому при моделюванні ферорезонансних процесів доцільно використовувати саме її.

Зв'язок між магнітною індукцією, напруженістю магнітного поля та намагніченістю описується співвідношенням:

$$B = \mu_0(M + H).$$

Виразивши із даної рівності намагніченість та підставивши магнітну індукцію отримаємо залежність безгістерезисної намагніченості від напруженості магнітного поля:

$$M_{an}(H) = \frac{1}{\mu_0} B_{an}(H) - H = \frac{\alpha}{\mu_0} \cdot \arctg(\beta H) + H \left(\frac{\gamma}{\mu_0} - 1 \right).$$

Похідна безгістерезисної намагніченості від напруженості магнітного поля

має доволі простий математичний запис:

$$\frac{dM_{an}}{dH} = \frac{1}{\mu_0} \left(\gamma + \frac{\alpha \cdot \beta}{1 + (\beta \cdot H)^2} \right) - 1.$$

Опис гістерезисних процесів у феромагнетику ґрунтується на теорії руху доменних стінок у змінному магнітному полі. Ефект відставання внутрішнього поля при перемагнічуванні подібний до ефекту сухого тертя між доменними стінками. Реальні процеси перемагнічування феромагнітних матеріалів супроводжуються пружним вигином доменних границь. Тому гістерезисна модель має враховувати ефект в'язкого тертя, що досягається урахуванням добавки пропорційної до похідної безгістерезисної намагніченості від напруженості магнітного поля. У результаті отримуємо рівняння:

$$\frac{dM}{dH} = \frac{M_{an} - M}{K} \cdot \delta + \frac{C}{1 + C} \cdot \frac{dM_{an}}{dH}$$

де K – величина коерцитивної сили петлі гістерезису; δ – коефіцієнт що враховує напрям перемагнічування.

Однією із основних характерних рис ферорезонансних процесів є значне спотворення форми кривих струму на напруги, що у свою чергу призводить до виникнення вищих гармонік. Іншою особливістю ферорезонансних схем є можливість виникнення усталених коливань на частотах відмінних від частоти мережі, перш за все на третій субгармоніці.

Модель Джилса-Атертона при змінних значення швидкості намагнічування, що має місце при ферорезонансі, має значні розбіжності з експериментальними результатами. Основним параметром, що характеризує динамічні властивості (насамперед втрати) феромагнітних матеріалів є залежність коерцитивної сили від швидкості перемагнічування. У роботі [10] автори пропонують апроксимувати згадану залежність лінійною функцією виду:

$$H_C = H_{C0} + K_{hcf} \cdot \left| \frac{dH}{dt} \right|,$$

де H_{C0} , K_{hcf} – коефіцієнти лінійної регресії.

Підставивши значення розрахованої коерцитивної сили у рівняння попереднє отримаємо повне рівняння переманіччування феромагнітного осердя ТН:

$$\frac{dM}{dH} = \frac{M_{an} - M}{H_{C0} + K_{hcf} \cdot \left| \frac{dH}{dt} \right|} \cdot \delta + \frac{C}{1 + C} \cdot \frac{dM_{an}}{dH}.$$

Отримані рівняння представляють собою кінцеву модель [11] для опису магнітної системи кожного окремого каскаду електромагнітного трансформатору напруги. Розроблена модель була реалізована в середовищі Matlab. Отримана для однофазного трансформатора ЗНОМ-35-65 гістерезисна крива представлена на рис. 2.6.

Результати чисельного моделювання із використанням розробленої моделі ТН показали, що відображення явища гістерезису на розробленій моделі має значний вплив на виникнення та перебіг ферорезонансних процесів на субгармоніках, та на границі областей існування ферорезонансних процесів.

Отже, розроблено модель трансформатора напруги яка враховує явище гістерезису.

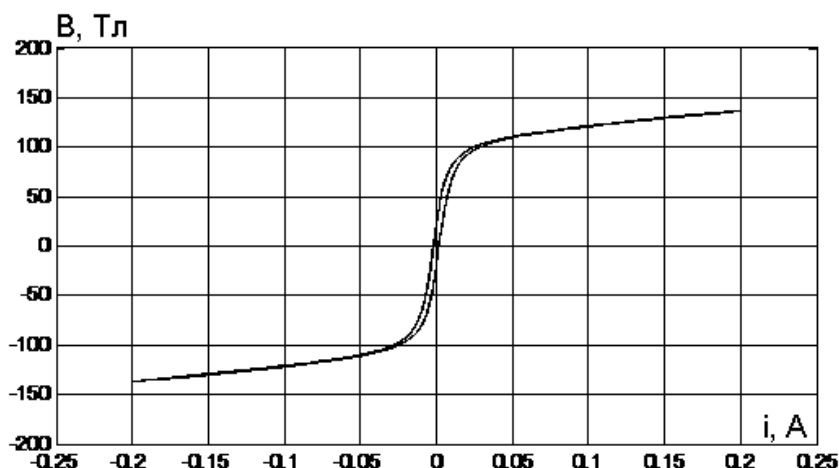


Рисунок 2.6 – Крива гістерезису для однофазного трансформатора ЗНОМ-35-65

Враховано вплив швидкості перемagnetичування осердя трансформатора на величину втрат активної енергії, що у край важливо, оскільки ферорезонансні процеси супроводжуються значним спотворенням форми кривої струму та можуть виникати на частотах відмінних від основної.

В мережах середнього класу напруги 6-35 кВ з ізолюваною нейтраллю широко використовуються трансформатори напруги типу ЗНОМ, ЗНОЛ, НТМИ. Характерною особливістю перелічених вище типів ТН є та умова, що вони або однофазного виконання, або у корпусі трьохфазного ТН (НТМИ) знаходяться три окремі магнітопроводи. Дане виконання необхідне для того, щоб ТН виконував одну зі своїх основних функцій в мережах з ізолюваною нейтраллю – забезпечував вимірювання напруги нульової послідовності (такі ТН часто позначаються як трансформатори напруги для контролю ізоляції ТНКІ). Проте, така конструкція ТН призводить до утворення нелінійного шунта намагнічування нульової послідовності, який може ввійти у резонанс з ємністю мережі. Ця обставина і визначає складність боротьби з ферорезонансом в мережах з ізолюваною нейтраллю, так як ТН в будь-якому випадку мають виконувати свої основні функції вимірювального приладу.

Трансформатори типу ЗНОМ(Л) виконуються однофазними, з одним високовольтним та одним заземлюючим вводом, та з магнітопроводом бронетрижневого типу [12]. Застосування такого типу магнітопроводу доцільно, так як в таких умовах виконання достатньо мати лише один комплект обмоток на

центральному стрижні. У ТН типу ЗНОМ первинна обмотка заземляється. Вторинна обмотка, з'єднана у трикутник, або розімкнена, або замикається на активний опір.

Параметри трансформатору ЗНОМ-35-65, який використовується для моделювання в середовищі MATLAB, приведені в табл.2.1.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики ТН типу ЗНОМ-35-65

Тип ТН	Номінальна напруги, В		Ном. потужність В·А	Клас точн.	$R_{ВН}$, кОм	$L_{\sigma ВН}$, Гн	$R_{НН}$, Ом	$L_{\sigma НН}$, Гн	R_{μ} , МОм
	ВН	НН							
ЗНОМ-35-65	$35000/\sqrt{3}$	100/3	600	1,0	7,5	40	0,3	0,0001	45,61

На рис. 2.7 зображена імітаційна модель трьох однофазних трансформаторів напруги ЗНОМ-35-65. Модель ТН, яка використовується в даній роботі, являє собою поєднання електричної та магнітної схеми заміщення. Серед заходів щодо запобігання ферорезонансу в мережах 6-35 кВ слід виділити основну – ввімкнення додаткового активного опору величиною 25 Ом у розсічку обмотки ТН, з'єднаної у відкритий трикутник.

Оскільки ТН є одним з важливих елементів мереж з ізолюваною нейтраллю з точки зору виникнення та існування ферорезонансних процесів, а в мережах 6-35 кВ можливе використання різних типів ТН, то було змодельовано та в подальшому досліджено найбільш розповсюджений з них. Для мережі 35 кВ було змодельовано ТН типу ЗНОМ-35. ТН, аналогічно до силових трансформаторів, задавався в імітаційній моделі за допомогою активних опорів розсіювання обмоток ВН (R_{1a} , R_{1b} , R_{1c}) та НН (R_{2a} , R_{2b} , R_{2c}); індуктивностей розсіювання обмоток ВН (L_{1a} , L_{1b} , L_{1c}) та НН (L_{2a} , L_{2b} , L_{2c}) відповідно; активного опору, що вмикається у розсічку обмотки НН (R_{μ}) з'єднаної у відкритий трикутник (зазвичай 25 Ом); активного опору, який моделює втрати у магнітопроводі (R_{0a} , R_{0b} , R_{0c}) та джерел струму в кожній обмотці трансформаторів відповідно (Im_{1_a} , Im_{1_b} , Im_{1_c} – обмотки ВН, Im_{2_a} , Im_{2_b} , Im_{2_c} – обмотки НН), які моделюють магнітний струм зміщення в

обмотках трансформаторів. Дана модель враховує електромагнітні зв'язки та не лінійність магнітних систем в трансформаторах напруги.

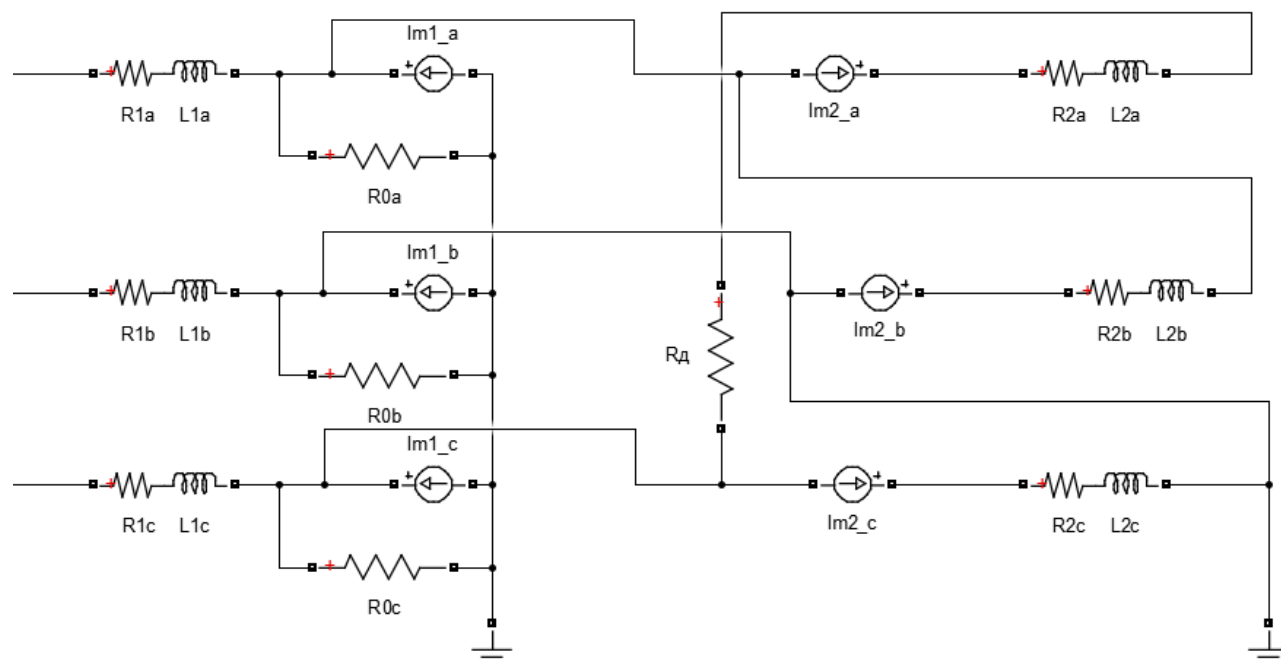


Рисунок 2.7 – Імітаційна модель ТН 3хЗНОМ-35-65 в середовищі MATLAB

Параметри обмоток ТН розраховувались за їх паспортними даними та даним проведених дослідів короткого замикання та холостого ходу. Вебер-амперні характеристики ТН розраховувались за експериментальними даними та даними заводів-виробників. Для прикладу, у таблиці 2.2 наведено вебер-амперну характеристику намагнічування ТН типу ЗНОМ-35-65, яку використано для подальшого моделювання.

Таблиця 2.2 – Вебер-амперна характеристика намагнічування ТН типу ЗНОМ-35-65

Ψ , Вб	0	133,3	175	193,3
I , А	0	0,005	0,05	0,24

2.3. Модель режиму роботи нейтралі в мережі

Згідно ПУЕ [13] електромережі 35 кВ можуть працювати в режимі ізолюваної, резонансно-заземленої, резистивно-заземленої нейтралі, а також можливе застосування комбінованого заземлення нейтралі. Тому з метою моделювання різних режимів роботи нейтралі електромережі в нейтраль обмотки 35 кВ силового трансформатора через керовані вимикачі під'єднанано резистор і котушку індуктивності, які, відповідно, моделюють заземлювальний резистор і дугогасний реактор [14]. Розглянемо характер зміни напруги і струмів в мережі і їх векторні діаграми в нормальних умовах і при однофазному замиканні на землю в режимі, коли нейтраль мережі ізолювана, замкнута через дугогасний реактор або через активний резистор. Для спрощення приймаємо, що навантаження мережі відсутнє. Це дозволяє вважати фазні напруги у всіх точках мережі незмінними і рівними ЕРС фаз джерела живлення. На рис. 2.8 приведена радіальна мережа з ізолюваною нейтраллю з джерелом живлення (генератором або понижувальним трансформатором) і однією еквівалентною ЛЕП, що умовно представляє всю мережу. Розподілена ємність фаз щодо землі замінена еквівалентною зосередженою ємністю C_0 . Опори R і X ЛЕП не враховуються. Ємність джерела живлення також не враховується внаслідок її малого значення.

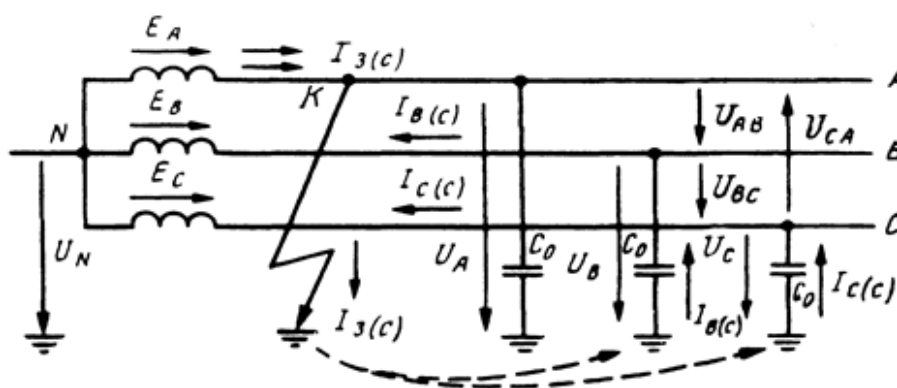


Рисунок 2.8 – Протікання фазних струмів при замиканні на землю

2.3.1 Модель ізолюваної нейтралі

При використанні режиму ізольованою нейтралі нейтральна точка джерела не приєднана до контуру заземлення. Зазвичай обмотки живлячих трансформаторів цих мереж з'єднані в трикутник, тому нейтральна точка фізично відсутня. Перевагами режиму з ізольованою нейтраллю є малий струм однофазних замикань на землю і відсутність необхідності в негайному відключенні першого однофазного замикання. Однак на практиці, в більшості випадків, однофазне замикання швидко переходить в двофазне або трифазне, що призводить до відключення лінії. Недоліки даного режиму заземлення нейтралі:

- ферорезонансні явища, викликані короткочасними ОЗЗ;
- дугові перенапруги, пов'язані з появою переміжної дуги при ОЗЗ, що призводять до переходу однофазного замикання в двох- та трифазне;
- небезпека враження струмом персоналу і сторонніх осіб при тривалому існуванні замикання на землю в мережі.

У даних мережах для усунення явища ферорезонансу при однофазних замиканнях на землю, що супроводжується пошкодженням трансформаторів напруги необхідно застосовувати антирезонансні трансформатори напруги. Для обмеження впливу дугових перенапруг на електрообладнання необхідно застосовувати обмежувачі перенапруги. Режим ізольованою нейтралі слід застосовувати при малих значеннях струму замикання на землю (до 5-7 А) і необхідності тривалої роботи з замиканням на землю.

Під час моделювання дугових перенапруг в мережі, що працює в режимі ізольованої нейтралі вимикачі 1 і 2 на рис.1 вимкнені зображено на рис. 2.9.

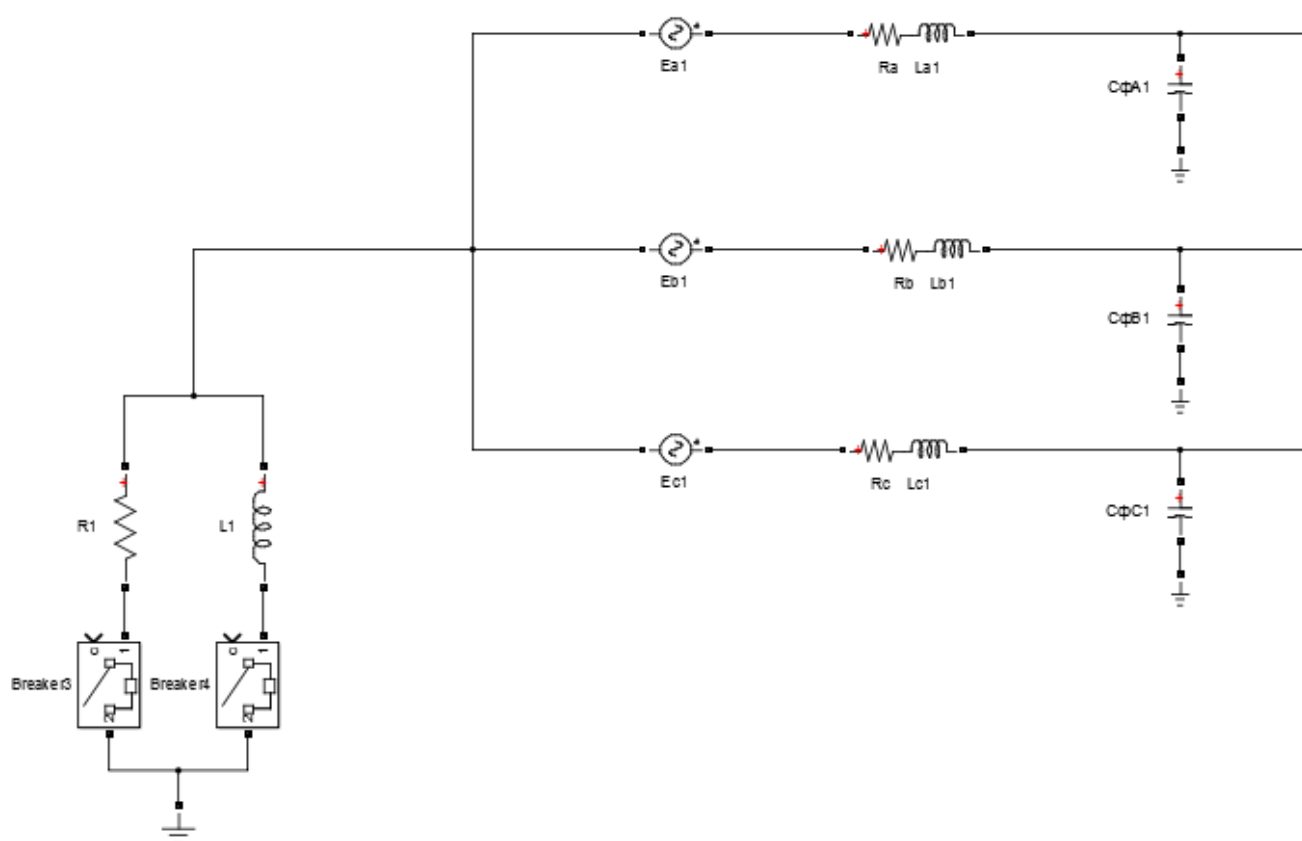


Рисунок 2.9 – Модель мережі в середовищі MATLAB при ізольованому режимі роботи нейтралі

2.3.2 Модель нейтралі заземленої через дугогасний реактор

При використанні цього способу заземлення нейтралі, зазвичай, нейтральну точку отримують використовуючи спеціальний трансформатор, в нейтраль якого підключають реактор. Для цих цілей можливо також використання ненавантажених трансформаторів і трансформаторів власних потреб обмотки 0,4 кВ, з'єднаної в трикутник. В цьому випадку необхідна перевірка ТВП за допустимим навантаженням. Спосіб включення ДГР в нейтраль показаний на рис. 2.10.

