

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва транспорту та енергетики
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЕШКОВ
“ ____ ” _____2025р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему
“Дослідження ефективності резистивного заземлення
нейтралі в кабельних мережах напругою 6-10 кВ”

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-24М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141
«Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»
_____Балаєнко К.О.
« ____ » _____2025р.

Керівник роботи
к.т.н., доцент
_____Андрій КОТИШ
« ____ » _____2025р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет Будівництва транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ *Плешков П.Г.*

«_____» _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА
ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ
ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Балаєнка Кирила Олексійовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) *Дослідження ефективності резистивного заземлення нейтралі в кабельних мережах напругою 6- 10 кВ*

Research on the effectiveness of resistive neutral grounding in 6-10 kV cable networks

2. Керівник роботи (проекту)

Котвиш Андрій Іванович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту)

Вступ; 1. Існуючі режими заземлення нейтралі в електричних мережах 6 – 10 кВ; 2. Дослідження процесів ОЗЗ в кабельних мережах 6-10 кВ; 3. Ефективність резистивного заземлення нейтралі в кабельних мережах 6-10 кВ; 4. Охорона праці; Висновки; Перелік посилань.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Іван САВЕЛЕНКО</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
<i>1</i>	<i>Вступ</i>	<i>08.10.25</i>	
<i>2</i>	<i>Існуючі режими заземлення нейтралі в електричних мережах 6 – 10 кВ</i>	<i>16.10.25.</i>	
<i>3</i>	<i>Дослідження процесів ОЗЗ в кабельних мережах 6-10 кВ</i>	<i>30.10.25.</i>	
<i>4</i>	<i>Ефективність резистивного заземлення нейтралі в кабельних мережах 6-10 кВ</i>	<i>15.11.25</i>	
<i>5</i>	<i>Охорона праці</i>	<i>26.11.25.</i>	
<i>6</i>	<i>Висновки</i>	<i>01.12.25</i>	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2025 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2025 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 81 с.; 41 рис.; 12 табл.; 18 джерел.

Балаєнко К.О. Дослідження ефективності резистивного заземлення нейтралі в кабельних мережах напругою 6-10 кВ. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». Центральноукраїнський національний технічний університет. Кропивницький, 2025 р.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження ефективності резистивного заземлення нейтралі в кабельних мережах напругою 6–10 кВ з метою підвищення надійності, електробезпеки та стійкості роботи мережі при однофазних замиканнях на землю, а також визначення оптимальних параметрів резистора заземлення для мінімізації рівня перенапруг.

У роботі проведено дослідження ефективності застосування резистивного заземлення нейтралі в кабельних електричних мережах напругою 6–10 кВ. Проаналізовано принцип дії системи, її вплив на режими однофазних замикань на землю, рівень перенапруг та надійність роботи ізоляції. Показано, що резистивне заземлення забезпечує зменшення струмів замикання на землю, підвищує електробезпеку та сприяє стабільній роботі мережі. Наведено порівняння з мережами з ізольованою та компенсованою нейтраллю, що дозволило визначити оптимальні умови застосування резистивного заземлення для сучасних кабельних мереж середньої напруги.

Ключові слова: кабельні електричні мережі, резистивне заземлення нейтралі, кратність перенапруг, замикання на землю, заземлюючий резистор

SUMMARY

Balaienka K.O. Research on the effectiveness of resistive neutral grounding in 6-10 kV cable networks. 141 "Electric power, electrical engineering and electromechanics" EPP, "Electrical power consumption systems". Central Ukrainian National Technical University. Kropyvnytskyi, 2025.

The purpose of the qualification work is to study the effectiveness of resistive neutral grounding in cable networks with a voltage of 6–10 kV in order to increase the reliability, electrical safety and stability of the network during single-phase ground faults, as well as to determine the optimal parameters of the grounding resistor to minimize the level of overvoltage.

The work conducted a study of the effectiveness of using resistive neutral grounding in cable electrical networks with a voltage of 6–10 kV. The principle of operation of the system, its impact on the modes of single-phase ground faults, the level of overvoltage and the reliability of insulation operation were analyzed. It was shown that resistive grounding provides a reduction in ground fault currents, increases electrical safety and contributes to stable network operation. A comparison is given with networks with an isolated and compensated neutral, which allowed us to determine the optimal conditions for using resistive grounding for modern medium-voltage cable networks.