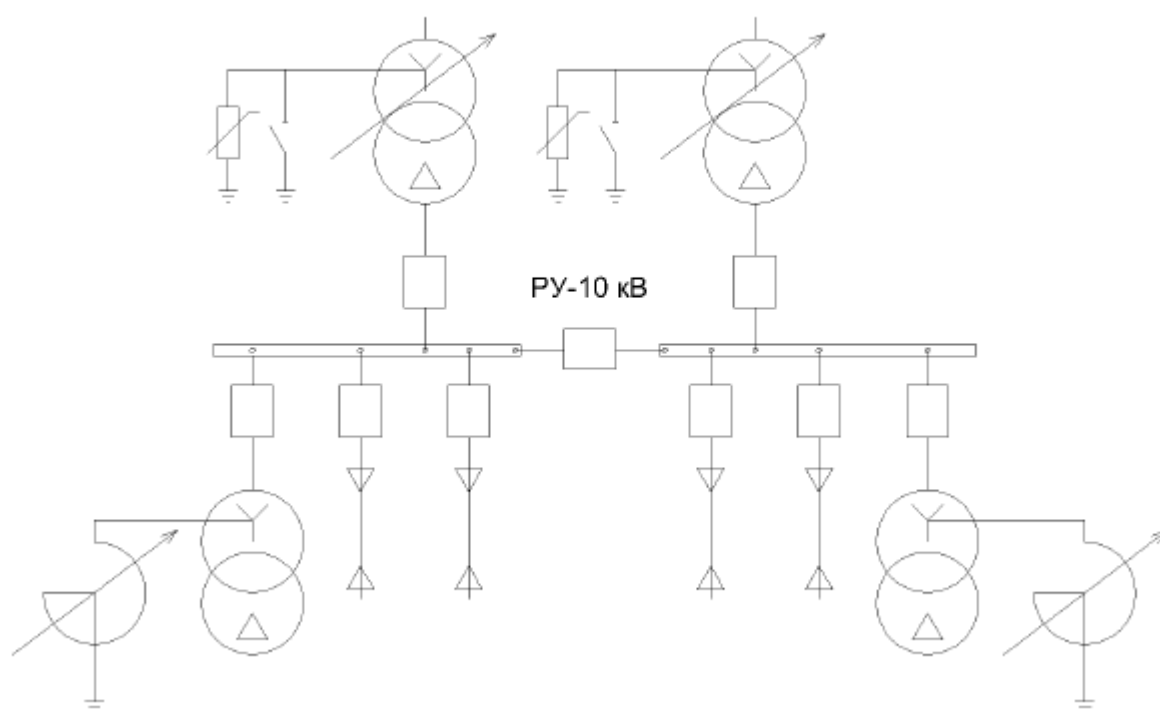


Рисунок – 2.10. Нейтраль, заземлена через ДГР

При відсутності трансформаторів зі схемою з'єднання обмоток "зірка - трикутник" для підключення реакторів допускається використовувати ненавантажені трифазні трансформатори зі схемою з'єднання обмоток "зірка - зірка".

Розрахункова потужність реактора визначається за формулою, квар:

$$Q_k = \frac{I_c U_{ном}}{\sqrt{3}},$$

де I_c – ємнісний струм замикання на землю, А;

$U_{ном}$ – номінальна напруга мережі, кВ.

В даному режимі заземлення нейтралі необхідно застосовувати плавнорегульовані реактори з мікропроцесорними автоматичними регуляторами, які автоматично налаштовуються в резонанс при зміні параметрів мережі. В цьому випадку можливе отримання всіх переваг даного режиму:

- зниження перенапруги при дугових замиканнях на землю до безпечних для ізоляції значень $2,2-2,4 U_{\phi}$;
- зменшення струму в місці замикання до мінімального значення (в межах до активної складової і струму вищих гармонік);
- забезпечення надійного гасіння заземлюючих дуг;
- зниження швидкості відновлення напруги на пошкодженій фазі;
- запобігання розвитку ферорезонансних процесів;
- відсутність необхідності у відключенні першого однофазного замикання;
- полегшення вимог до заземлюючих пристроїв.

Можливо також застосування мережі з нейтраллю заземленою через налаштований в резонанс дугогасний реактор з компенсацією залишкових, активних складових промислової частоти на пошкодженій фазі. Для цього можуть бути використані всережимні мікропроцесорні пристрої автокомпенсації ємнісних і активних складових струму промислової частоти типу УАРК.201 (для кабельних мереж), УАРК.201М (для повітряних і змішаних мереж). Така мережа називається мережею з повністю компенсованою нейтраллю (з ПК-нейтраллю). При цьому компенсація активних складових здійснюється введенням відповідного напруги в нейтраль мережі.

Компенсація ємнісного струму замикання на землю, тобто застосування мережі з нейтраллю заземленою через дугогасний реактор повинна застосовуватися при значенні ємнісного струму замикання на землю в нормальних режимах:

1. В мережах напругою 3-20 кВ, що мають залізобетонні та металеві опори на повітряних лініях електропередачі, і у всіх мережах напругою 35 кВ - більше 10 А;
2. В мережах, які не мають залізобетонних і металевих опор на повітряних лініях електропередачі:
 - більше 30 А при напрузі 3-6 кВ;
 - більше 20 А при напрузі 10 кВ;
 - більше 15 А при напрузі 15-20 кВ;
3. У схемах генераторної напруги 6-20 кВ блоків генератор-трансформатор - більше 5А.

Для моделювання резонансного заземлення нейтралі в середовищі MATLAB на схемі рис. 2.11 вимикач 2 замикався.

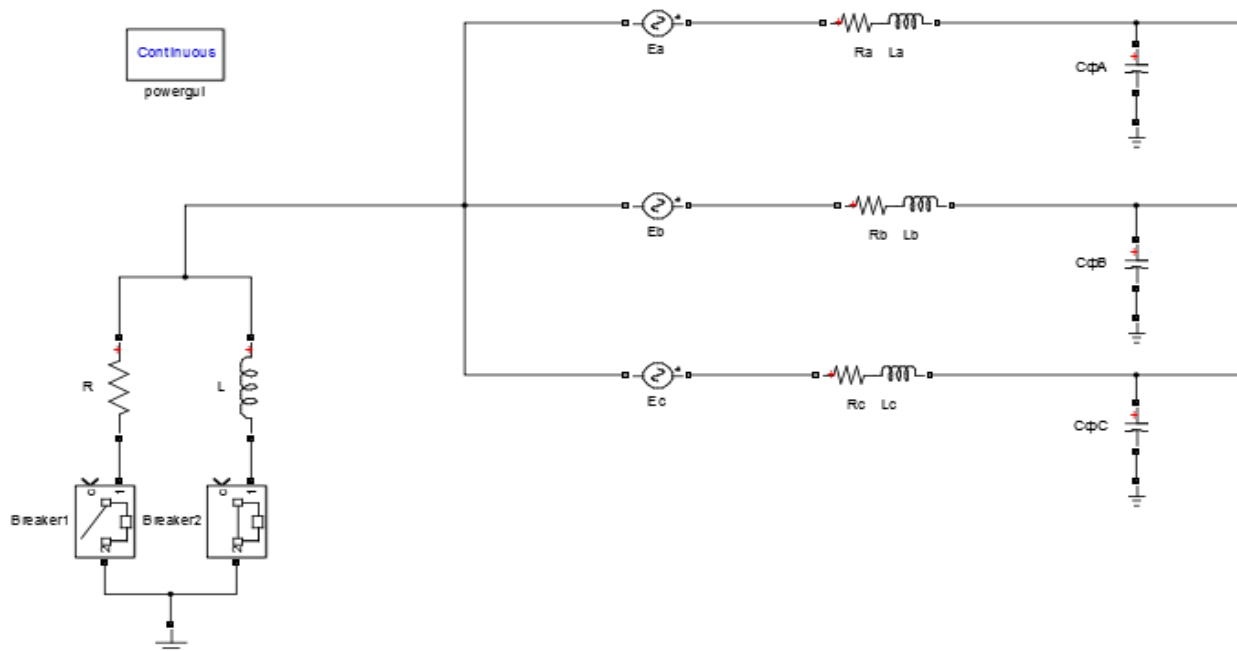


Рисунок 2.11. – Модель мережі в середовищі MATLAB із нейтраллю заземленою через дугогасний реактор

2.3.3 Модель нейтралі заземленої через резистор

Резистор може включатися так само, як і реактор, в нейтраль спеціального заземлюючого трансформатора. Можливі й інші варіанти включення резистора, коли нейтраль заземлюючого трансформатора наглухо приєднується до контуру заземлення, а резистор включається у вторинну обмотку, зібрану в розімкнутий трикутник, або використовується однообмотковий трансформатор (фільтр нульової послідовності) із з'єднанням обмотки ВН в зигзаг типу ФМЗО. Варіанти включення резистора показані на рис 2.12.

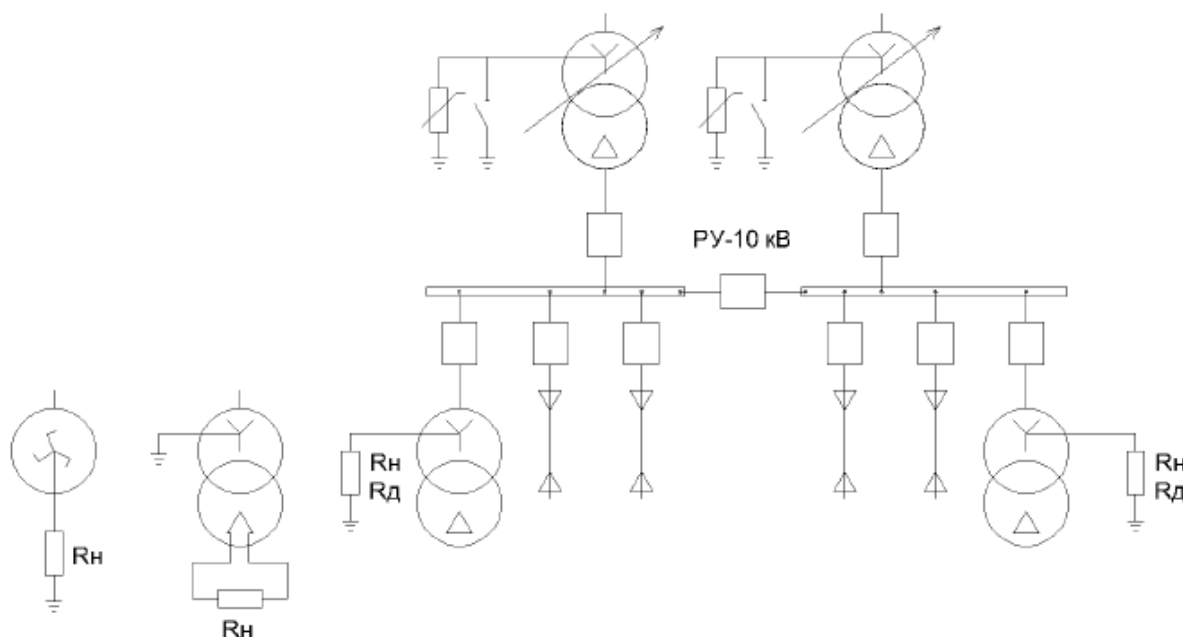


Рисунок 2.12 – Нейтраль, заземлена через резистор

Можливі два варіанти реалізації резистивного заземлення нейтралі: високоомний або низькоомний. Підключення низькоомного резистора можливе тільки в нейтраль заземлюючого трансформатора. Високоомний резистор застосовується в мережах з ємнісним струмом замикання на землю не більше 10 А. При цьому опір резистора, що підключається в нейтраль заземлюючого трансформатора, має бути не вище опору розрахованого за формулою, Ом:

$$R_H = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot I_c},$$

де I_c – ємнісний струм замикання на землю, А;

$U_{ном}$ - номінальна напруга мережі, кВ.

Опір резистора, що підключається у вторинну обмотку заземлюючого трансформатора, має бути не вище опору розрахованого за формулою:

$$R_d = \frac{27 \cdot U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot I_c \cdot K^2},$$

де I_c – ємнісний струм замикання на землю, А;

$U_{ном}$ – номінальна напруга мережі, кВ;

K – коефіцієнт трансформації заземлюючого трансформатора, в.о.

Потужність заземлюючого трансформатора вибирається виходячи з умови:

$$S \geq \frac{U_{BH}^2}{3 \cdot R_{\Sigma}} = \frac{(3 \cdot U_{HH})^2}{R_{\Sigma}},$$

де U_{BH} – лінійна напруга зі сторони вищої напруги трансформатора, В;

U_{HH} – лінійна напруга зі сторони нищої напруги трансформатора, В.

У мережах з ємнісним струмом замикання на землю від 10 до 100 А, де можливе відключення однофазних замикань на землю, може застосовуватися низькоомний резистор, величина якого вибирається виходячи з: умов селективної роботи струмових захистів від замикань на землю; стійкості опор ПЛ, оболонок і екранів кабелів до протікання такого струму однофазного замикання. Опір низькоомного резистора повинен бути не вище розрахункового.

Перевагами резистивного заземлення нейтралі є:

- усунення ферорезонансних явищ;
- зниження рівня дугових перенапруг;
- відсутність необхідності у відключенні першого однофазного замикання на землю при високоомному заземленні нейтралі;
- зменшення ймовірності ураження персоналу і сторонніх осіб під час однофазного замикання при низькоомному заземленні і швидкому селективному відключенні пошкодженої ділянки;
- просте виконання чутливого та селективного релейного захисту від однофазних замикань на землю, заснованого на струмовому принципі.

Недоліками резистивного режиму заземлення нейтралі є:

- збільшення струму в місці пошкодження;

– необхідність у відключенні однофазних замикань при низькоомному заземленні.

Для моделювання резистивного заземлення нейтралі в середовищі MATLAB на схемі рис. 2.13 вимикач 1 замикався.

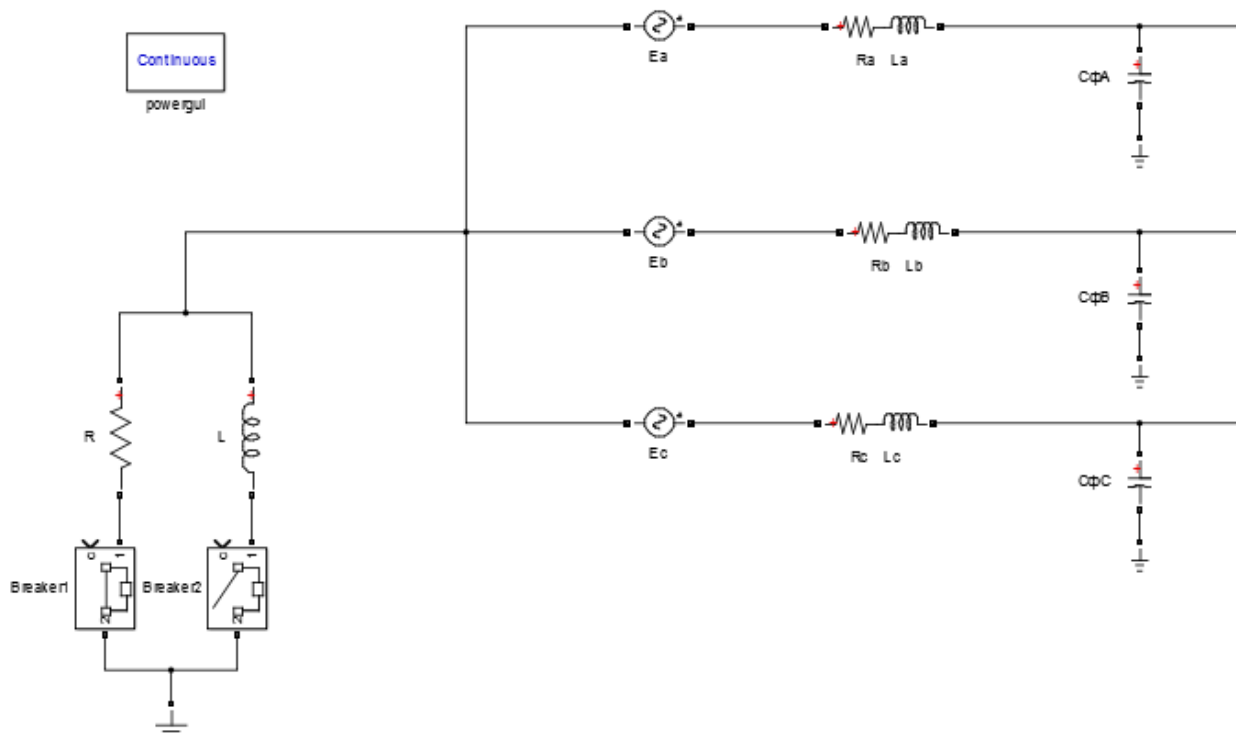


Рисунок 2.13 – Модель мережі в середовищі MATLAB із нейтраллю заземленою через високоомний резистор

2.3.4 Модель нейтралі із комбінованим заземленням.

В активно-індуктивному режимі мережа працює з нейтраллю, заземленою через дугогасний реактор, і при дугових замиканнях на землю проявляються всі позитивні сторони компенсації ємнісних струмів. При металевому замиканні на землю паралельно дугогасному реактору підключається резистор на час, достатній для спрацьовування захисту від замикання на землю.

На рис.2.14 вимикачі 1 та 2 замкнені.

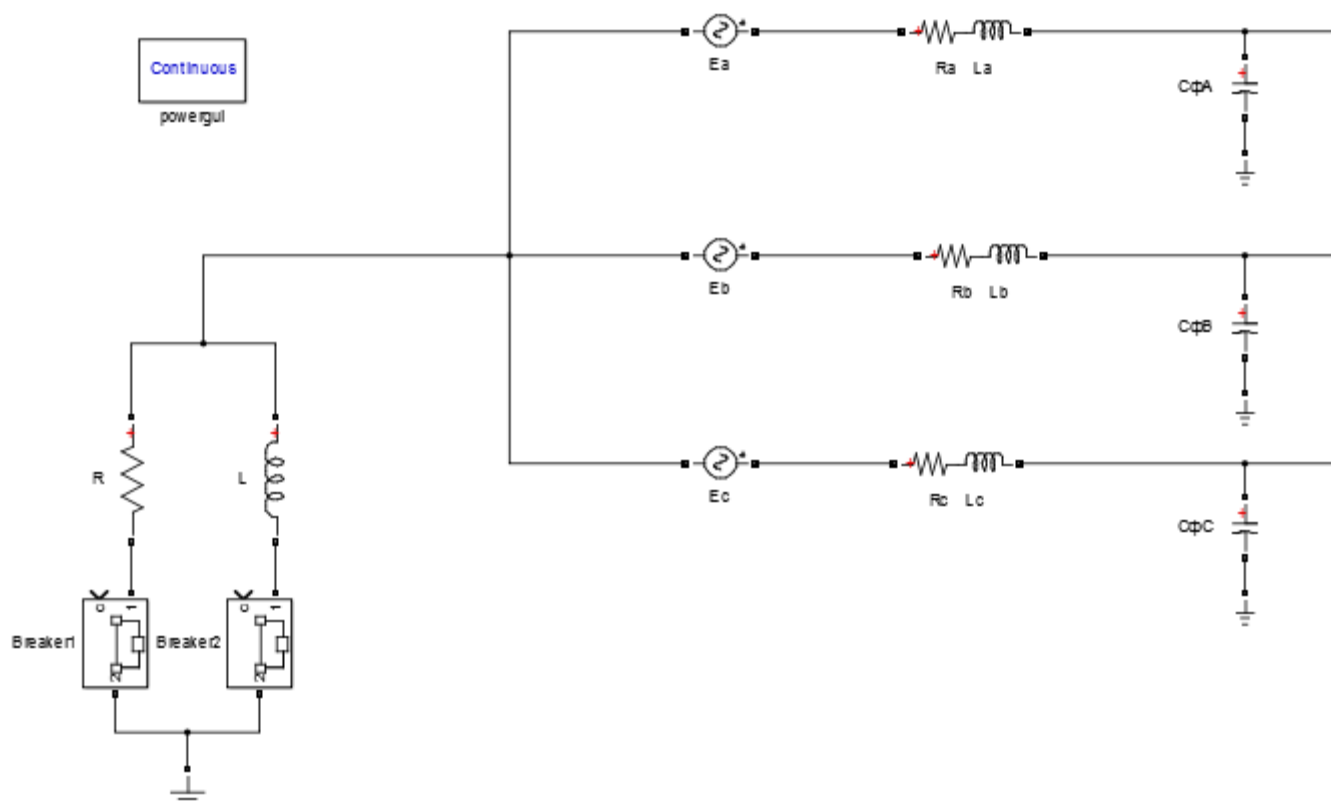


Рисунок 2.14 – Модель мережі в середовищі MATLAB з комбінованим заземленням нейтралі

2.4 Модель однофазного дугового замикання на землю

Одним з ефективних засобів зниження аварійності мереж 6-35 кВ є застосування комплексу заходів обмеження перенапруг [15]. Правильно побудовані засоби захисту від перенапруг запобігають пошкодженню ізоляційних конструкцій і електроустаткування, знижують спрацювання комутаційної апаратури. Захист підстанцій та їх обладнання від перенапруг є завданням більш складним, ніж захист від грозових перенапруг ліній електропередачі. Це пояснюється тим, що:

- 1) ізоляція електроустаткування підстанції, як правило, відноситься до категорії невідновлюваних;
- 2) на підстанціях встановлюється більш відповідальне та дороге обладнання, ніж на лініях електропередачі;

3) відключення лінії, зазвичай, не є причиною погашення підстанції, а пошкодження ізоляції підстанційного обладнання може призвести до тривалого перерви електропостачання споживачів.

Важливим фактором є наявність в експлуатації великого відсотка електрообладнання, яке свій ресурс відпрацювало і має послаблену ізоляцію [16,17]. Значну небезпеку для електроустаткування електромереж 6-35 кВ становлять перенапруги під час горіння заземлюючих дуг при виникненні однофазних замикань на землю. Ці процеси є небезпечні частотою виникнення в електромережах, своєю тривалістю та величинами перенапруг.

У зв'язку з цим є важливим розробка моделі електричної дуги і аналізованої електричної мережі для використання при вирішенні завдань побудови швидкодіючих захистів з контролем її параметрів, наприклад, дугових захистів, а також для врахування її впливу на функціонування основних і резервних захистів високовольтного обладнання.

Очевидно, що для досягнення поставленої мети необхідно вирішити декілька самостійних задач. Перше завдання - це вибір найбільш прийнятної математичної моделі для опису процесів в електричній дузі. Друге завдання - побудова функціонального перетворювача, що дозволяє вирішити рівняння математичної моделі динамічної дуги. І наостанок, третє завдання полягає в отриманні функціональної залежності для напруги на дузі від струму.

Наведемо основні аргументи, що пояснюють чому узагальнена модель електричної дуги в MATLAB/Simulink виявилася настільки ефективною для вирішення цілої сукупності завдань. На теперішній час запропоновано велику кількість моделей динамічної дуги. Важливими видами моделей є: моделі Кассі, Майра, Заруді, Шельгазе, Siemens/Habedank, Kema, Schavemaker, Schwarz (Avdonin), математична модель динамічної дуги (ММДД), розроблена в ІЕЗ ім. Е. О. Патона, і багато інших.

Слід відразу ж зазначити, що ММДД має ряд переваг у порівнянні з іншими моделями. ММДД – найбільш загальна модель, пов'язана з енергетичними параметрами електричної дуги, справедлива для будь-яких видів статичних вольт-

амперних характеристик (CBAХ) дуги, дозволяє вирішувати завдання в електротехнічних термінах, може бути поширена на випадки дуг зі змінною довжиною, дуг що рухаються і дуг з продувкою газу. За допомогою ММДД легко визначаються такі важливі енергетичні параметри стовпа дуги як відведена потужність і внутрішня енергія стовпа дуги, що принципово неможливо в альтернативних моделях.

Цікаво, що в окремому випадку, коли CBAХ має степеневий вид з показником ступеня n , модель, наприклад, Кассі виходить з ММДД при $n = 0$, модель Майра має місце при $n=-1$, а модель Заруді реалізується при $n=-(1-k)/(1+k)$. Тут k – показник нелінійності плазми.

До конкретних прикладів програм комп'ютерного моделювання схем з дугами можна віднести, в першу чергу, пакети EMTP96 (v3.0), XTrans . Перший з них базується на основі методу вузлових потенціалів і має вбудовану функцію постійного кроку. Метод цей, втім, ще не доведений повністю до практичних програм, і області його раціонального застосування не встановлені. Відзначимо, що модель дуги в EMTP96 активна тільки в короткий час безпосередньо перед переходом струму через нуль, і це може призводити до невірних результатів. Пакет XTrans, який отримав більш широке поширення, базується на диференціальних алгебраїчних рівняннях, реалізує модель дуги Майра і має вбудовану функцію змінного кроку. Останнє є великою перевагою при дослідженнях схем з нелінійними моделями дуги.

Безсумнівна перевага MATLAB/Simulink полягає в можливості побудови моделей складних електротехнічних систем на основі методів імітаційного і функціонального моделювання. За рахунок такого підходу, на відміну від відомих пакетів схемо-технічного моделювання типу OrCAD, PSpice, DesignLab, Workbench і т.д., модель спрощується, зменшує використання пам'яті, підвищується швидкість розрахунку і працездатність персонального комп'ютера. Важливо відзначити, що в MATLAB Simulink Arc Model Blockset базується на методі простору станів, який став основною формою інтерпретації поведінки динамічних систем, і має функцію багаторазово мінливого кроку. При малій розмірності задач динаміки їх рішення має

наочне геометричне відображення в межах декартового простору. Зі сказаного випливає, що найбільш відповідний сучасний підхід до математичного моделювання електричної дуги і реалізація математичного опису з мінімумом складності пов'язані із застосуванням універсальної моделі дуги і сучасного, постійно розвивається з широкими можливостями для моделювання пакета MATLAB/Simulink.

Звернемо увагу, що найбільш загальна форма опису динаміки об'єкта на макрорівні (зосереджена модель) - це диференціальні рівняння в простих похідних.

Далі електрична дуга як елемент електричного ланцюга описується феноменологічно як теплової інерційний макрооб'єкт, який можна охарактеризувати наступними параметрами: статичною вольт-амперною характеристикою (СВАХ) стовпа дуги $U_{ст.д}(i_\theta)$, який відбиває статичні властивості дуги, і струмом стану дуги i_θ , що характеризує внутрішню енергію дуги в даний момент часу. Параметри θ і пов'язані з струмом дуги і рівнянням математичної моделі динамічної дуги в диференціальній формі.

$$\theta \frac{di_\theta^2}{dt} + i_\theta^2 = i^2$$

де θ – постійна часу стовпа дуги.

При цьому напруга на дузі:

$$u_d = \frac{U_{ст.д}(i_\theta)}{i_\theta} i + U_{а-к}, \quad (2.1)$$

де $U_{а-к}$ – сума приелектродних падінь напруги, яку в першому наближенні можна вважати величиною постійною;

$U_{ст.д}(i_\theta) \cdot i / i_\theta$ – напруга на стовпі дуги в динаміці.

Через динамічні параметри стовпа дуги визначається потужність, що підводиться:

$$P = u_{\text{ст.д}} i = R_{\text{ст}}(i_{\theta}) i^2 = \frac{U_{\text{ст.д}}(i_{\theta})}{i_{\theta}}$$

де $R_{\text{ст}}(i_{\theta}) = U_{\text{ст.д}}(i_{\theta})/i_{\theta} = u_{\text{ст.д}}/i$ – статичний опір стовпа дуги.

А потужність, що відводиться від стовпа дуги однозначно визначається з відповідного статичного стану:

$$P_{\theta} = U_{\text{ст.д}}(i_{\theta}) i_{\theta}.$$

У разі степеневі апроксимації нелінійної статичної вольт-амперної характеристики $i_{\theta}(u)$ математична форма апроксимованої ВАХ така:

$$i_{\theta}(u) = I_0 \left(\frac{u}{U_0} \right)^{1/n}, \quad (2.2)$$

де I_0 , U_0 – струм і напруга в фіксованій точці на ВАХ дуги (в обраній робочій точці);

n – показник ступеня ($n=\infty$ – для ВАХ незалежної від напруги; $n=-1/3$ – для вільно палаючих дуг; $n=-1$ – для дуг постійної потужності).

У розрахунках використовувалося значення $n=-1/3$.

Зауважимо, що будь-який нелінійний опір з ВАХ (2.3) може бути замінено залежними джерелами струму і напруги, і, навпаки, джерело, що залежить від струму, протікає по ньому (напруги, що падають на ньому) може бути замінений опором, що керується струмом (напругою).

$$f(u, i) = 0 \quad (2.3)$$

Якщо (2.3) можна вирішити лише щодо одного електричного параметра, то вводять поняття опору, що залежить від струму $R(i)$, протікаючого по ньому, або від напруги $R(u)$ між його виводами. Отже, вирішуючи рівняння (2.3) відносно струму або напруги, приходять до залежного джерела струму $I_3(u)$ або напруги $U_3(i)$.

Для моделювання елементів з нелінійної вольт-амперної характеристики використовується принципова модель на базі керованого джерела напруги або керованого джерела струму, наведеного на рис. 2.15

У моделі до керованого джерела струму паралельно підключений вимірювач напруги. Між виходом вимірювача напруги і входом джерела струму (ДС) включена Simulink-модель, яка реалізує необхідну ВАХ (2.2) електричної дуги. Паралельно ДС також підключений розв'язуючий резистор R_p .

Цікаво відзначити, що з технічної точки зору більш доцільним є функціональний перетворювач першого типу, в якому напруга на стовпі дуги забезпечується за допомогою повторювача напруги. У цьому випадку достатньо просто імітувати напругу як на стовпі дуги, так і на приелектродних областях.

Модель дуги представлена у вигляді імітаційної моделі на рис. 2.16. При створенні моделі в середовищі MATLAB використані відомі положення теорії і практики імітаційного моделювання [18].

На рис. 2.16 в схемі представлені основні елементи: джерело сигналу постійної величини - Constant, який складається з сигналом, що отримується на виході блоку скалярного добутку двох векторів для отримання виразу (2.1) і імітує напругу як на стовпі дуги так і на приелектродних областях; Switch - це перемикач з сигналу датчика струму на постійний сигнал.

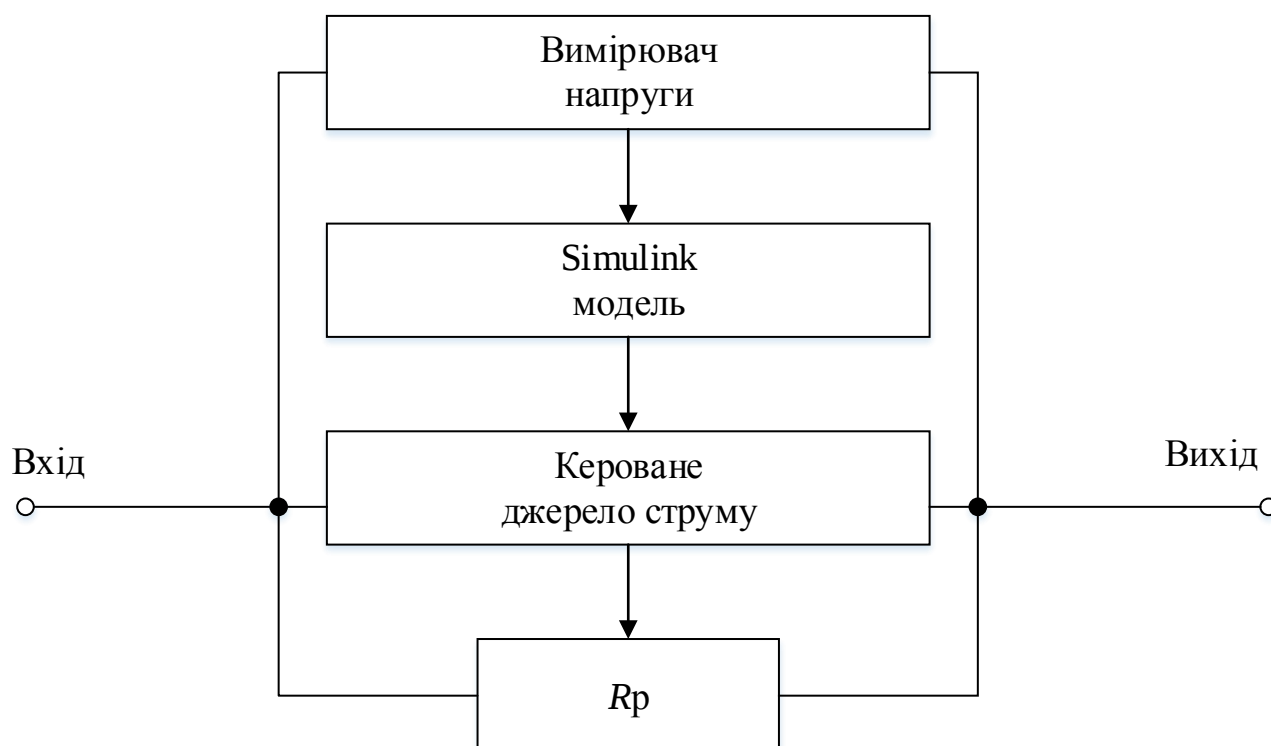


Рисунок 2.15 – Принципова модель дуги

Тим самим забезпечується ефективне і просте рішення проблеми фізичної реалізації модельованого елементу; блок Memory - шляхом затримки на один крок дискретизації забезпечує усунення негативного впливу алгебраїчного контуру; модель Simulink дуги реалізована за допомогою блоку Fcn.

ВАХ задана виразом:

$$U(i_{\theta}) = U_0 \left(\frac{i_{\theta}}{I_0} \right)^n. \quad (2.4)$$

Рівняння динаміки дуги в термінах провідності (В g-формі) для досить довгих дуг, коли приелектродними падіннями напруги можна знехтувати.

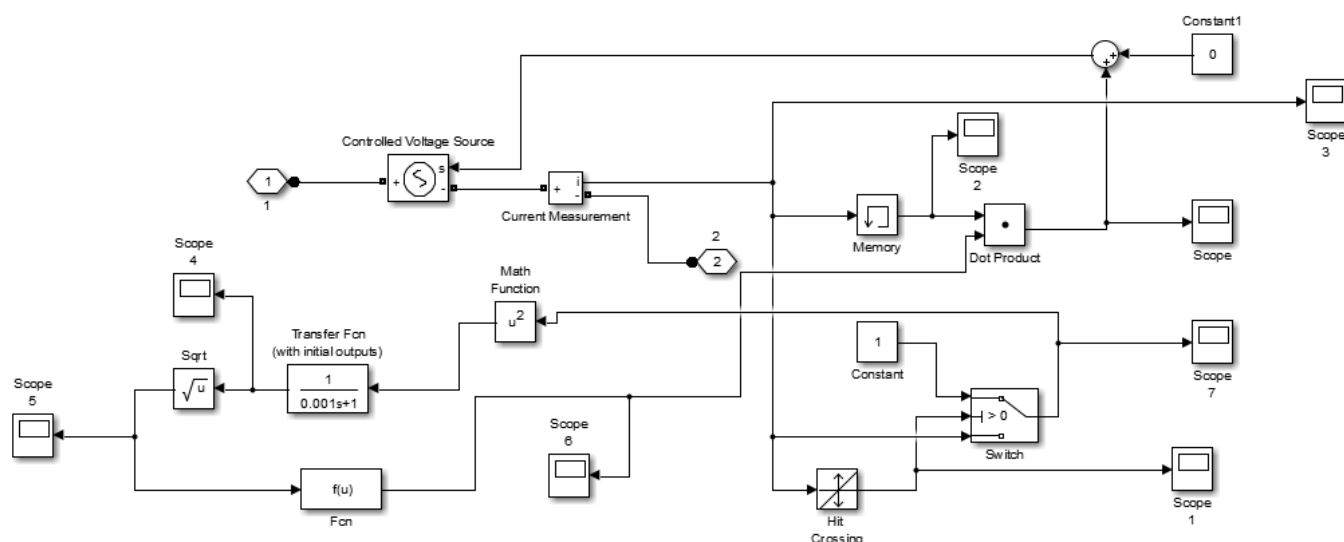


Рисунок 2.16 – Імітаційна модель електричної дуги

Отже, вираз матиме вигляд:

$$\left[\frac{2\theta}{1 - \frac{g}{G_{\text{дф}}(i_\theta)}} \right] \frac{1}{g} \frac{dg}{dt} + 1 = \frac{i^2}{g^2 U_{\text{ст.д}}^2(i_\theta)} = \frac{i^2}{g P_\theta}, \quad (2.5)$$

де $G_{\text{дф}}(i_\theta) = (dU_{\text{ст.д}}(i_\theta)/di_\theta)^{-1}$ – диференційна провідність;

$P_\theta = U_{\text{ст.д}}(i_\theta)i_\theta$ – відведена потужність;

$g = 1/R_{\text{ст}}(i_\theta) = i_\theta/U_{\text{ст.д}}(i_\theta)$ – статична провідність стовпа дуги.

В окремому випадку статичної ВАХ степеневого вигляду (2.4) рівняння (2.5) записується так:

$$\frac{2\theta}{1-n} \frac{1}{g} \frac{dg}{dt} + 1 = \left(\frac{I_0^n}{U_0} \right)^{\frac{2}{1-n}} \frac{i^2}{g^{2/(1-n)}} = \frac{u_{\text{д}} i}{P_\theta}. \quad (2.6)$$

Якщо, крім того, врахувати, що:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{i} \frac{di}{dt} - \frac{1}{u_{\text{д}}} \frac{du_{\text{д}}}{dt},$$

то рівняння (2.6) можна записати в наступному вигляді:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{i} \frac{di}{dt} - \frac{1}{u_{\text{д}}} \frac{du_{\text{д}}}{dt} = \left(\frac{u_{\text{д}} i}{P_{\Theta}} - 1 \right) \frac{1}{\tau},$$

де $\tau = 2\theta/(1 - n)$.

Так як при синусоїдальному характері зміни струму його перехід через нуль відбувається практично лінійно:

$$i = (di/dt)_0 t, \quad (2.7)$$

то після перетворення ми отримаємо

$$\frac{1}{u_{\text{д}}^2} \frac{du_{\text{д}}}{d(t/\tau)} - \left(1 + \frac{\tau}{t} \right) \frac{1}{u_{\text{д}}} = - \frac{\tau}{P_{\Theta}} \left(\frac{di}{dt} \right)_0 \frac{t}{\tau}. \quad (2.8)$$

Рівняння (2.8) є рівнянням Бернуллі. Введенням нової змінної $z = 1/U_{\text{д}}$ і вибором в якості масштаб часу постійної часу τ воно зводиться до лінійного в наочній формі. Рішення ж цього рівняння має вигляд:

$$z = \frac{e^{-t/\tau}}{t/\tau} \left[\frac{\tau (di/dt)_0}{P_{\Theta}} \int (t/\tau)^2 e^{t/\tau} d(t/\tau) + C \right].$$

Маючи на увазі, що для досить малих значень τ експоненційною компонентою (вільної складової реакції) можна знехтувати, отримуємо:

$$u_d = \frac{P_\theta}{\tau(di/dt)_0} \cdot \frac{t/\tau}{(t/\tau)^2 - 2t/\tau + 2}. \quad (2.9)$$

Так як, по-перше, другий доданок при малій постійній часу τ швидко згасає в порівнянні з періодом промислової частоти, а, по-друге, напруга на дузі при $t = 0$ дорівнює нулю.