Keywords: cable electrical networks, resistive neutral grounding, overvoltage multiplicity, ground fault, grounding resistor

Зміст

Вступ.....	7
Розділ 1. Існуючі режими заземлення нейтралі в електричних мережах 6 – 10 кВ.....	10
1.1. Мережі з ізольованою нейтраллю.....	10
1.2. Мережі із компенсованою нейтраллю.....	18
1.3. Мережі із резистивною нейтраллю.....	22
Розділ 2. Дослідження процесів ОЗЗ в кабельних мережах 6-10 кВ.....	27
2.1. Постановка задачі досліджень.....	27
2.2. Параметри обладнання промислових та міських кабельних мереж напругою 6-10 кВ.....	31
2.3. Особливості дугових замикань в кабельних електричних мережах..	35
2.4. Ферорезонансні процеси в кабельних мережах.....	42
Розділ 3. Ефективність резистивного заземлення нейтралі в кабельних мережах 6-10 кВ.....	55
3.1. Математична модель процесів при замиканнях на землю в мережі із резистивним заземленням.....	55
3.2. Дослідження перенапруг в мережі при повторному запалюванні дуги.....	59
3.3. Вимоги до заземлюючих резисторів в нейтралях кабельних електричних мережах.....	64
3.4. Практичні питання по застосуванню резистивного заземлення.....	68
Розділ 4. Охорона праці	72
4.1. Заходи щодо безпечної експлуатації електроустановок.....	72
4.2. Розрахонок заземлення ТП 10/04 кВ.....	74
Висновки.....	78
Перелік посилань.....	80

ВСТУП

Мережі середніх класів напруги займають провідне місце в електроенергетиці будь-якої країни. Від надійної експлуатації цих мереж залежить безперебійна робота промисловості, аграрного комплексу та, зрештою, нормальна організація побуту населення. Мережі середніх класів напруги, переважно, експлуатуються з ізольованою нейтраллю, або з нейтраллю, заземленою через дугогасний реактор (ДГР).

До основних недоліків таких режимів експлуатації мереж можна віднести:

1. Значні кратності внутрішніх перенапруг та висока ймовірність виникнення подвійних замикань на землю та ушкоджень електротехнічного устаткування.

2. Невисока ефективність компенсації ємнісних струмів при однофазних замикань на землю.

3. Недостатня безпека експлуатації мережі, не що відповідає сучасним вимогам (можливість тривалого існування небезпечних напруг дотику (більше 2 годин), виникнення однофазних замикань на землю (ОЗНЗ) через залізобетонні опори зі спеклим ґрунтом, можливість перекриття ізоляції комутаційних пристроїв при оперативних перемикаваннях, урвищах та падіннях дротів повітряних ліній.

4. Незадовільна селективність і завадостійкість пристроїв релейного захисту та автоматики, їх недостатні чутливість та швидкодія. У більшості мереж пошук пошкоджень приєднань здійснюється шляхом їх почергового відключення, або, у кращому випадку, шляхом використання пристроїв сигналізації ОЗНЗ типу УСЗ-3. Однак, останні не застосовні при короткочасних ОЗНЗ та однофазних замиканнях на землю через дугу, що перемежується. (ОДЗ). Застосовувані в деяких мережах з компенсацією ємнісних струмів 6-10 кВ пристрої сигналізації, встановлені на окремо

приєднаннях, далеко не завжди спрацьовують і, отже, мало впливають на підвищення експлуатаційної надійності мереж, що розглядаються.

Однофазне замикання на землю в мережах із ізольованою нейтраллю може бути серйозною аварією, яка у більшості випадків (до 80%) розвивається в багатофазні короткі замикання та в незабезпечені захисним заземленням, подвійні замикання. Частка ОЗНЗ від усіх видів ушкоджень становить від 30 до 80 % (не фіксовані пристроєм контролю ізоляції ушкодження, що відключаються - це, в своїй більшості, - аварії, що розвинулися із однофазних замикань на землю). Зазначимо, що експлуатаційний персонал не проводить ретельного аналізу причин ушкоджень. Тому наведену вище частку ОЗНЗ можна вважати заниженою. ОЗНЗ є причиною суттєвих перенапруг у мережах 6-35 кВ.

Значну частину пошкоджень складають випадки відключення ліній, при яких ізоляція відновлюється і лінія вмикається під навантаження (до 18%). Такі відключення зазвичай відбуваються за несприятливих погодних умов. Пошук та усунення місць з ослабленою ізоляцією досить скрутні та можливі багаторазові відключення тих самих елементів мережі. Найбільш уразливим елементом мережі при впливі внутрішніх перенапруг є кабелі, місця їх з'єднання один з одним і з іншими елементами мережі.

Ушкоджуваність обладнання від ферорезонансних перенапруг значно нижчі, ніж від дугових. Однак, дугові процеси можуть ініціювати ферорезонансні явища, внаслідок яких, ушкоджуються силові трансформатори та вимірювальні трансформатори напруги (ТН).

Спостерігаються помилкові спрацьовування захисту, що реагує на появу напруги нульової послідовності. Часто – густо виникають випадки, коли в мережах напругою 6-35 кВ при невеликій ємності фаз і наявності ТН фазні напруги без будь-яких видимих причин спотворювалися; напруга на одній з фаз дорівнювала нулю, як при металевому замиканні на грішну землю. Це явище тлумачилися як замикання на землю, тоді як насправді воно

було наслідком мимовільного усунення нейтралі в результаті виникнення ферорезонансних коливань.