З умови $u_d'(t_{\max}) = 0$ отримуємо рівняння для визначення $t_{\max}$:

$$t_{\max}^2 = 2\tau^2,$$

Звідки:

$$t_{\max} = \pm\sqrt{2}\tau = \pm 2\sqrt{2}\theta/(1-n).$$

При цьому:

$$u_{d\max 1} = \frac{P_\theta}{\tau(di/dt)_0} \cdot \frac{0,5}{(\sqrt{2}-1)} \cong \frac{1,21P_\theta}{\tau(di/dt)_0}$$

та:

$$u_{d\max 2} = -\frac{P_\theta}{\tau(di/dt)_0} \cdot \frac{0,5}{(\sqrt{2}+1)} \cong -\frac{0,21P_\theta}{\tau(di/dt)_0}$$

Як ми бачимо, напруга на дузі зростає з підвищенням $P_{\text{и}}$ і в той же час і менші значення θ збільшують $u_{\text{д}}$. Слід зазначити, що максимальні значення $u_{\text{д}}$ при синусоїдальному струмі відповідають СВХ дуги (коли постійна часу θ прямує до нуля).

Визначимо диференціальний опір $R_{\text{дф}}$ з (9) і (7):

$$R_{\text{дф}} = \frac{P_{\theta}}{\tau^2 (di/dt)_0^2} \cdot \frac{1}{(t/\tau)^2 - 2t/\tau + 2}$$

Отже, величина:

$$R_{\text{дф}0} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{\theta}}{\tau^2 (di/dt)_0^2}$$

Іншими словами, величина $R_{\text{дф}}$ при переході струму через нуль (для $t = 0$) дорівнює залишковому опору дуги $R_{\text{дф}0}$.

На рис. 2.17 представлена модель мережі 6-35 кВ з ізольованою нейтраллю та однофазним дуговим замиканням на землю.

Слід зазначити, що застосування імітатора електричної дуги має великі перспективи для проведення цілої сукупності випробувань електротехнічного устаткування. На його основі реалізуються різні дуги як постійного струму, в тому числі і модульованого, так і змінного струму. Варіюванням постійної часу θ можна імітувати різні покриття електродів і різні захисні гази.

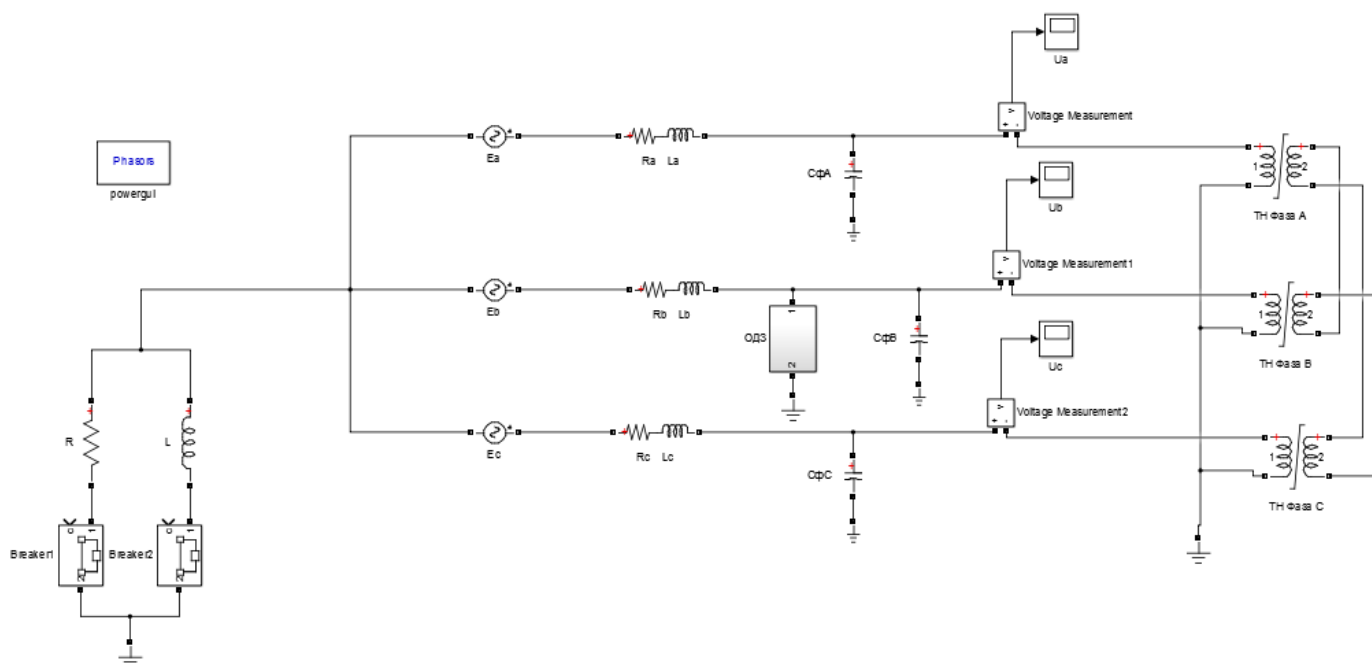


Рисунок 2.17 – Імітаційна модель електричної мережі 6-35 кВ з ОДЗ

Висновки до розділу 2

У даному розділі описувались наслідні елементи електричної мережі, які були змодельовані у середовищі MATLAB: електрична мережа середнього класу напруги, електромагнітний трансформатор напруги, чотири режими роботи нейтралі (ізолювана, резонансно-заземлена, резистивно-заземленої нейтраль, а також комбіноване заземлення нейтралі) та модель дугового замикання на землю. Безперечною перевагою MATLAB/Simulink є можливість побудови моделей складних електротехнічних систем на основі методів імітаційного та функціонального моделювання.

3 АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПОПЕРЕЧНИХ ЄМНОСТЕЙ МЕРЕЖІ НА ХАРАКТЕР ПЕРЕНАПРУГ ПРИ ОДНОФАЗНИХ ДУГОВИХ ЗАМИКАННЯХ НА ЗЕМЛЮ

3.1 Залежність кратностей дугових перенапруг від величини поперечної ємності мережі

Мережа із ізольованою нейтраллю.

Під час аналізу дугових перенапруг в мережі, що працює в режимі ізольованої нейтралі вимикачі 1 та 2 розімкнені.

Результати виконаних розрахунків свідчать, про те що найбільші перенапруги виникають при ємностях від 0,99 мкФ до 2,1 мкФ, що відповідає ємнісним струмам від 19,04 А до 40 А. Найбільша кратність $K_u=15,05$ спостерігається при $C=1,68$ мкФ.

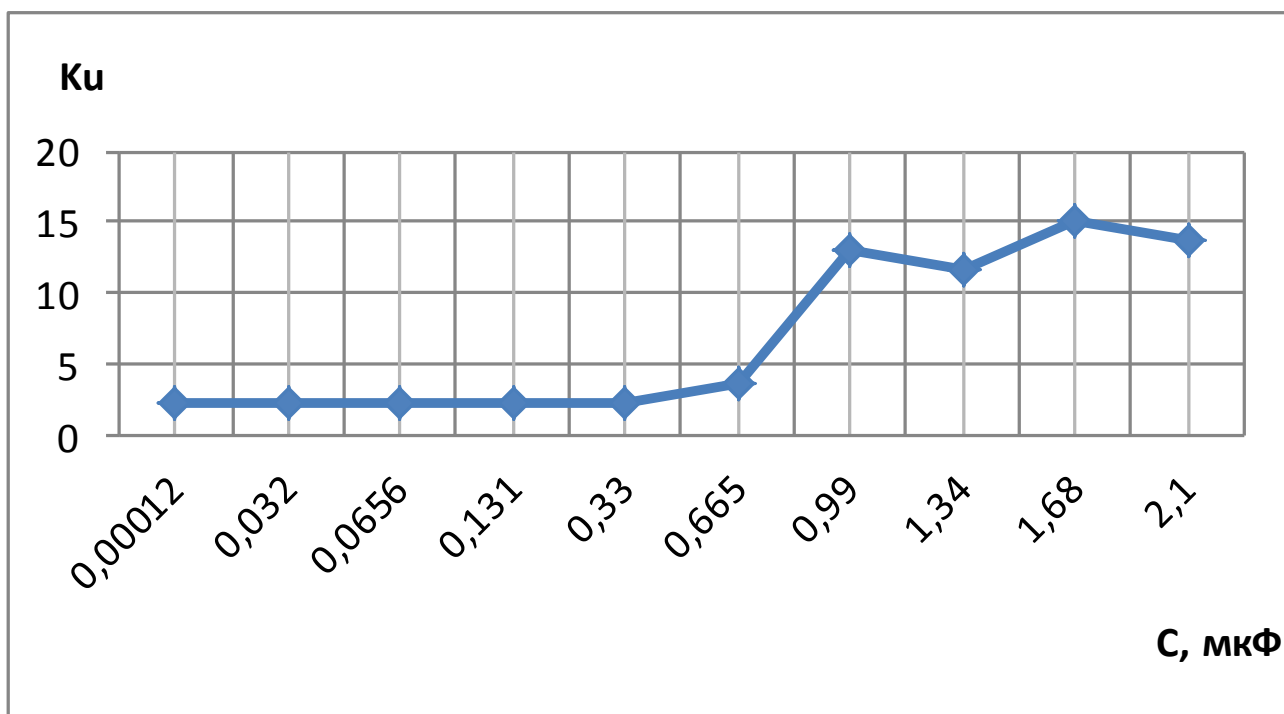


Рисунок 3.1. – Залежність кратностей дугових перенапруг в мережі із ізольованою нейтраллю від величини ємності замикання на землю

Осцилограма перенапруг зображена на рис.3.2. змодельована при $C=1,68$ мкФ, $t=3$ с

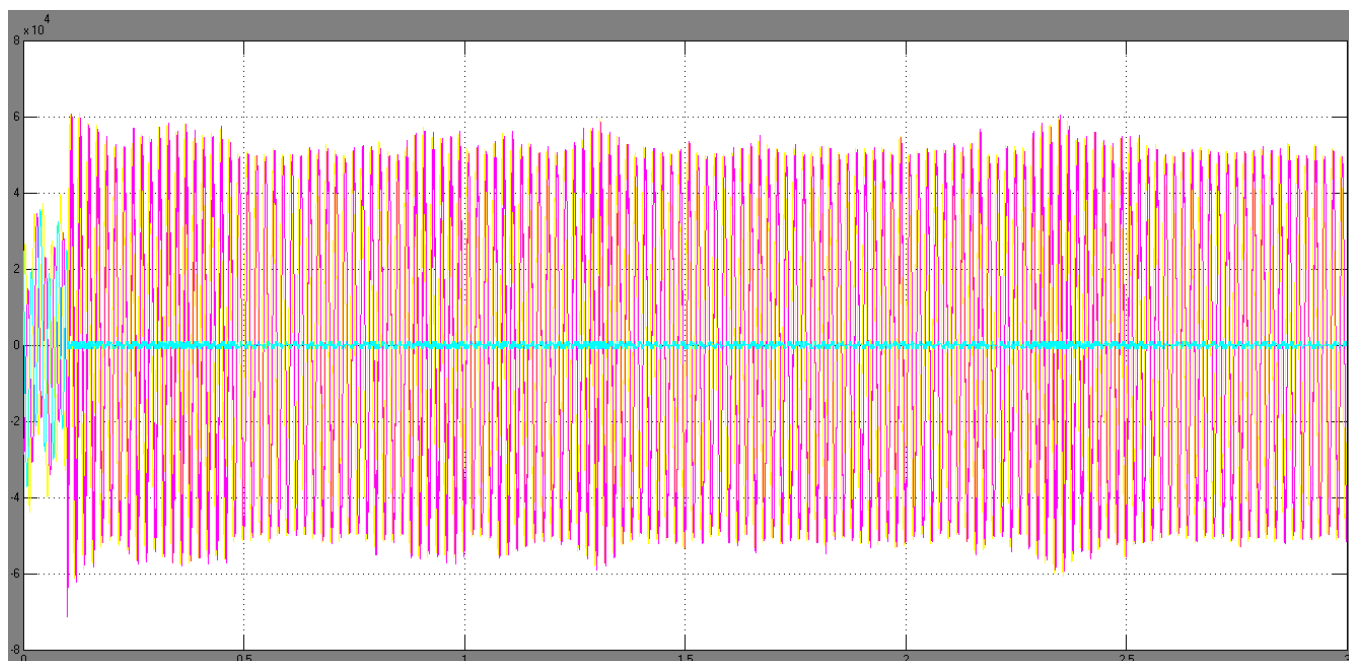


Рисунок 3.2. – Осцилограма перенапруг

Мережа із резистивно-заземленою нейтраллю.

В цифровій моделі мережі резистивне заземлення нейтралі імітуємо замиканням вимикача 1. Були виконані дослідження, зображені на рис.3.3., кратностей дугових перенапруг для величини опору 2000 Ом заземлюючого резистора та різних значень ємності замикання на землю в електромережі. Кратності перенапруг, що виникають при резистивному заземленні зменшились в порівнянні з попереднім дослідом. Найбільший показник $K_u=10,3$ спостерігається при $C=1,68$ мкФ.

Вибір струму, створюваного резистором, при низькоомному заземленні нейтралі є розумним компромісом між двома протилежними завданнями: підвищенням чутливості захистів від замикань на землю за рахунок збільшення струму однофазного замикання і обмеженням струму в місці пошкодження (однофазного замикання) для зниження обсягу руйнування обладнання.

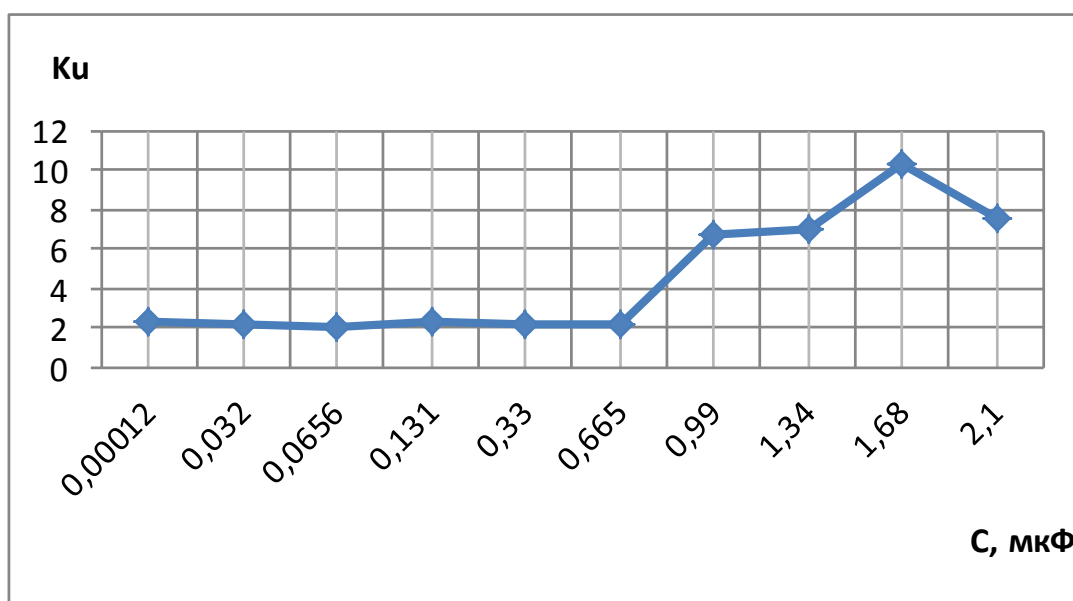


Рисунок 3.3. – Залежність кратностей дугових від поперечної ємності

Осцилограма перенапруг зображена на рис.3.4. при $C=1,68$ мкФ, $t=3$ с.

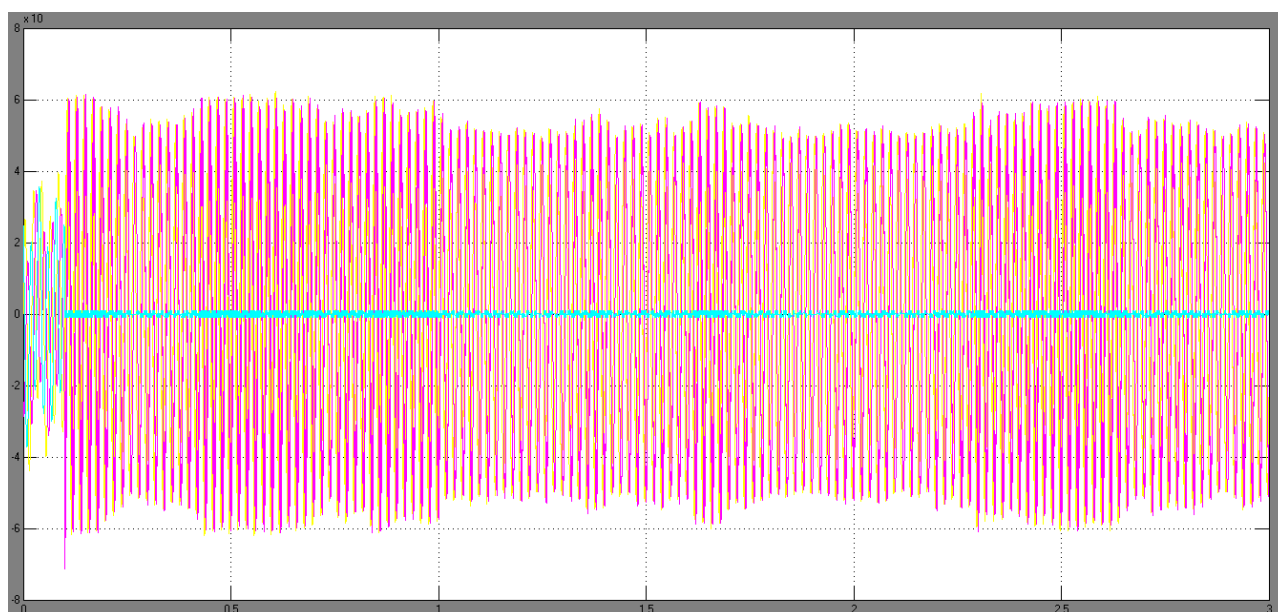


Рис. 3.4. – Осцилограма перенапруг

Мережа із резонансно-заземленою нейтраллю.

Також були проведені дослідження кратностей перенапруг при резонансному заземленні нейтралі. Для моделювання даного процесу вимикач 1 розмикався, а вимикач 2 замикався, індуктивність дугогасного реактора була прийнята $L=4,39$ Гн.

За результатами досліджень на рис.3.5. бачимо, що максимальне значення перенапруг дорівнює $K_u=15,12$.

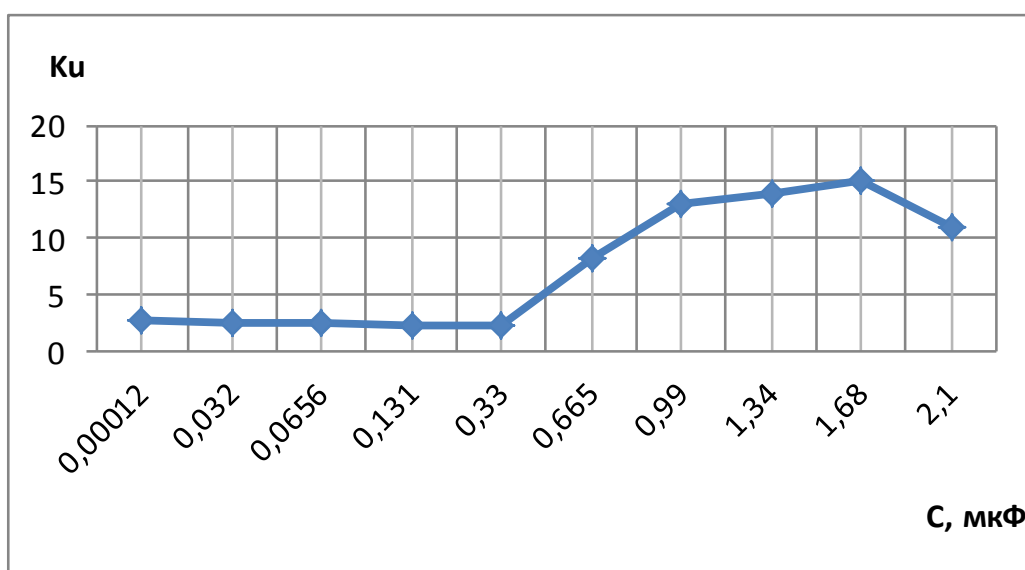


Рис. 3.5. – Залежність кратностей дугових перенапруг в мережі резонансно-заземленою нейтраллю від величини ємності замикання на землю

Осцилограма перенапруг на рис.3.6. при $C=1,68$ мкФ, $t=3$ с.

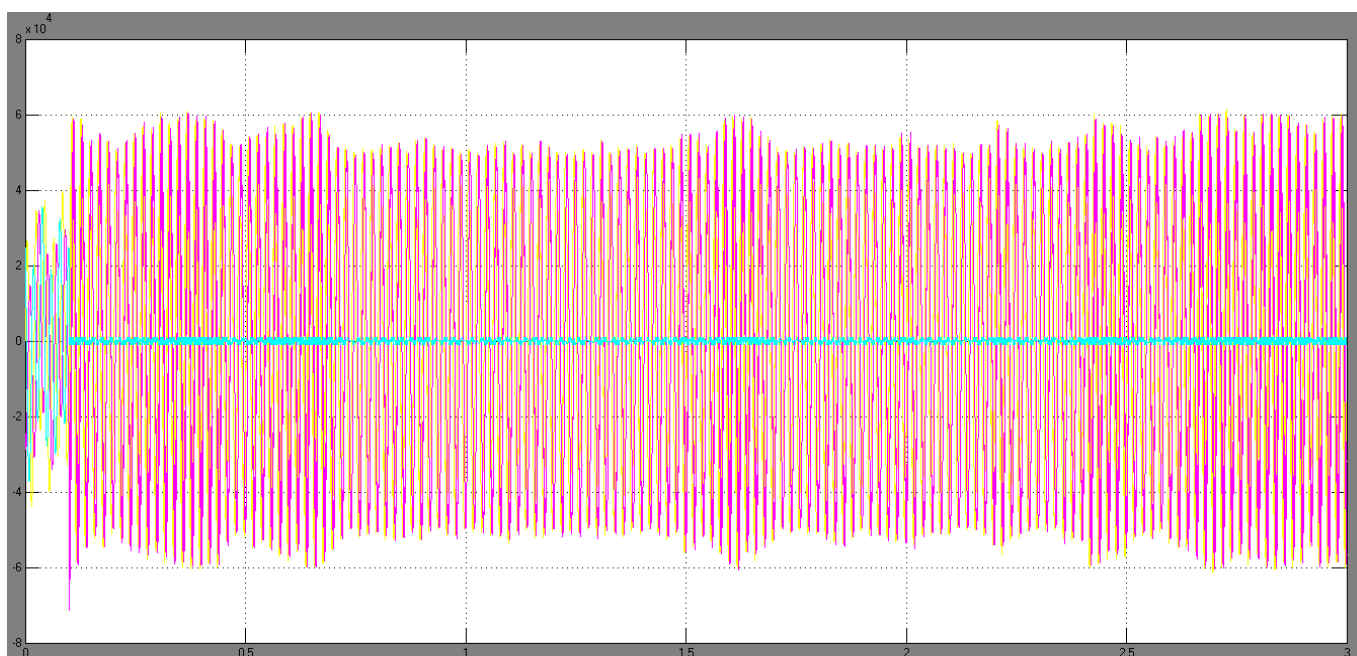


Рисунок 3.6. – Осцилограма перенапруг

Комбіноване заземлення нейтралі.

При комбінованому режимі роботи нейтралі вимикачі 1 та 2 замкнені. За результатами досліджень зображених на рис.3.7. бачимо, що максимальне значення перенапруг дорівнює $K_u=13,6$ при $C=1,35$ мкФ, що відповідає $I_c=25,5$ А.

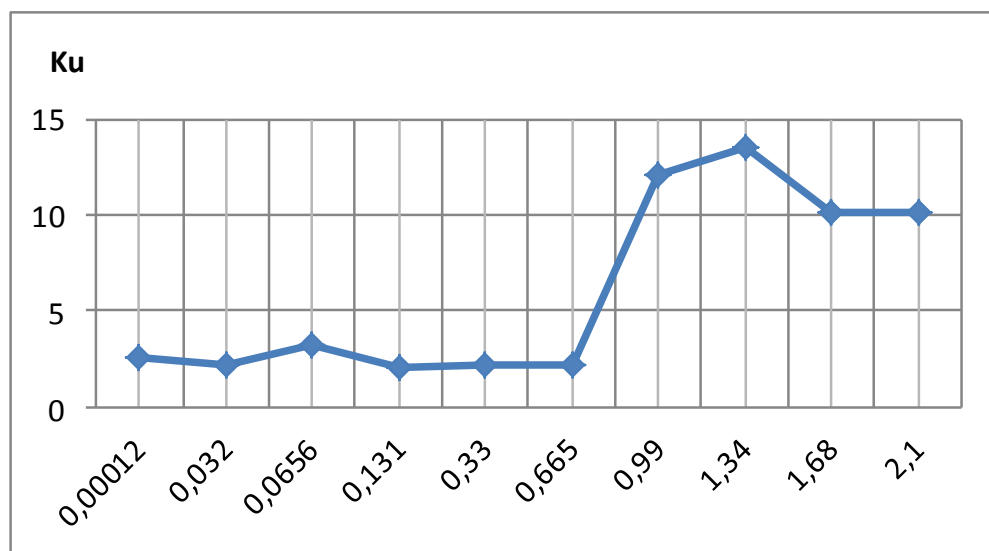


Рисунок 3.7. – Залежність K_u перенапруг від поперечної ємності

Осцилограма перенапруг при $C=1,34$ мкФ, $t=3$ зображена на рис. 3.8.

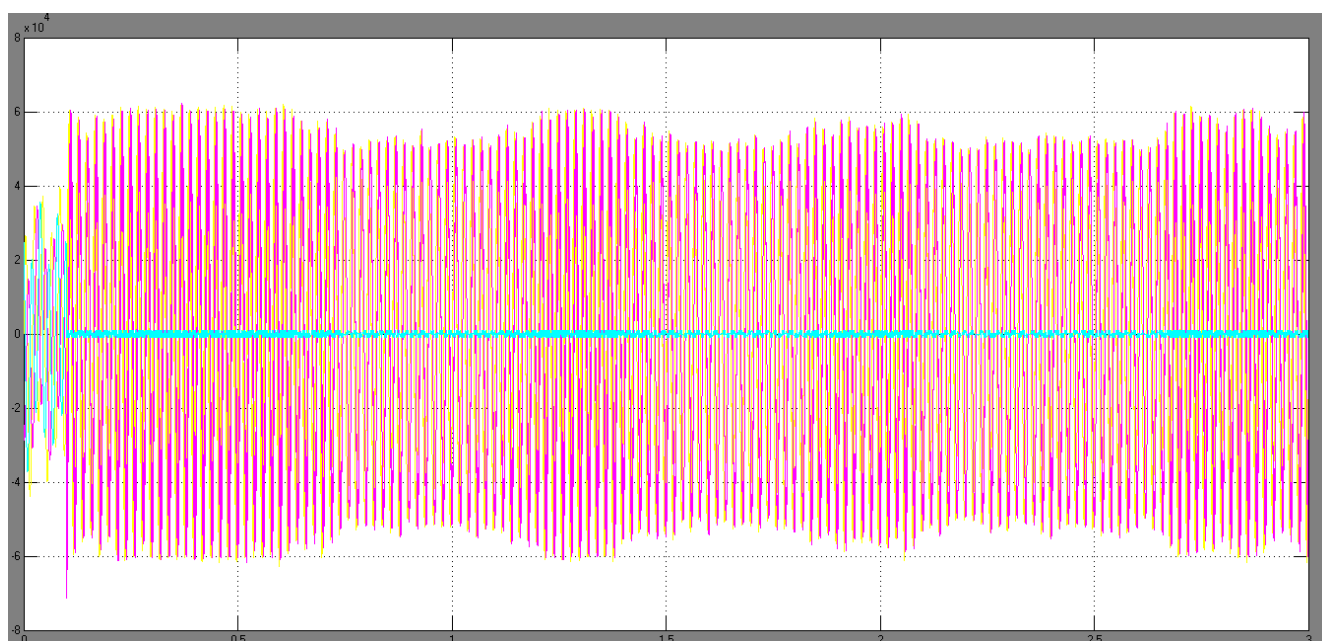


Рисунок 3.8. – Осцилограма перенапруг

3.2 Вплив напруги джерела живлення на дугові перенапруги в мережі

Мережа із ізольованою нейтраллю.

Протікання струму по елементам електричної мережі супроводжується втратами напруги. В результаті в міру віддалення від джерела живлення напруга зменшується. У той же час для нормальної роботи електроприймачів, напруга що підводиться до них може тільки незначно відрізнятися від номінальної напруги і має перебувати в допустимих межах. Досліди виконувались при $C=0,665$ мкФ.

Результати виконаних розрахунків рис.3.9. свідчать, про те що найбільші перенапруги $U_{пер}=58,39$ кВ виникають при відхиленні номінальної напруги до $U_e=0,925 \cdot U_{ном}$.

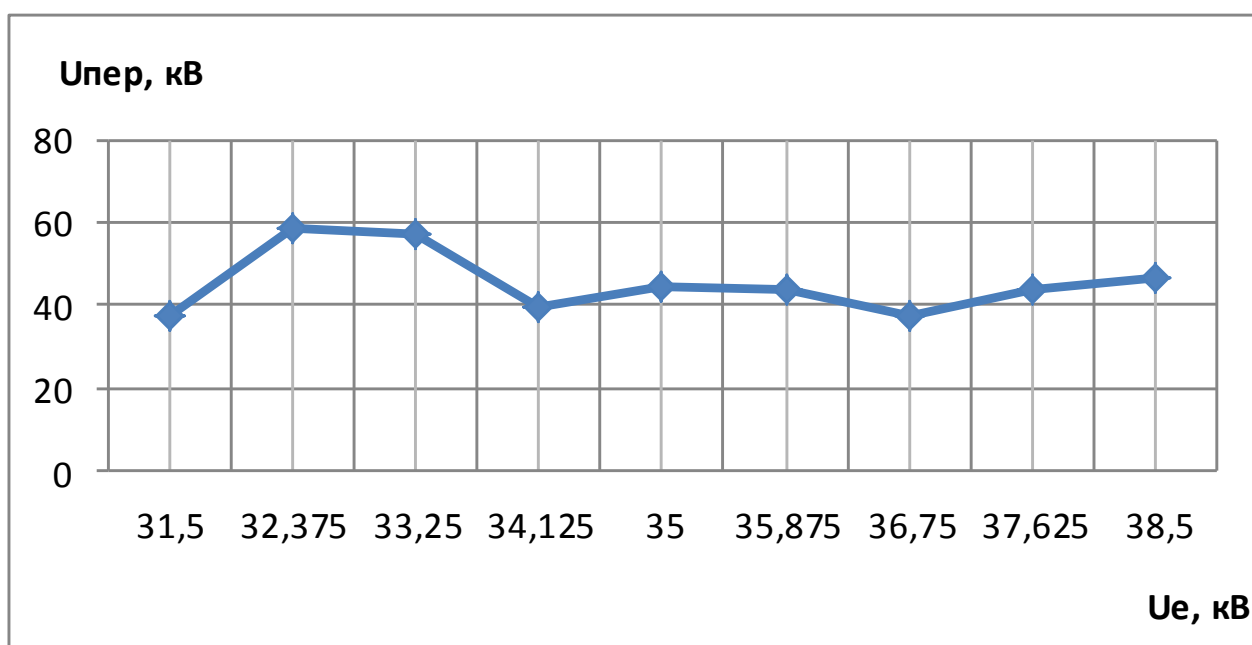


Рисунок 3.9. – Залежність перенапруг в мережі з ізольованою нейтраллю від напруги джерела живлення

Осцилограма перенапруг при $C=0,665$ мкФ, $t=3$ с зображена на рис.3.10.

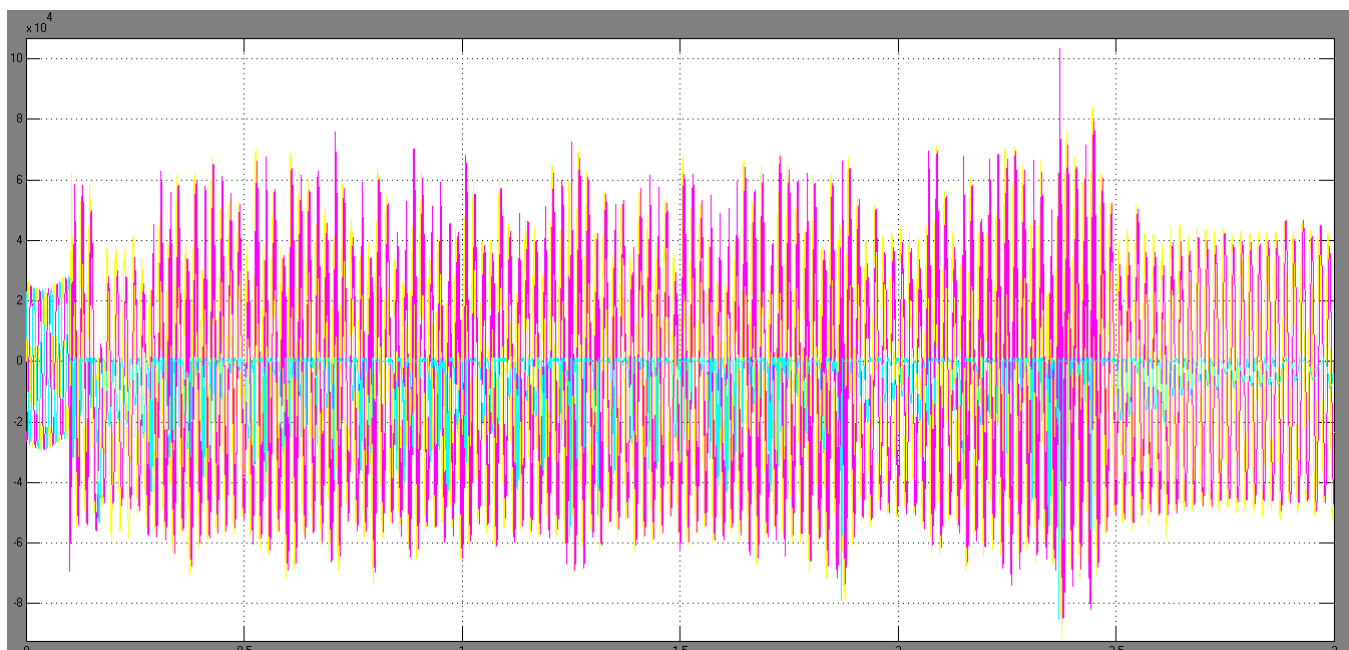


Рисунок 3.10. – Осцилограма перенапруг

Мережа із резистивно-заземленою нейтраллю.

При резистивному заземленні нейтралі бачимо на рис.3.11., що рівень перенапруг при зміні номінальної напруги від 0,9 до 1,1 $U_{ном}$ менший. Найбільші дугові перенапруги $U_{пер}=50,3$ кВ виникають при підвищенні номінальної напруги до $U_e=1,075 \cdot U_{ном}$

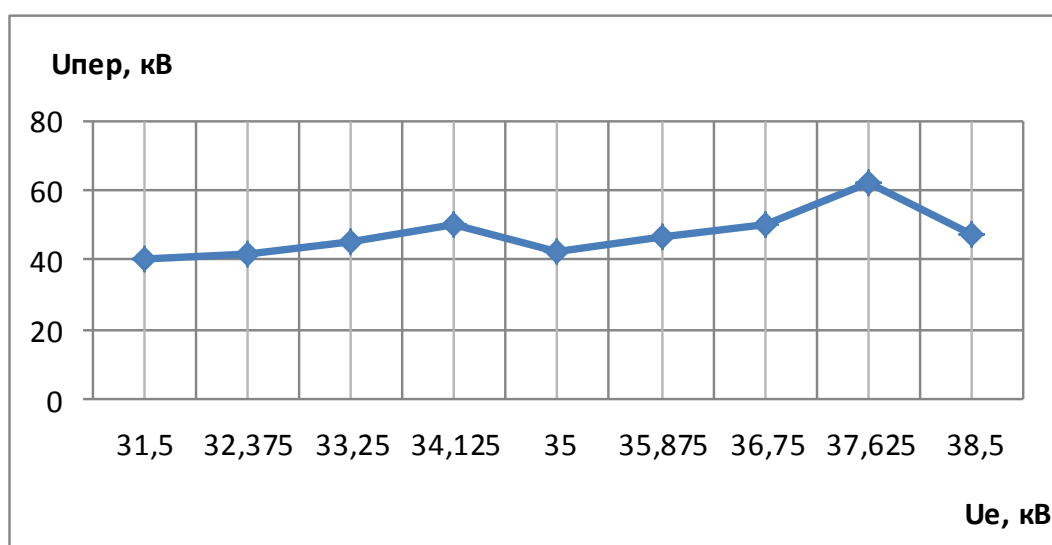


Рисунок 3.11. – Залежність перенапруг в мережі з резистивною нейтраллю від напруги джерела живлення

Осцилограма перенапруг зображена на рис.3.12. при резистивно-заземленій нейтралі, $C=0,665 \text{ мкФ}$, $t=3 \text{ с}$

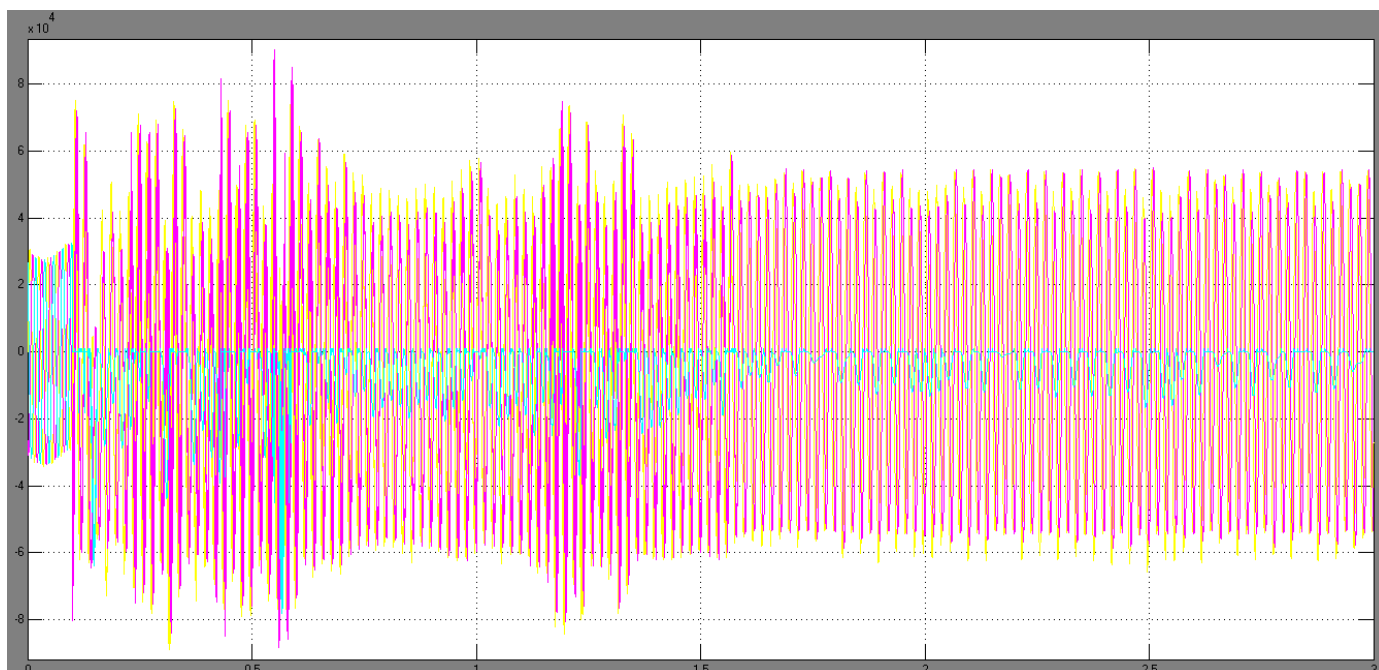


Рисунок 3.12. – Осцилограма перенапруг

Мережа із резонансно-заземленою нейтраллю.