Одним із способів підвищення надійності експлуатації цих мереж класів напруги є заземлення нейтралі мережі через дугогасний реактор. Головною перевагою експлуатації мережі з ДГР є тривала робота з ОЗНЗ без відключення споживачів. Для ефективного використання ДГР необхідно забезпечити дві умови:

- по можливості ідеально симетрувати мережу;
- автоматизувати підстроювання ДГР до змін у процесі експлуатації у досить широких межах параметрів мережі;

Необхідно відзначити, що установка ДГР не дозволяє компенсувати вищі гармонійні складові струмів ОЗНЗ.

На сучасному етапі розвитку електричних мереж при конфігурації мережі, що розширюється, будівництві дволанцюгових ліній, резервування більшості споживачів, є всі необхідні причини успішного застосування резистивного заземлення нейтралі.

Незважаючи на безперечні переваги резистивного заземлення нейтралі в порівнянні з режимами ізольованої нейтралі та нейтралі, заземленою через ДГР, а також на велику кількість досліджень, присвячених цьому питанню, у практиці експлуатації мереж середніх класів напруги резистивне заземлення до теперішнього часу широкого застосування не знайшло. Це зумовлено, на наш погляд, відсутністю загальної методики, що дозволяє визначати необхідні параметри резисторів, вибирати схеми їх підключення, принципи функціонування та необхідні технічні засоби релейного захисту (РЗ) мереж 6-35 кВ різного виконання та призначення.

Тому саме цій прблемі присвячено дану роботу.

РОЗДІЛ 1.

ІСНУЮЧИ РЕЖИМИ ЗАЗЕМЛЕННЯ НЕЙТРАЛІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ 6 – 10 КВ

В даний час електричні мережі середніх класів напруги 6-35 кВ експлуатуються, в основному, або із ізольованою нейтраллю, або з компенсацією струмів замикання на землю за допомогою дугогасних реакторів.

Релейний захист у таких мережах при ОЗНЗ спрацьовує не на вимкнення пошкодженого фідера, а як правило сигнал. Складність побудови РЗ полягає у забезпеченні однієї з основних вимог до неї - селективності, оскільки струми ОЗНЗ малі і можна порівняти з струмами небалансу. У зв'язку з швидкоплинністю дугових та ферорезонансних процесів, які неможливо запобігти при ізольованій нейтралі мережі, виникає комплексне завдання захисту мереж від ОЗНЗ:

- з одного боку - запобігання небезпечним дуговим і ферорезонансним перенапруг;
- з іншого, - селективне виявлення пошкодженого фідера.

1.1. Мережі з ізольованою нейтраллю

Мережі з ізольованою нейтраллю зазвичай застосовуються в електричних системах напругою до 35 кВ, головним чином у розподільних і промислових мережах. Їхня особливість полягає в тому, що при однофазному замиканні на землю струм пошкодження має невелику величину (ємнісний струм), завдяки чому допускається короткочасна робота мережі без відключення. Це підвищує надійність електропостачання та дозволяє безперервно працювати споживачам. Водночас такі мережі мають недолік у вигляді можливості виникнення значних перенапруг під час повторних запалювань дуги.

В розподільних електричних мережах з ізольованою нейтраллю проводи трифазної системи мають зв'язок із землею через ємнісні та активні

опори ізоляції, рівномірно розподілені вздовж усієї лінії. На рисунку 1.1 подано схему заміщення такої мережі без підключеного до неї навантаження.