Також були проведені дослідження перенапруг під час дугових замикань на землю із нейтраллю заземленою через дугогасний реактор.

За результатами досліджень зображених на рис.3.13. бачимо, що максимальне значення перенапруг дорівнює $U_{\text{пер}}=84,02 \text{ кВ}$ при $U_e=1,1 \cdot U_{\text{ном.}}$. В порівнянні з попередніми дослідженнями дана залежність має найбільші показники.

Осцилограма перенапруг зображена на рис.3.14. при резонансно заземленій нейтралі, $C=0,665 \text{ мкФ}$, $t=3 \text{ с}$

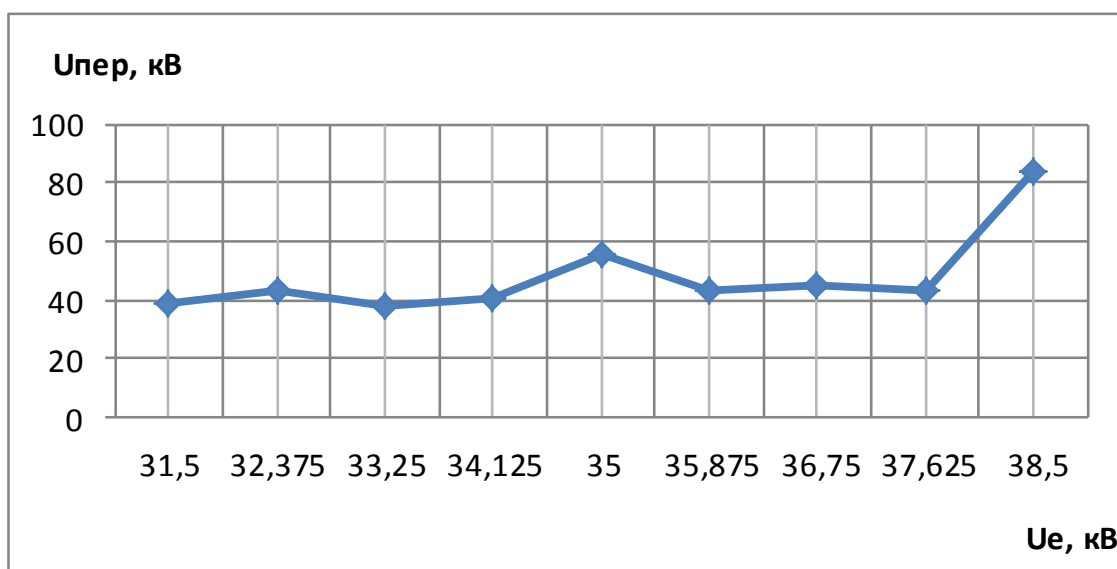


Рисунок 3.13. – Залежність перенапруг в мережі з резонансною нейтраллю від напруги джерела живлення

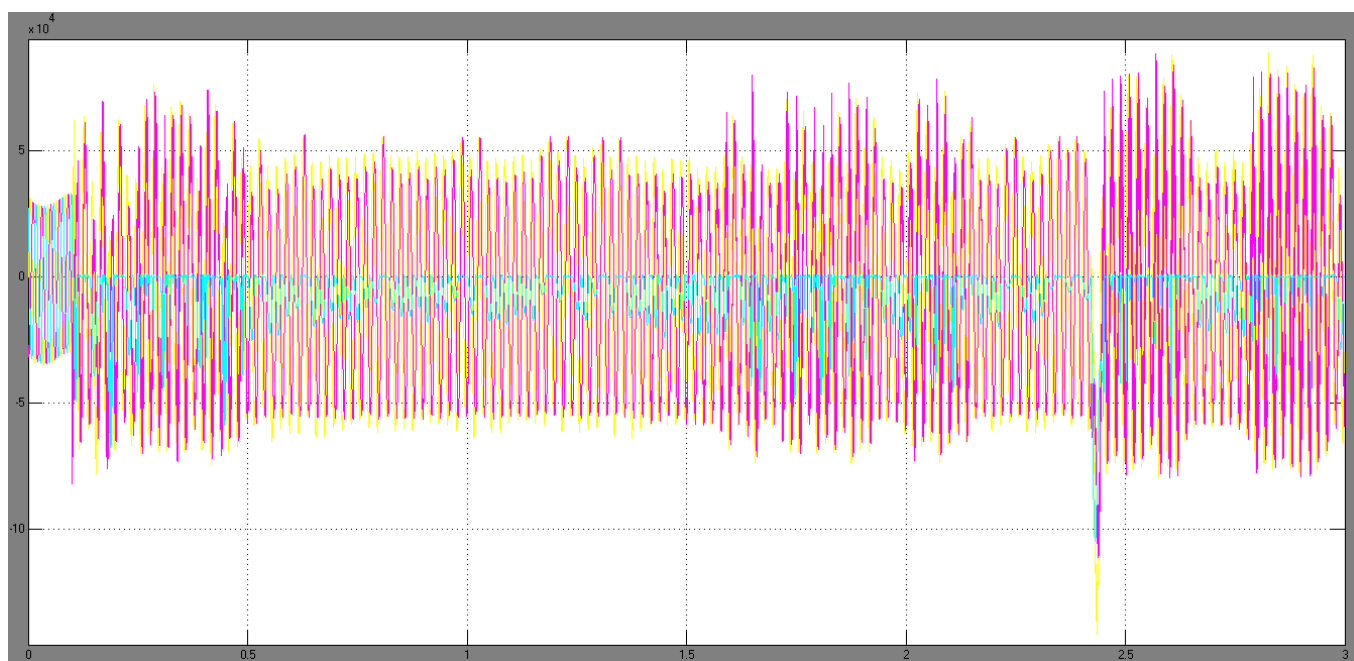


Рисунок 3.14. – Осцилограма перенапруг

Комбіноване заземлення нейтралі.

При комбінованому режимі роботи нейтралі залежність має нелінійний характер у порівнянні із попередніми дослідженнями. За результатами досліджень бачимо, що максимальне значення перенапруг дорівнює $U_{пер}=65,2$ кВ при $U_e=1,025 \cdot U_{ном}$, зображених на рис. 3.15.

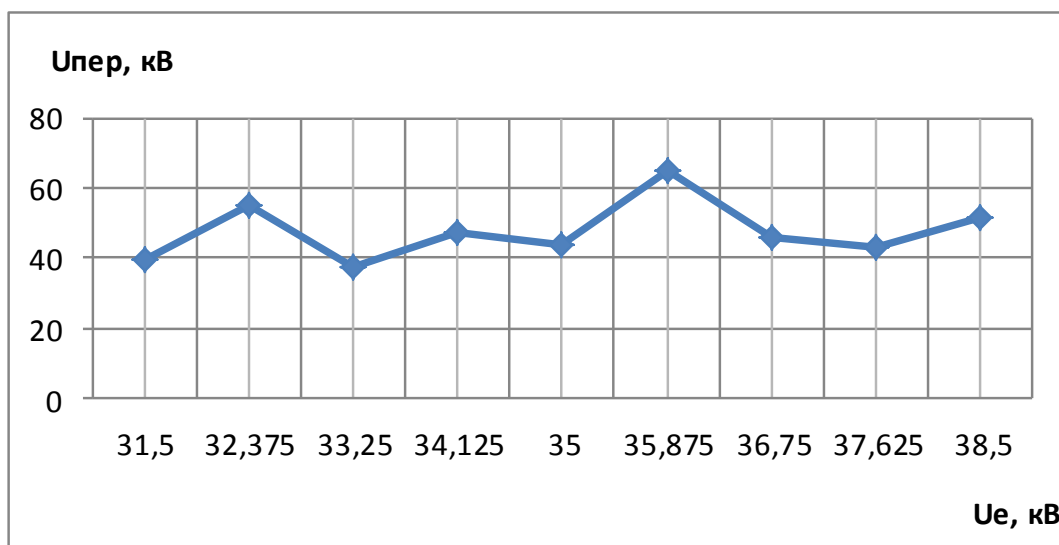


Рисунок 3.15. – Залежність перенапруг в мережі з комбінованою нейтраллю від напруги джерела живлення

Осцилограма перенапруг при комбінованій нейтралі, $C=0,665$ мкФ, $t=3$ с зображена на рис.3.16.

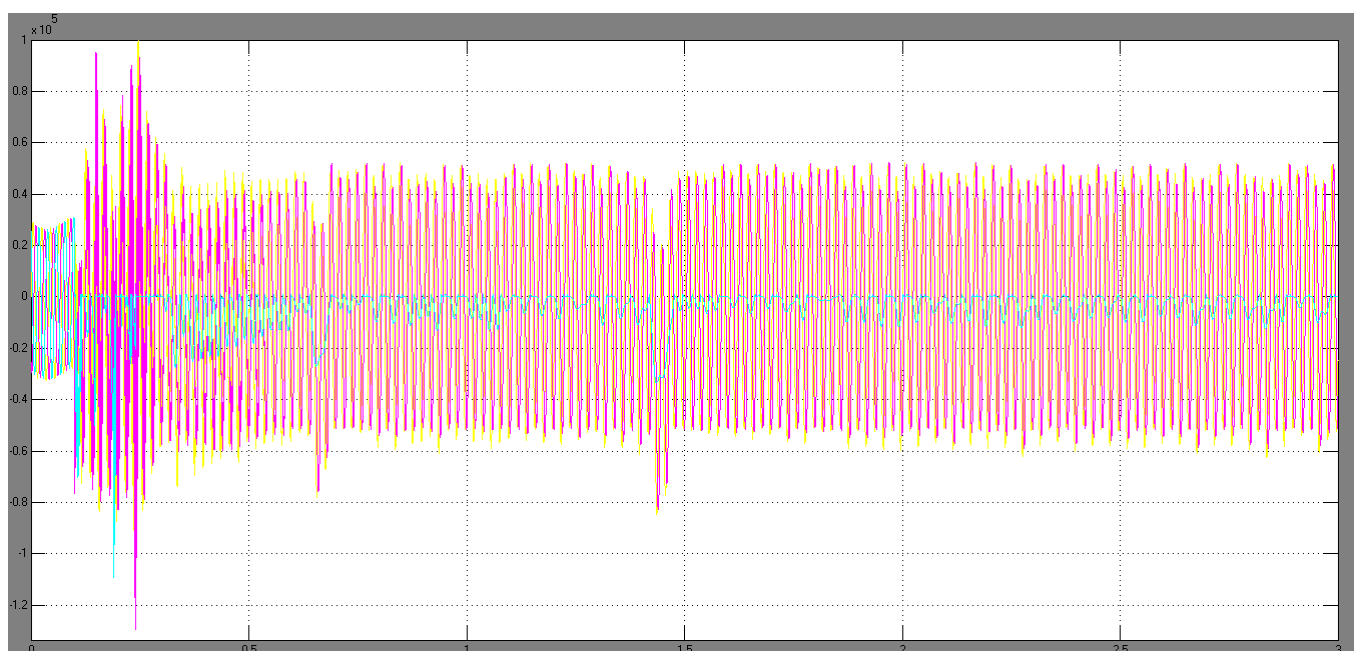


Рисунок 3.16. – Осцилограма перенапруг

3.3 Вплив поперечної ємності мережі на характер горіння заземлюючої дуги

За допомогою сформованої цифрової моделі виконано дослідження рівнів дугових перенапруг залежно від характеру горіння заземляючої дуги та способу заземлення нейтралі електромережі 35 кВ.

Мережа із ізольованою нейтраллю.

Результати виконаних розрахунків, зображених на рис. 3.17 свідчать, про те що найбільші кратності перенапруг $K=2,2$ виникають при полярному горінні дуги за ємності $C=1,68$ мкФ. Значення перенапруг при неполярному горінні дуги загалом менші для будь-яких значень поперечної ємності мережі у порівнянні з полярним характером горіння дуги.

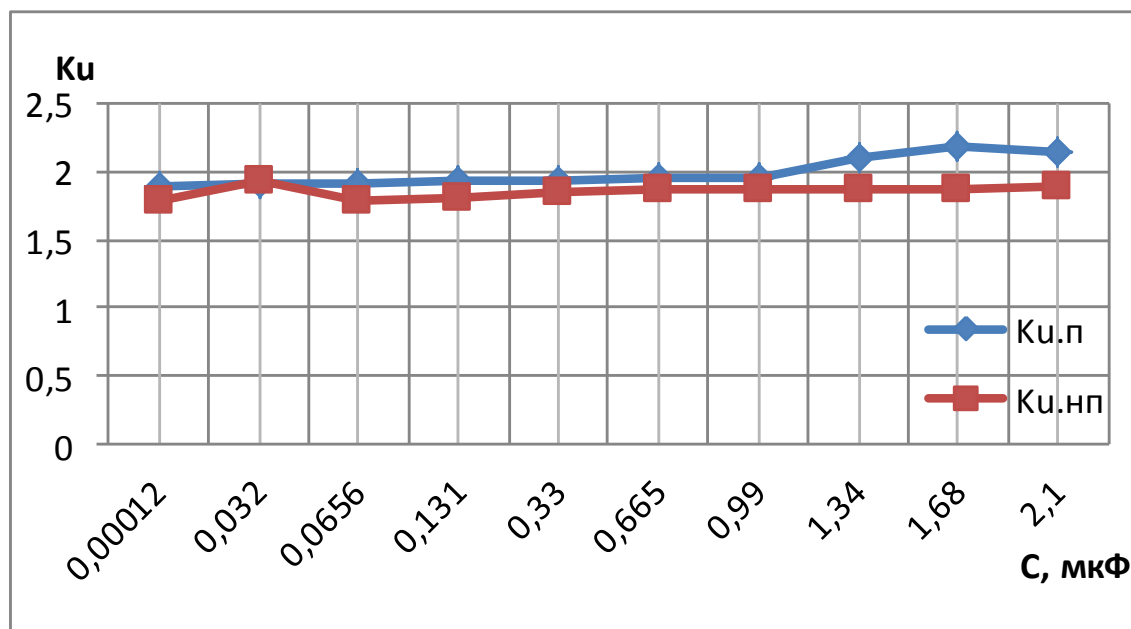


Рисунок 3.17. – Залежність кратності перенапруг в мережі з ізольованою нейтраллю від поперечної ємності та характеру горіння дуги

Осцилограма перенапруг для мережі з ізольованою нейтраллю, $C=1,68$ мкФ, $t=3$ с, зображена на рис.3.18.

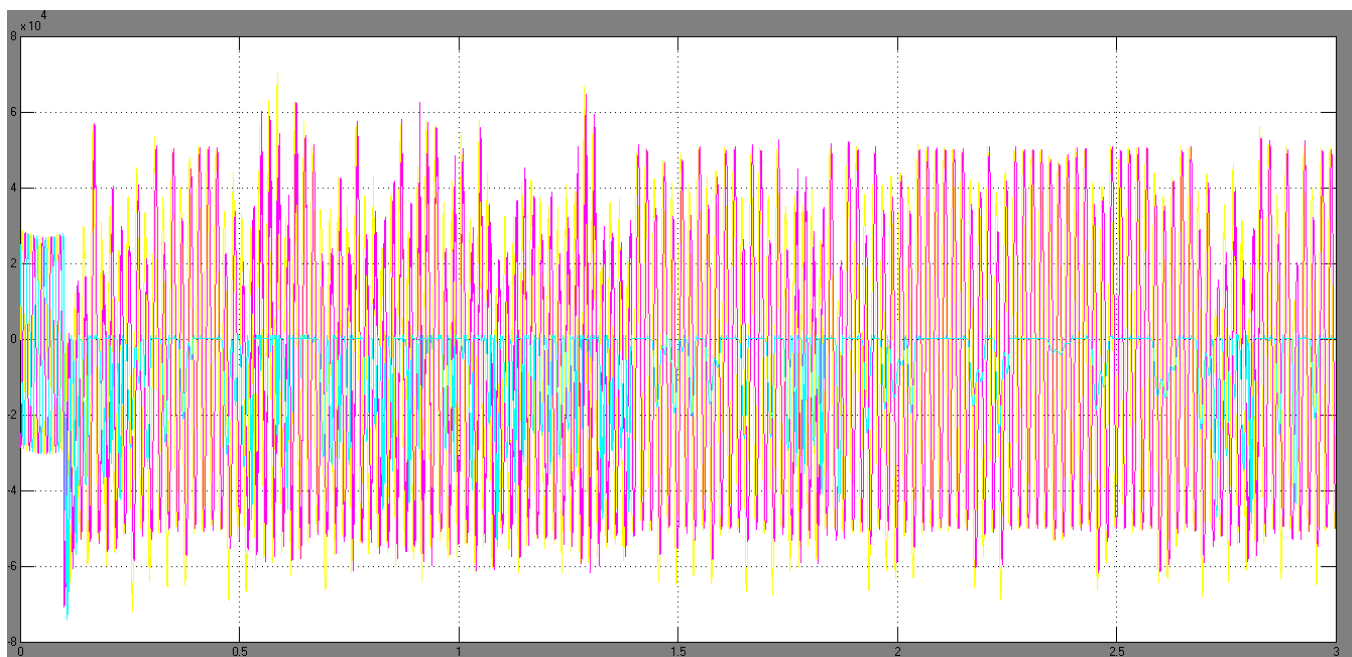


Рисунок 3.18. – Осцилограма перенапруг

Мережа із резистивно-заземленою нейтраллю.

При резистивному заземленні нейтралі бачимо, що кратність перенапруг зображена на рис. 3.19 досягає максимального значення $K_u=10,3$ при малому струмі замикання на землю ($C=1,68$ мкФ) та полярному горінні дуги. Знято показники осцилограми при найскладнішому дугового замикання, зображених на рис. 3.20.

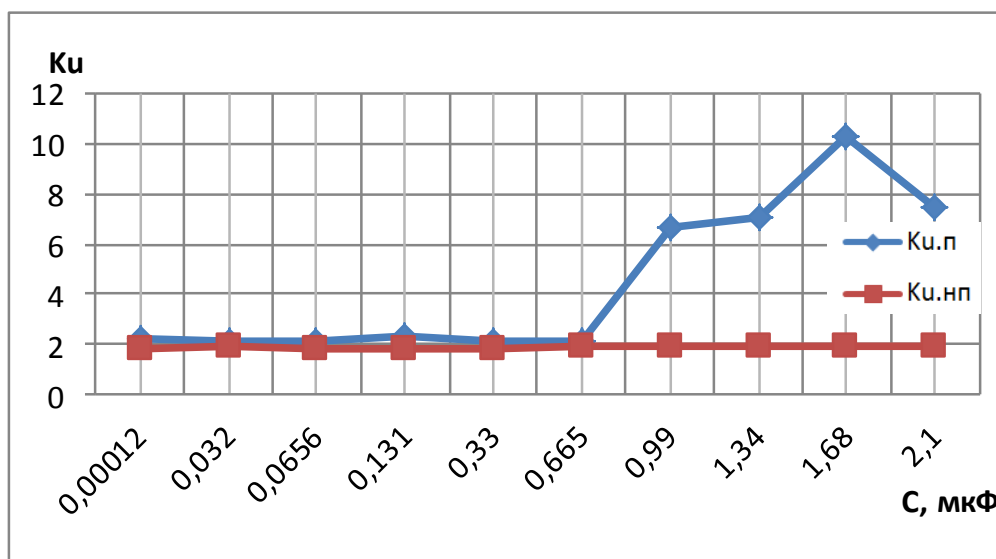


Рисунок 3.19. – Залежність кратності перенапруг в мережі з резистивною нейтраллю від поперечної ємності та характеру горіння дуги

Осцилограма перенапруг при резистивно заземленій нейтралі, $C=1,68$ мкФ.

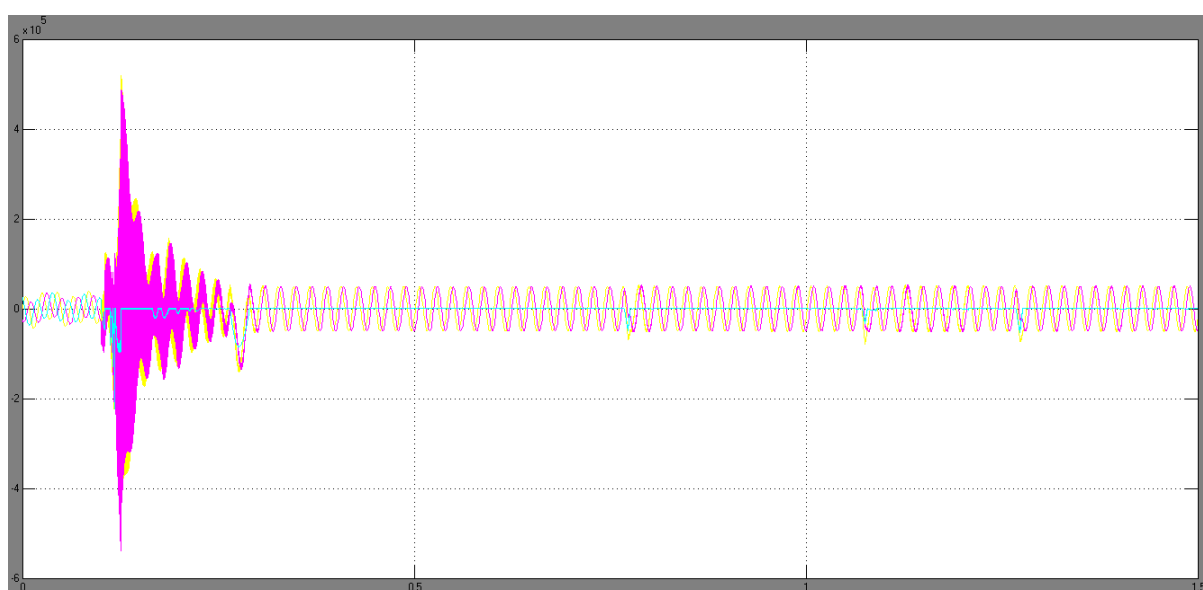


Рисунок 3.20. – Осцилограма перенапруг

Мережа із резонансно-заземленою нейтраллю.

За результатами досліджень на рис. 3.21 бачимо, що максимальне значення кратності перенапруг дорівнює $K_{и}=18,02$ при $C=1,68$ мкФ. Можна зробити висновок, що при неполярному характері горіння дуги в мережі виникають мешні перенапруги.

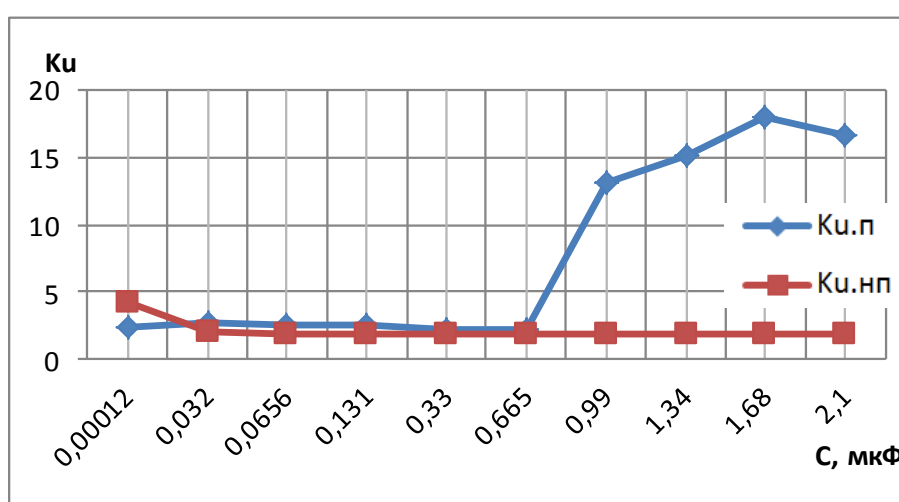


Рисунок 3.21. – Залежність кратності перенапруг в мережі з резонансною нейтраллю від поперечної ємності та характеру горіння дуги

Осцилограма перенапруг при резонансно заземленій нейтралі, $C=1,68$ мкФ, зображена на рис. 3.22.

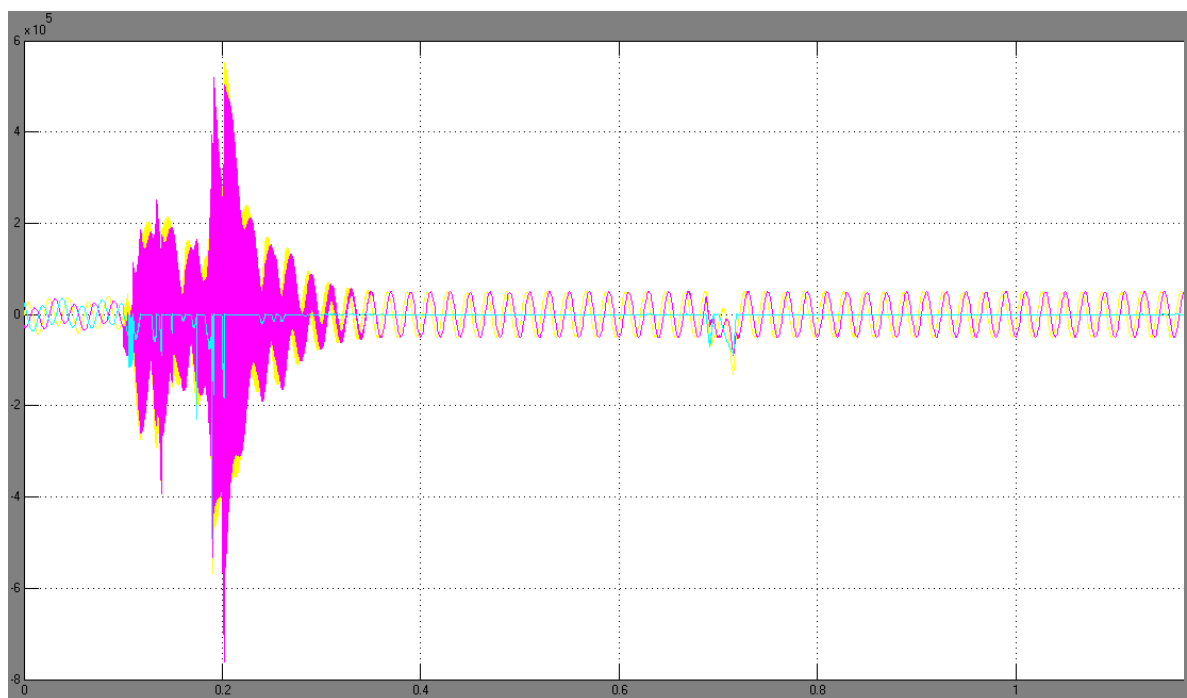


Рисунок 3.22. – Осцилограма перенапруг

Мережа з комбінованою нейтраллю

При комбінованому режимі роботи нейтралі найважчі умови роботи мережі виникають при малих поперечних ємностях та полярному горінні дуги ($K_u=17,01$, $C=1,68$ мкФ). Результати зображені на рис. 3.23.

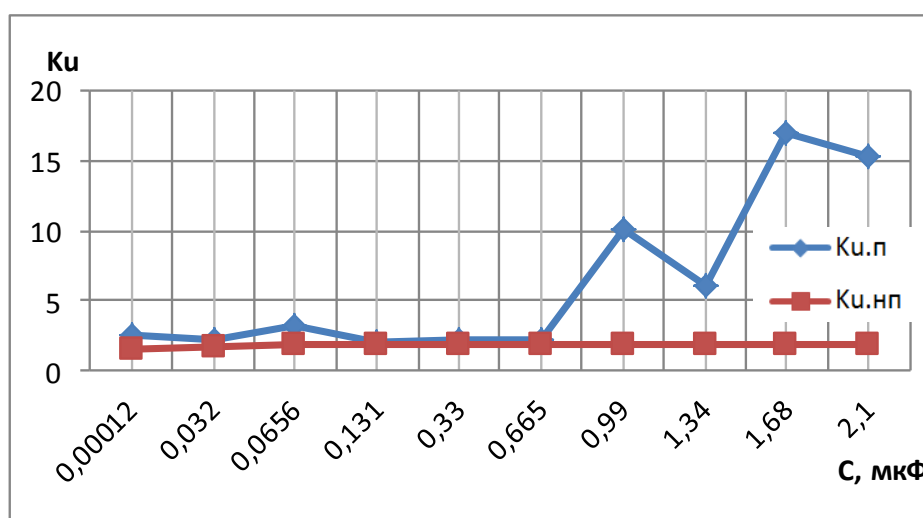


Рисунок 3.23. – Залежність кратності перенапруг в мережі з комбінованою нейтраллю від поперечної ємності та характеру горіння дуги

Осцилограма перенапруг при комбінованій нейтралі ($C=1,68$ мкФ), зображена на рис. 3.24.

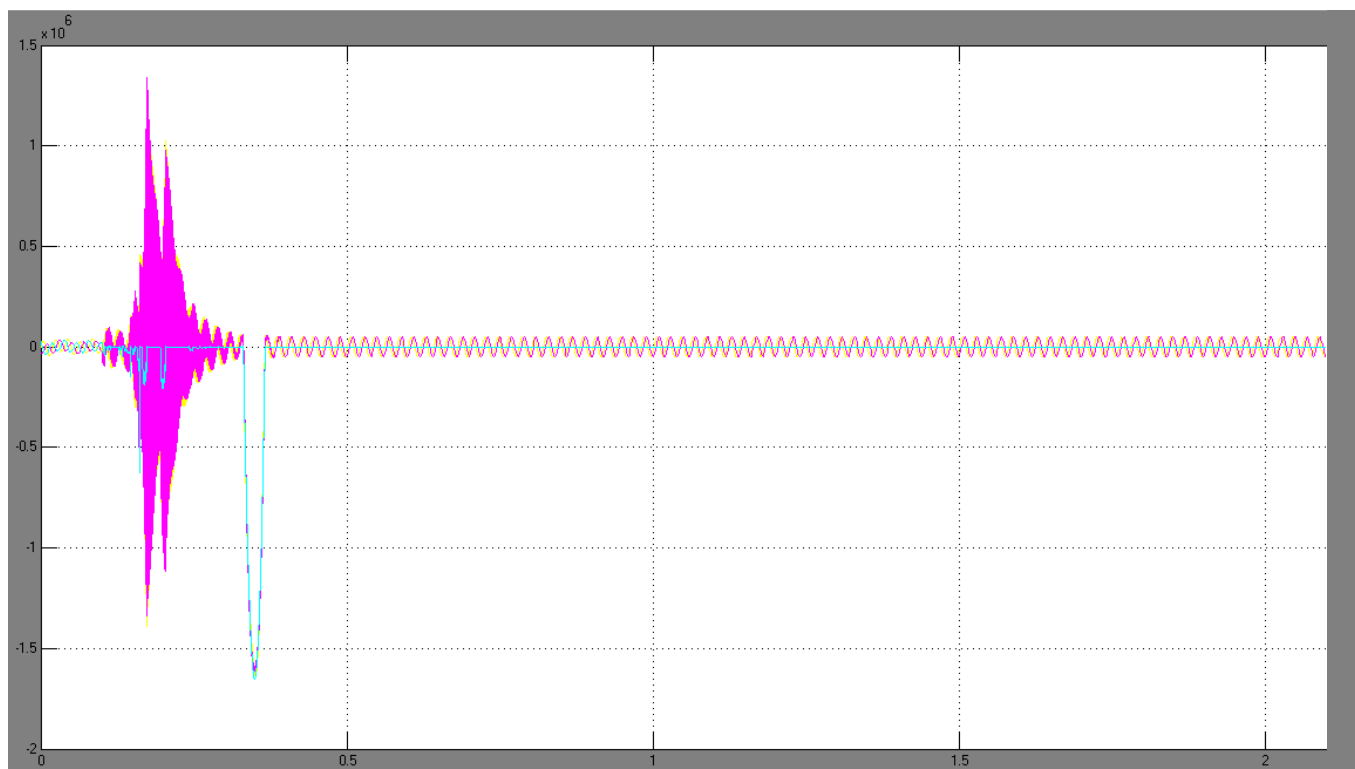


Рисунок 3.24. – Осцилограма перенапруг

3.4 Вплив поперечної ємності на характер горіння заземлюючої дуги при включенні в мережу антирезонансних ТН

Мережа із ізольованою нейтраллю.

Антирезонансні трансформатори напруги широко використовуються у мережах з ізольованою нейтраллю, тому доцільно розглянути вплив поперечної ємності на характер зміни перенапруг в мережі при різних режимах роботи нейтралі.

Результати виконаних розрахунків свідчать, про те що найбільші кратності перенапруг $K=3,2$ виникають при поперечній ємності $C=0,665$ мкФ. Загалом перенапруги для всіх ємностей перевищують $U_{ном}$ в 2..3 рази. Результати зображено на рис. 3.25.

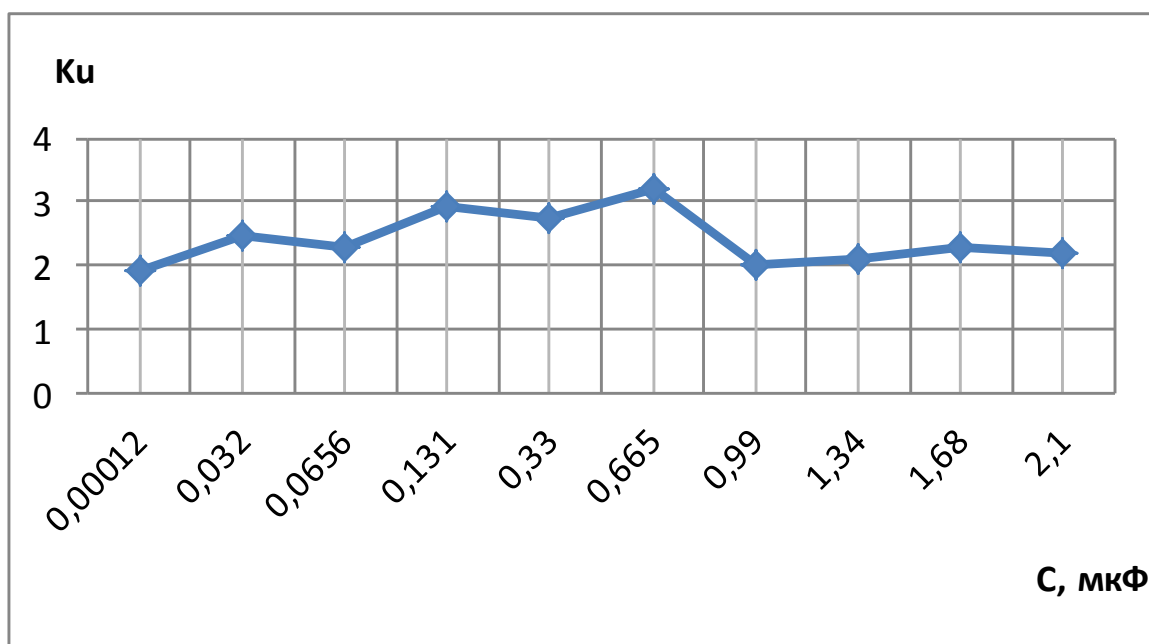


Рисунок 3.25. – Залежність кратності перенапруг в мережі з ізольованою нейтраллю від поперечної ємності

Осцилограма перенапруг для мережі з ізольованою нейтраллю $C=0,665$ мкФ, $t=3$ с зображена на рис. 3.

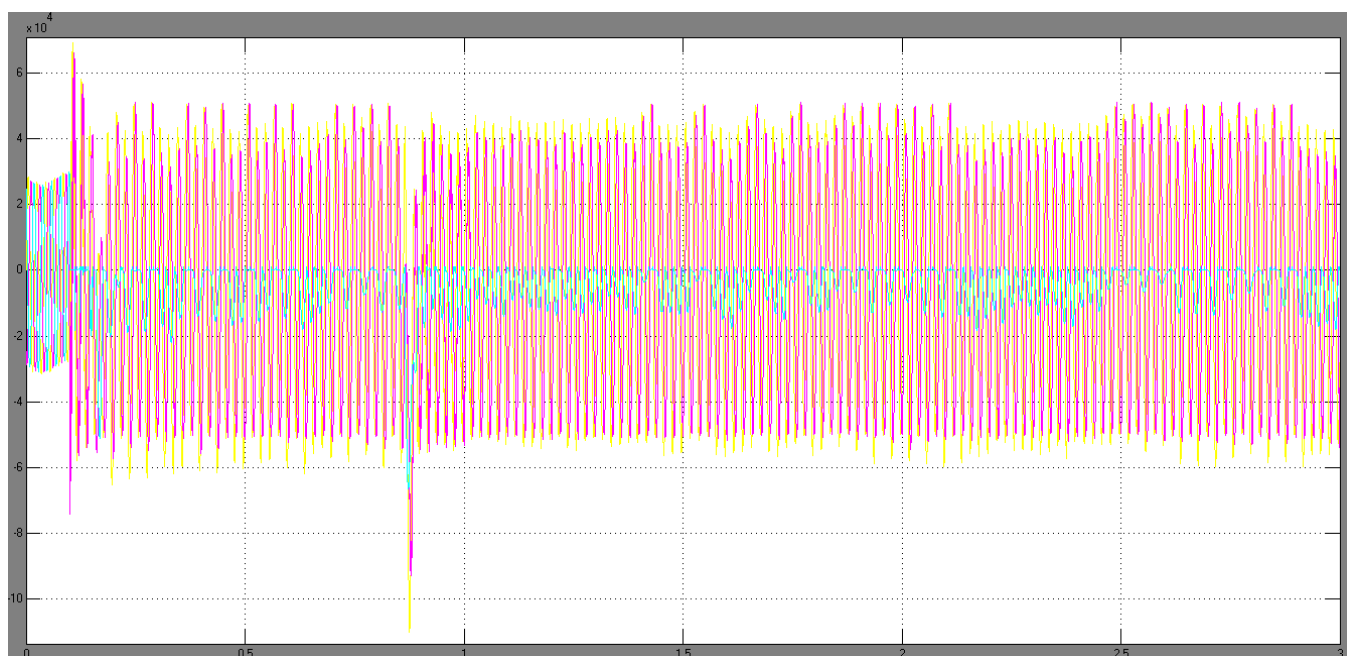


Рисунок 3.26. – Осцилограма перенапруг

Мережа з резистивною нейтраллю.

При резистивному заземленні нейтралі та включенні антирезонансних ТН бачимо, що кратність перенапруг досягає максимального значення $K_u=7,01$ при

струмі замикання на землю ($C=1,68$ мкФ) зображена на рис. 3.7. Знято показники осцилограми при найскладнішому дуговому замиканні.