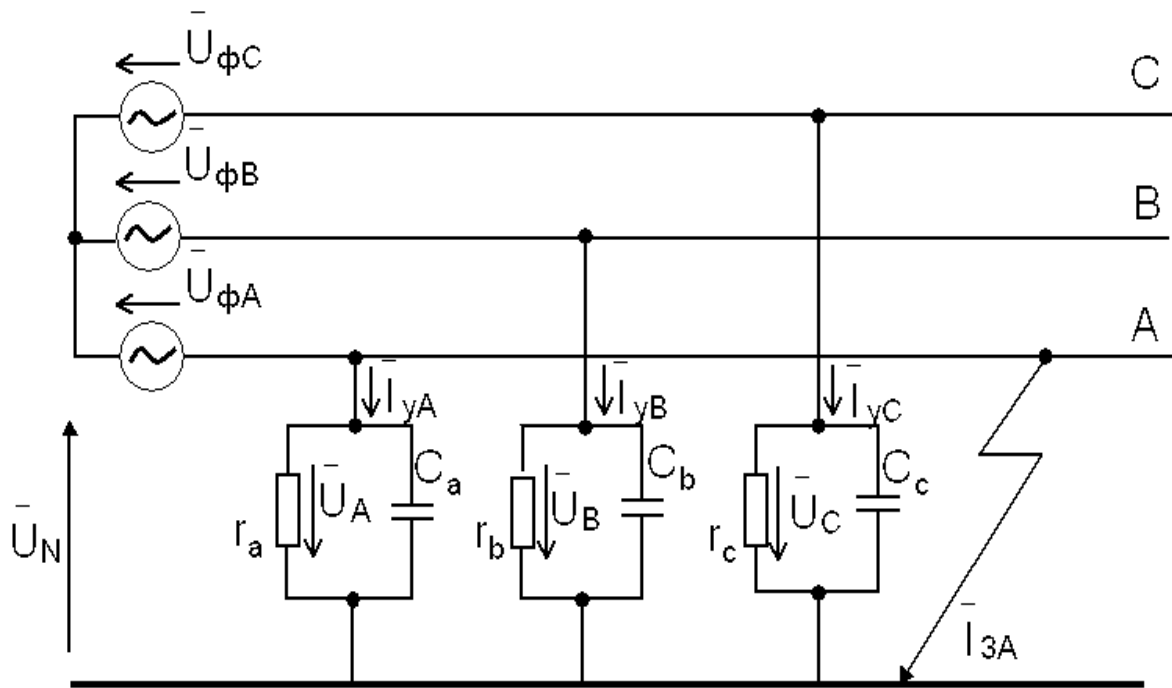


Рис. 1.1. Схема заміщення трифазної мережі з ізолюваною нейтраллю

Для наведеної мережі виконуються такі співвідношення. Загальні комплексні провідності фаз А, В і С відносно землі мають вигляд:

$$\bar{Y}_A = \frac{1}{r_A} + j\omega C_A$$

$$\bar{Y}_B = \frac{1}{r_B} + j\omega C_B$$

$$\bar{Y}_C = \frac{1}{r_C} + j\omega C_C$$

(1.1)

Напруга зміщення на нейтралі:

$$\bar{U}_N = U_\phi \frac{\bar{Y}_S}{\bar{Y}_\Sigma}$$

(1.2)

де $\bar{Y}_\Sigma = \bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C$ - комплексна сумарна провідність електромережі відносно землі;

U_ϕ - модуль фазної напруги електромережі;

$\bar{Y}_S = \bar{Y}_A + a^2 \bar{Y}_B + a \bar{Y}_C$ - комплексна фазна провідність електромережі відносно землі, яка дорівнює нулю при факті якщо

провідності фаз $\bar{Y}_A = \bar{Y}_B = \bar{Y}_C$;

$$a = \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$$

- фазний множник.

Якщо взяти до уваги, що струм стікання у фазі А дорівнює $\bar{I}_{yA} = (\bar{U}_{\phi A} - \bar{U}_N) \bar{Y}_A$, то враховуючи вираз (1.2) отримуємо:

$$\bar{I}_{yA} = U_\phi \frac{\bar{Y}_\Sigma - \bar{Y}_S}{\bar{Y}_\Sigma} \bar{Y}_A \quad (1.3)$$

аналогічно виконуємо й для інших фаз:

$$\bar{I}_{yB} = U_\phi \frac{a^2 \bar{Y}_\Sigma - \bar{Y}_S}{\bar{Y}_\Sigma} \bar{Y}_B$$

$$\bar{I}_{yC} = U_\phi \frac{a \bar{Y}_\Sigma - \bar{Y}_S}{\bar{Y}_\Sigma} \bar{Y}_C \quad (1.4)$$

Відношення (1.3) та (1.4) дозволяють нам визначати струми стікання влюбій фазі мережі при відомих їх активних опорах r_a, r_b, r_c а також їх ємностях C_a, C_b, C_c відносно землі.

Тоді для струму замикання у фазі А ($\bar{Y}_A = \infty$):

$$\bar{I}_{3A} = U_{\phi} [\bar{Y}_B (1 - a^2) + \bar{Y}_C (1 - a)] \quad (1.5)$$

й аналогічно для інших 2-х фаз:

$$\begin{aligned} \bar{I}_{3B} &= U_{\phi} [\bar{Y}_A (a^2 - 1) + \bar{Y}_C (a^2 - a)] \\ \bar{I}_{3C} &= U_{\phi} [\bar{Y}_A (a - 1) + \bar{Y}_B (a - a^2)] \end{aligned} \quad (1.6)$$

Отже, для аналітичного визначення струмів замикань на землю необхідно враховувати параметри ізоляції мережі відносно землі. У мережах з ізольованою нейтраллю такі замикання можуть бути стійкими (металевими або через перехідний опір) чи дуговими [1]. На рисунку 1.2 наведені векторні діаграми напруг як для нормального режиму роботи мережі, так і при стійкому замиканні на землю.

Проте в цій роботі особливу увагу слід приділити більш складним процесам, що виникають під час замикань на землю, які супроводжуються появою електричної дуги.

В електричних мережах 6–35 кВ при однофазних замиканнях на землю у місцях контакту провідників із ґрунтом часто виникають електричні дуги. Аварійний процес характеризується повторюваним циклом займання та згасання дуги. Вона виконує роль своєрідного комутатора, періодично замикаючи пошкоджену фазну ємність на землю, а згодом знову підключаючи її до джерела живлення. Таке переривчасте горіння дуги спричиняє складні перехідні процеси, інтенсивність яких визначається параметрами самої дуги, а також ємністю, індуктивністю та опором кола.

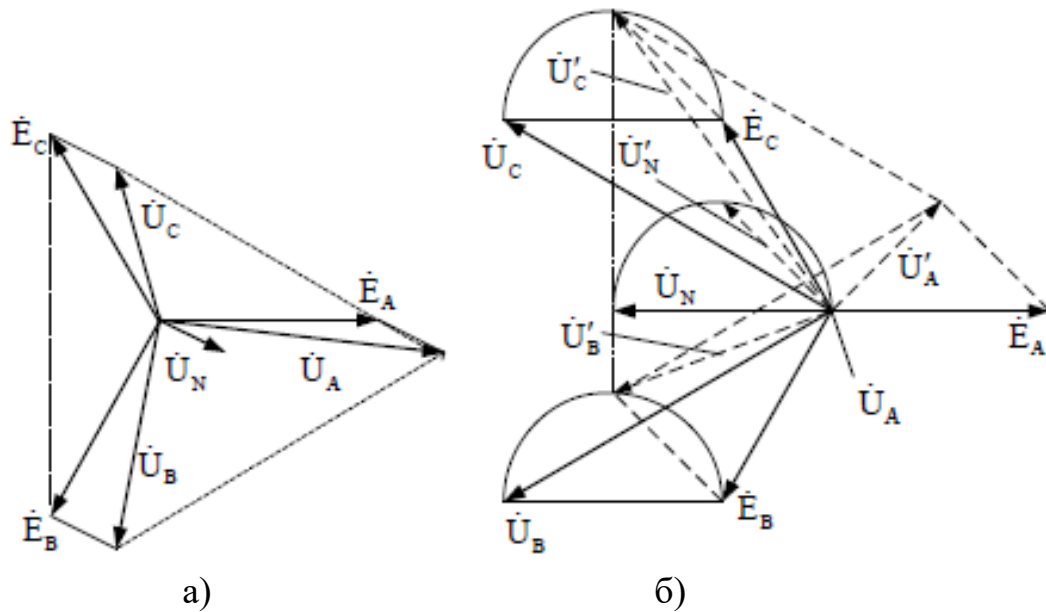


Рис. 1.2. Векторні діаграми напруг мережі

а – при нормальному режимі при $U_N \neq 0$

б – при замиканні фази А на землю

Варто підкреслити, що врахування всіх чинників, які впливають на ці процеси при переривчастих замиканнях на землю, є вкрай складним. Через складність фізичної природи дугових замикань їх точний аналітичний опис наразі відсутній [2].

За теорією Петерсена, у процесі перехідних явищ кратність перенапруг не перевищує 3–4 відносно номінального значення фазної напруги системи.

Відповідно до цієї ж гіпотези, дуга повинна згасати в момент проходження струму замикання на землю через найближчий нуль. Це відбувається (рис. 1.3) при $\omega t = \pi$. У цей час ємність пошкодженої фази перестає шунтуватися струмом дуги, опір якої дорівнює нулю. В результаті відбувається миттєвий перерозподіл напруг на ємностях електричної мережі відносно землі.