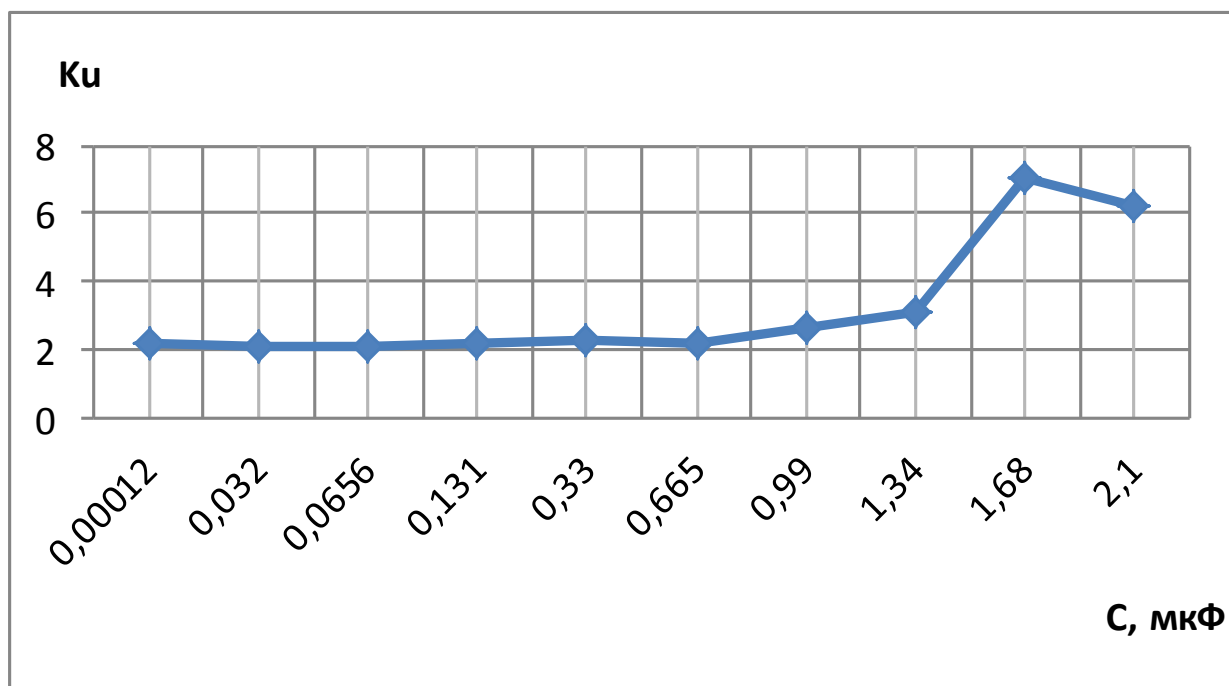


Рисунок 3.27. – Залежність кратності перенапруг в мережі з резистивною нейтраллю від поперечної ємності

Осцилограма перенапруг при резистивно заземленій нейтралі, $C=1,68$ мкФ, зображена на рис. 3.28.

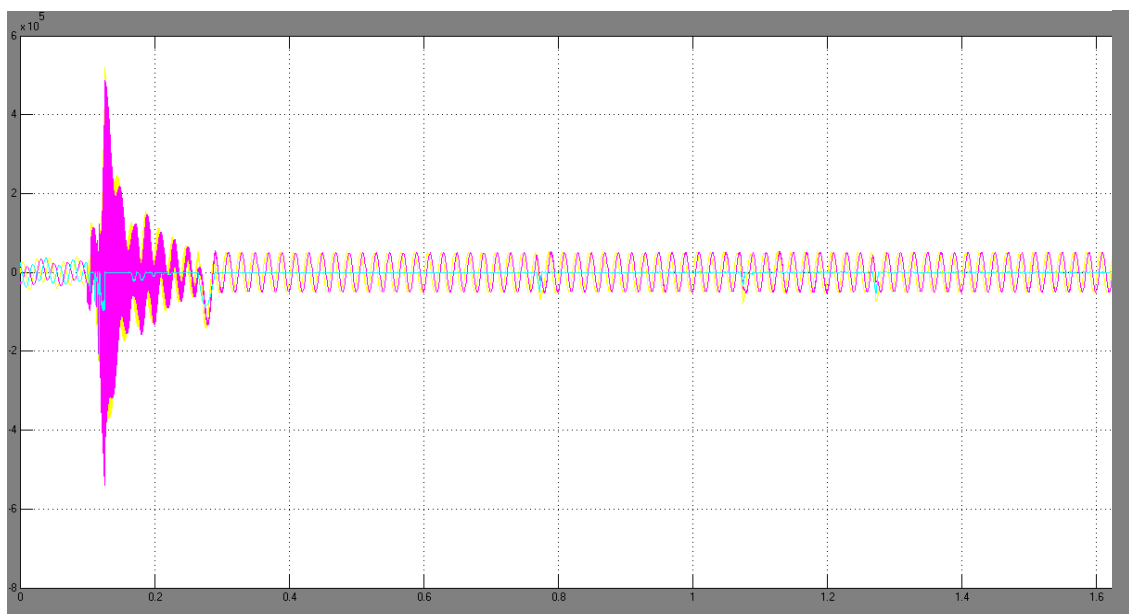


Рисунок 3.28. – Осцилограма перенапруг

Мережа з резонансною нейтраллю.

За результатами досліджень бачимо, що максимальне значення кратності перенапруг дорівнює $K_i=12,6$ при $C=2,1$ мкФ.. Діапазон перенапруг K_i в межах 2,08..12,6 зображено на рис. 3.29.

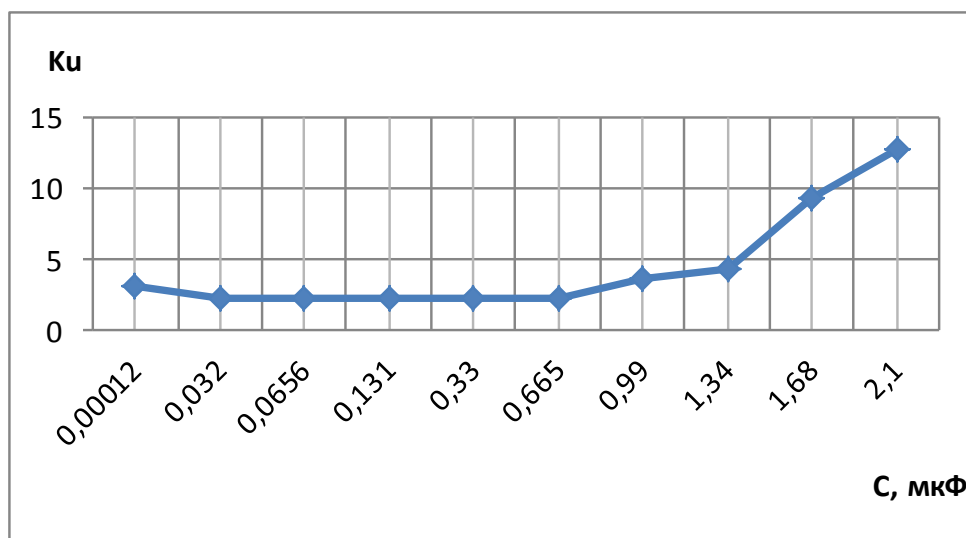


Рисунок 3.29. – Залежність кратності перенапруг в мережі з резонансною нейтраллю від поперечної ємності

Осцилограма перенапруг при резонансно заземленій нейтралі, $C=2,1$ мкФ.

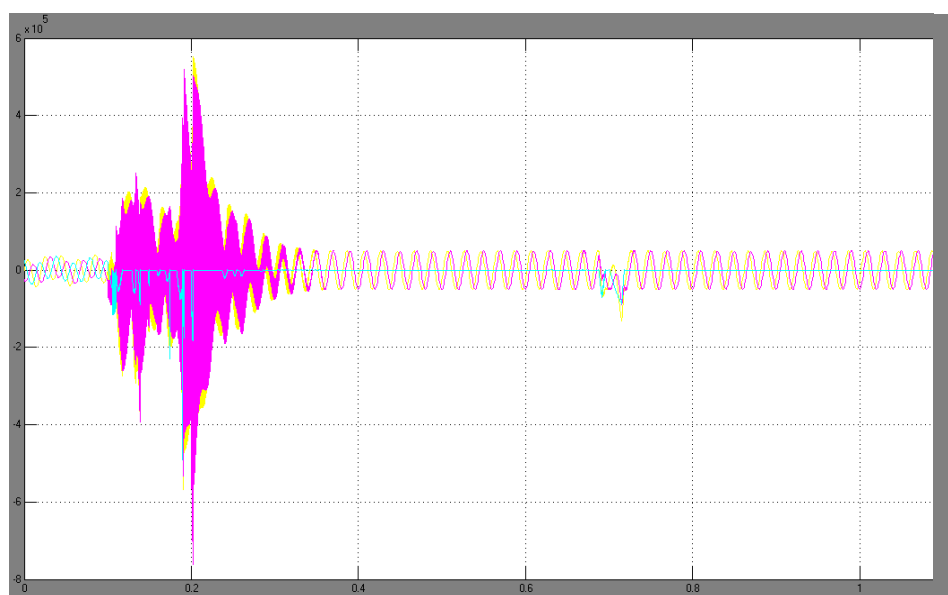


Рисунок 3.30. – Осцилограма перенапруг

При комбінованому режимі роботи нейтралі найважчі умови роботи мережі виникають при малих поперечних ємностях $K_u=20,1$, $C=1,68$ мкФ зображено на рис. 3.31.

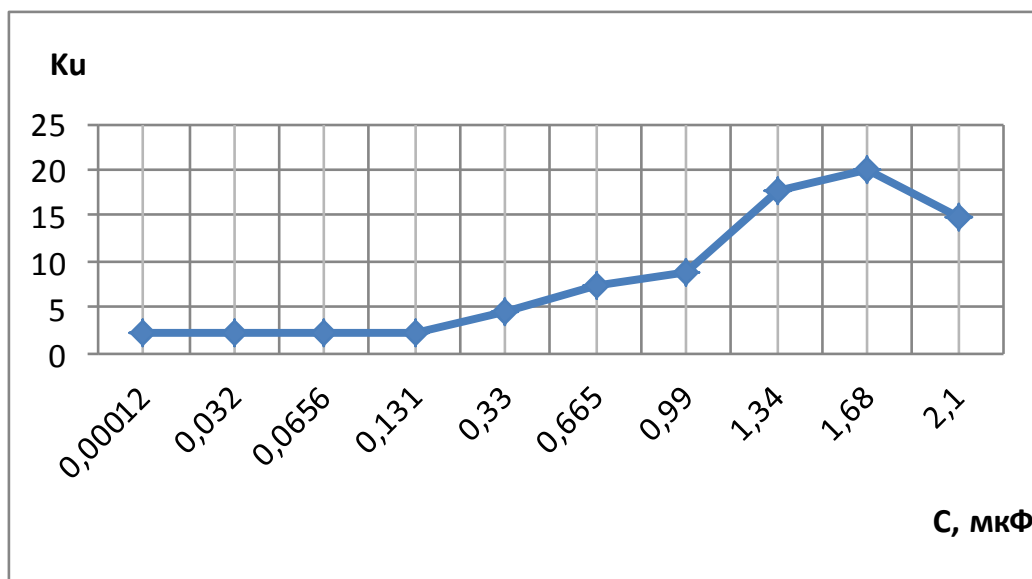


Рисунок 3.31. – Залежність кратності перенапруг в мережі з комбінованою нейтраллю від поперечної ємності

Осцилограма перенапруг при комбінованій нейтралі, $C=1,68$ мкФ, зображена на рис. 3.32.

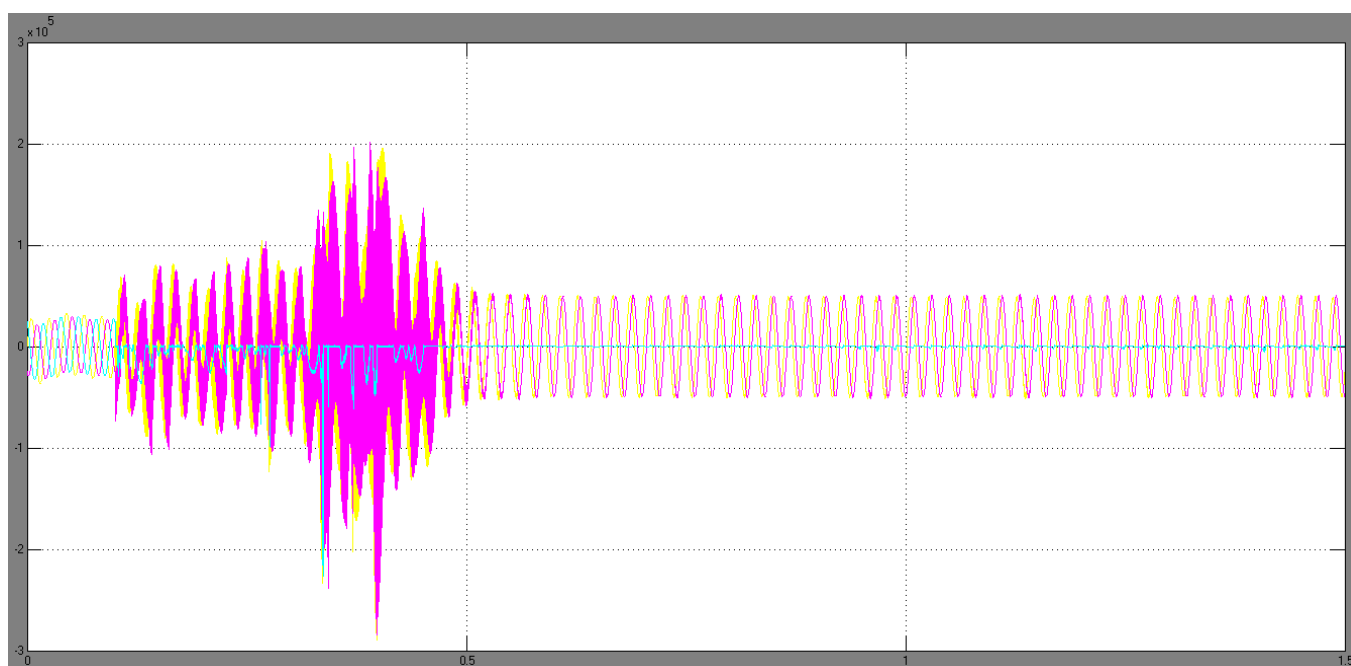


Рисунок 3.32. – Осцилограма перенапруг

Висновки до розділу 3

Найбільші значення дугових перенапруг спостерігаються в електромережі з ізольованою нейтраллю. Дослідження перенапруг за резонансного заземлення нейтралі показують, що значного зниження величин дугових перенапруг можна досягти лише для випадку практично ідеального резонансного налаштування. Застосування високоомного резистивного заземлення нейтралі забезпечує значне зниження рівнів дугових перенапруг, практично до значень, безпечних для ізоляції електроустаткування незалежно від характеру горіння заземлюючої дуги та величини ємнісного струму замикання на землю (тобто конфігурації електромережі). Єдиним важливим недоліком високоомного резистивного заземлення є складність конструкції заземлюючого резистора, який повинен витримувати тривалу дію робочої фазної напруги електромережі, що обумовлює його високу вартість та необхідність експлуатаційного обслуговування. Експлуатація електричних мереж з резонансним або резистивним заземленням нейтралі забезпечує усунення явища ферорезонансу, причому, резонансне заземлення нейтралі сприяє швидшому та плавнішому згасанню перехідного процесу під час обриву замикання фази на землю.

ВИСНОВКИ

В дисертації розглянуто процес однофазних дугових замикань на землю, їх вплив на повітряні лінії електропередавання, а також режими роботи нейтралі, як засіб підвищення надійності роботи мережі. Проведено моделювання режимів роботи нейтралі та вплив на неї поперечних ємностей при дугових замиканнях. Сформовано рекомендації щодо вибору оптимальних режимів роботи нейтралі при різних дугових перенапругах в мережі.

У магістрській дисертації описувались насупні елементи електричної мережі, які були змодельовані у середовищі MATLAB: електрична мережа середнього класу напруги, електромагнітний трансформатор напруги, чотири режими роботи нейтралі (ізольована, резонансно-заземлена, резистивно-заземленої нейтраль, а також комбіноване заземлення нейтралі) та модель дугового замикання на землю. Безперечною перевагою MATLAB/Simulink є можливість побудови моделей складних електротехнічних систем на основі методів імітаційного та функціонального моделювання.

Одним зі способів зменшення рівнів внутрішніх перенапруг в електромережах є зміна режиму заземлення нейтралі. При збільшенні довжини живлячого кабелю кратність комутаційних перенапруг знижується незалежно від режиму роботи нейтралі. заземлення нейтралі через дугогасний реактор також ефективно знижує рівні дугових перенапруг, але при роз лаштуванні компенсації може спостерігатись значний ріст перенапруг, особливо при перекомпенсації.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Селиванов В. Н. Исследование феррорезонансных колебаний в воздушных сетях 35 кВ с изолированной нейтралью с электромагнитными трансформаторами напряжения: дисс.на соискание уч. степени канд. техн. наук: – К., 2003. – 178 с.
2. Собчук В.С., Собчук Н.В., Бурикін О.Б. Перенапруги і блискавкозахист в електричних системах. Навчальний посібник. — Вінниця : Вінницький національний технічний університет (ВНТУ), 2010. — 145 с.
3. Яцейко А.Я., Козак К.В. Вплив режиму роботи нейтралі електромережі 6-35 кВ на рівні внутрішніх перенапруг // Львівська політехніка. – 2013. – с. 25-32.
4. Масляк Р.Я. Феррорезонансні процеси та захист трансформаторів напруги в електричних мережах 6-35 кВ. Дисертація на здобуття наукового ступеня к.т.н. – 2014. – 188 с.
5. Бесараб О.Б., Тугай Ю.І. Моделювання феррорезонансного процесу в трансформаторі напруги прямим методом // Праці Інституту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – 2011. – Вип. 30. – С. 87–90.
6. Stosur M., Piasecki W., Florkowski M., Fulczyk M. ATP/EMTP Study of Ferroresonance Involving HV Inductive VT and Circuit Breaker Capacitance // Power Quality and Utilization, Journal – 2008. – Vol. XIV, No. 2. – P. 49–52.
7. Бессонов Л.А. Электрические цепи со сталью. – М.Л.: Госэнергоиздат, 1946. – 171с.
8. Chan J.H., Vladimirescu A., Gao X.C., Liebmann P., Valainis J. Nonlinear Transformer Model for Circuit Simulation // IEEE transactions on computer-aided design. – 1991. – Vol. 10, 4 – P. 476–482.
9. Jiles D.C., Atherton D.L. Theory of ferromagnetic hysteresis // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1986. – Vol. 61. – P. 48–60.
10. Амелин С.А., Новиков А.А., Строев К.Н. Модификация модели Джилса-Атертона для учета частотных свойств ферромагнетиков. // Электричество. – 1995. – №11. – С. 60–63.

11. Тугай Ю.І., Бесараб О.Б. Модель електромагнітного трансформатора напруги для дослідження ферорезонансних процесів // Енергетика та електротехніка, 2016. – с. 45-50.
12. Лаптев О.И. Исследование эффективности антирезонансных трансформаторов напряжения типа НАМИ в электрических сетях высокого и среднего напряжений: Диссертация на соискание уч. ст. к.т.н. – 2007. – 246 с.
13. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х. : Видавництво «Форт», 2017. – 760 с.
14. Яцейко А., Горошко О. Дослідження перенапруг під час дугових замикань на землю в електромережах 35 кВ // Енергетика та системи керування : матеріали IV Міжнародної конференції молодих вчених ERECS-2013, 21–23 листопада 2013 року, Україна, Львів / Національний університет "Львівська політехніка". – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. – С. 12–15.
15. Верещаго Е.Н., Костюченко В.И. Модель электрической дуги в MATLAB/SIMULINK //Електротехніка та електроенергетика, № 2. ISSN 1607-6761, 2013 – с. 40-46.
16. Vepryk Yu. N., Lebedka S. N., Petrovskyj M. V. “Perenapryazheniya v elektrycheskyh setyah 6-35 kV i sovremennye sredstva yih ogranycheniya pry zamykanniah na zemlyu” // The surges in electrical networks 6-35 kV and modern means of limiting earth fault. Journal of SumSU. Series of technical science, vol. 4, 2008 – pp. 59-69
17. Myronov Y. Mode of neutral grounding in networks 6-35 kV. Do we have to give up the compensation capacitor current ground fault? // Electrical news vol. 6(24), 2003. – Available: <http://www.news.elteh.ru/arh/2003/24/>. [Accessed: Feb. 10, 2013].
18. Кондрашов В. Е., Королев С. Б. MATLAB как система научных технических расчетов. – М. : МИР, 2002. – 633 с.