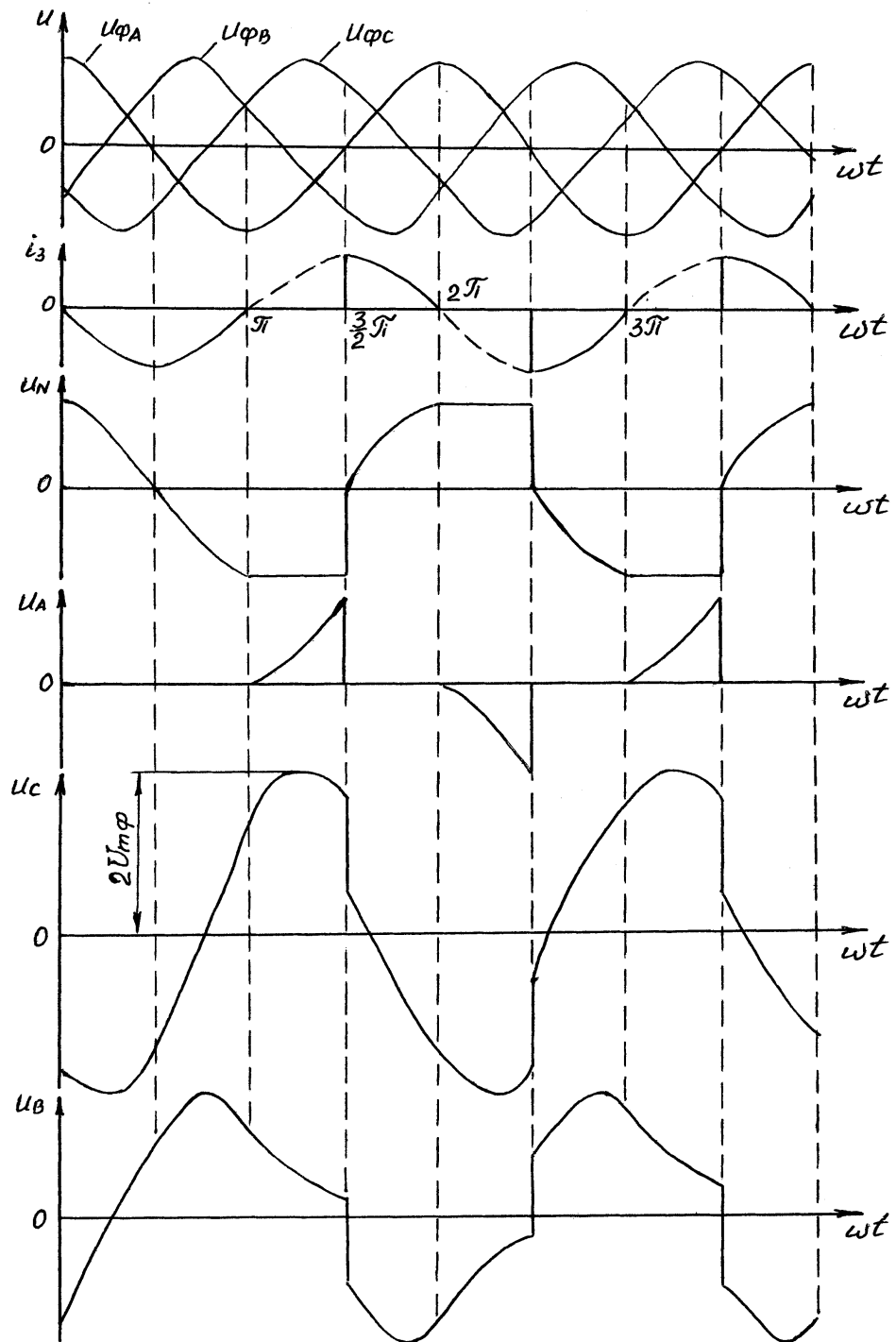


Рис. 1.3. Криві, які характеризують перехідний процес при дуговому замиканні в ідеалізованій електромережі

Тобто, ми бачимо із рис. 1.3, що при дугових замиканнях на землю в ідеалізованій електричній мережі, перенапруги не перевищуватимуть подвійної амплітуди ніж фазна напруга.

Проте в реальних електричних мережах, окрім ємнісної провідності фаз відносно землі, існують ще активний та індуктивний опори проводів. Тому при виникненні переривчастого замикання на землю з дуговим розрядом у системі можуть з'являтися коливальні процеси. Рівень перенапруг залежить від співвідношення активних, індуктивних і ємнісних складових, яке може створювати умови для резонансу в конкретній мережі. У такому випадку резонансні перенапруги здатні змінюватися в широких межах і теоретично досягати нескінченно великих величин [3]. З огляду на це доцільним є дослідження процесів, що відбуваються при переривчастих дугових замиканнях, за схемою, поданою на рисунку 1.4.

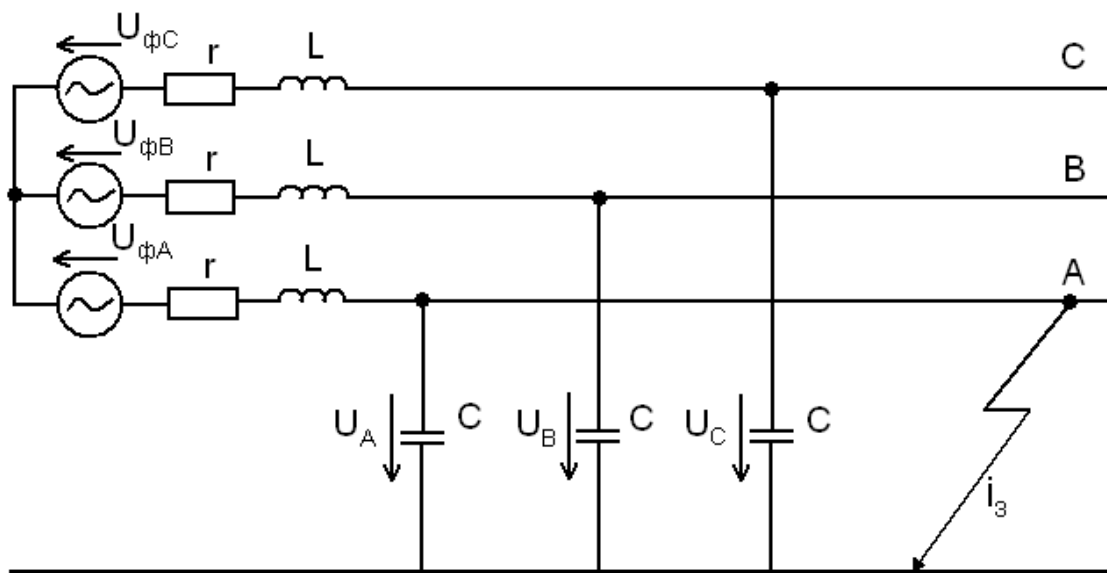


Рис. 1.4. Розрахункова схема трифазної електромережі при замиканні на землю

Для аналізу перехідних явищ доцільно розглядати їх поступово, поетапно, починаючи з моменту появи електричної дуги.

Суть підходу полягає в такому: припустимо, що дуга виникає тоді, коли напруга фази наближається до свого максимального значення. Визначивши початкову фазу Ψ напруги живлення, можна визначити напругу пошкодженої фази А у момент її досягнення амплітуди.

$$u_{\text{фА}} = U_{\text{мф}} \sin(\omega t + \psi)$$

$$u_{\text{фВ}} = U_{\text{мф}} \sin\left(\omega t + \psi - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$u_{\text{фС}} = U_{\text{мф}} \sin\left(\omega t + \psi - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Згідно зі схемою напруга на фазі А безпосередньо до факту замикання на землю визначається за виразом:

$$u_{\text{А}} = \frac{U_{\text{мф}}}{\sqrt{r^2 \omega^2 C^2 + (1 - \omega^2 LC)}} \sin(\omega t + \psi - \varphi), \quad (1.7)$$

$$\text{де } \varphi = \text{arctg} \frac{r\omega C}{1 - \omega^2 LC}$$

Отже, аналізуючи проміжок часу між згасанням та повторним займанням дуги, можна описати картину перехідного процесу, на основі якої визначається кратність перенапруг, що виникають при заданих значеннях параметрів r , L або C електричної мережі.

1.2. Мережі із компенсованою нейтраллю

У ПУЕ [4] вказано, що під час експлуатації повітряних ліній електропередачі напругою 6–35 кВ необхідно застосовувати ізольовану нейтраль або нейтраль, заземлену через дугогасильний реактор (рис. 1.5).

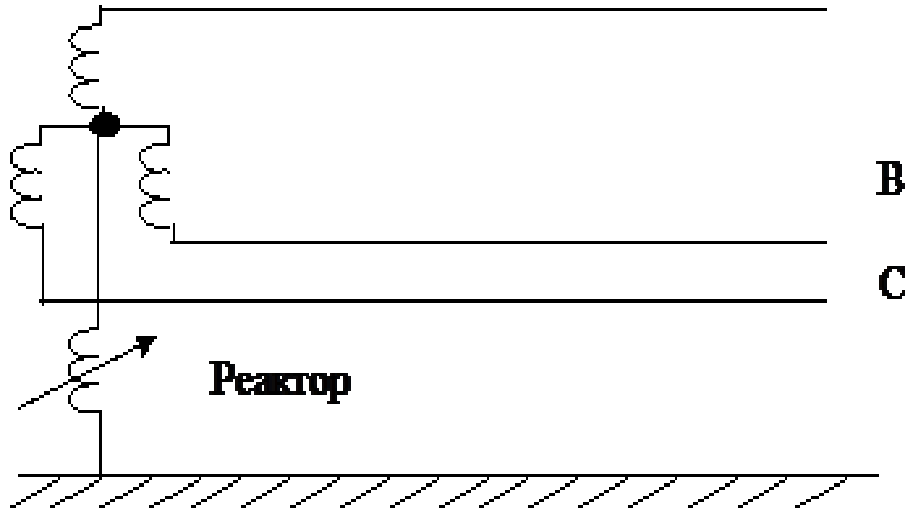


Рис.1.5. Схема електричної мережі із компенсованою нейтраллю

Цей термін максимально точно передає суть і принцип роботи даного пристрою, що буде продемонстровано далі. Дугогасильні реактори виконують подвійну функцію при замиканні на землю: по-перше, вони істотно знижують (компенсують) струм у місці пошкодження, а по-друге, уповільнюють відновлення напруги на пошкодженій фазі після переривання дуги. Обидва ці фактори сприяють її гасінню.

Компенсація так званих ємнісних струмів замикання на землю повинна застосовуватися за певних значень струму ЗНЗ в нормальному режимі [4].

На рисунку 1.6 представлена схема електричної мережі із компенсацією ємнісних струмів замикання на землю.

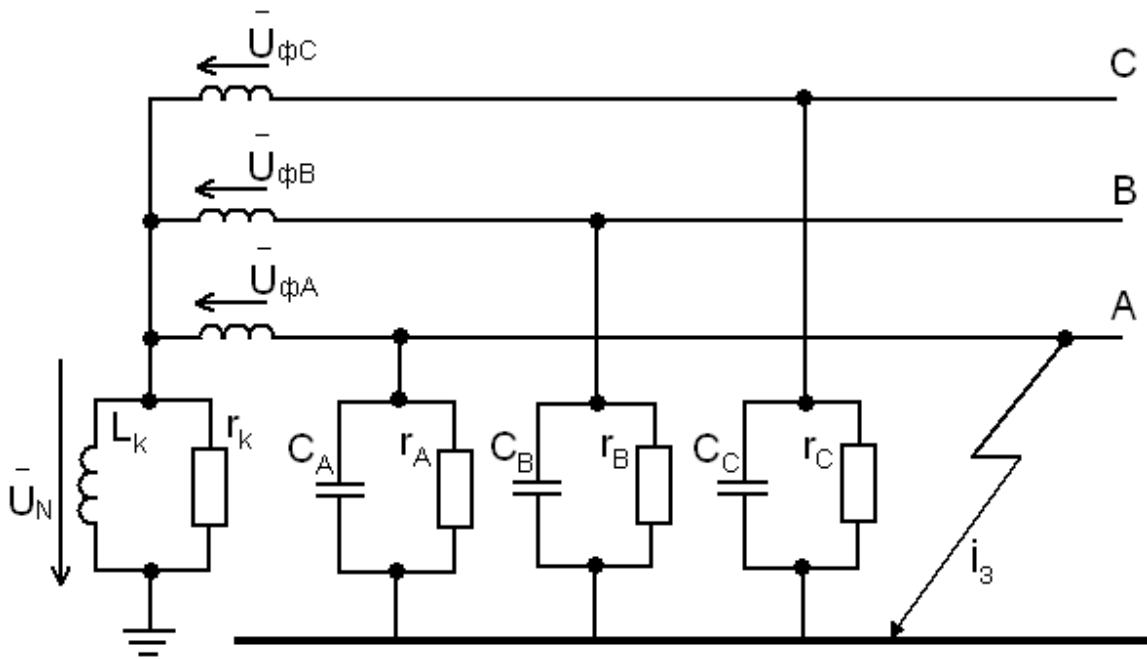


Рис. 1.6. Схема мережі з компенсованою нейтраллю із урахуванням активних опорів та реактора

Якщо вважати цю схему (рис. 1.6.) симетричною, тобто ($C_A = C_B = C_C = C$), а ($r_A = r_B = r_C = r$) можна привести її до більш зручної вигляду рис. 1.7.

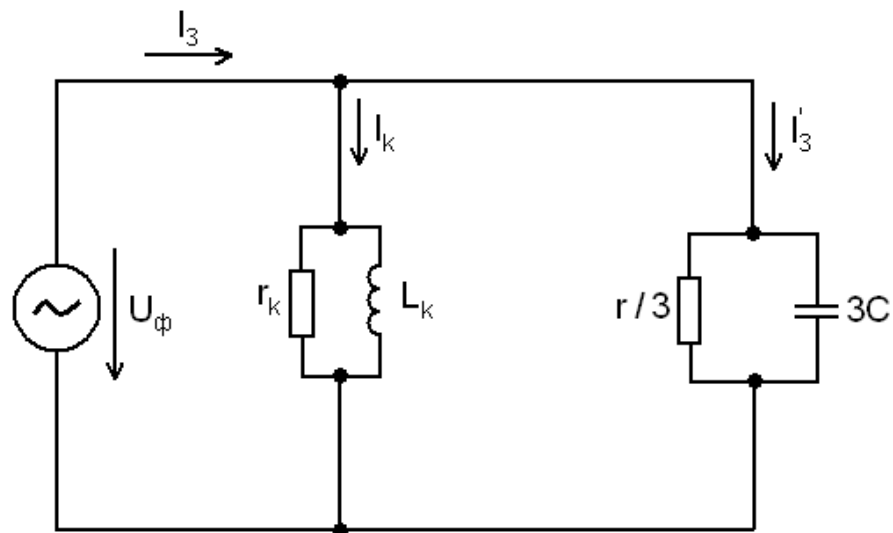


Рис. 1.7. Розрахункова схема електричної мережі із компенсованою нейтраллю

Умовою можливого резонансу є рівність індуктивного I_L та ємнісного I_C струмів. Струм ЗНЗ у цьому випадку визначається з виразу:

$$I_3 = U_\phi \left(\frac{1}{r_k} + \frac{3}{r} \right) \quad (1.8)$$

Як видно з наведеного рівняння, навіть за умови резонансного налаштування струм замикання на землю не дорівнює нулю, а визначається опорами ізоляції та параметрами котушки. Оскільки ємнісну складову цього струму неможливо виміряти безпосередньо, резонансне налаштування, що відповідає зазначеній умові, також не може виконуватися прямо. Тому компенсацію налаштовують за розрахунковим значенням струму.

$$I_C = 3U_\phi \omega C$$

Отже, резонансне налаштування котушок для компенсації ємнісних струмів може бути лише приблизним, тому струм замикання на землю ніколи не дорівнює нулю. У випадку виникнення дугового замикання на землю в компенсованій мережі (рис. 1.6), за умови резонансного налаштування фазні напруги виражаються таким чином:

$$u_{\phi A} = U_{m\phi} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

$$u_{\phi B} = U_{m\phi} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3})$$

$$u_{\phi C} = U_{m\phi} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} - \frac{4\pi}{3})$$

Отже, у проміжку часу після згасання дуги напруга на дугогасильному реакторі залишається відмінною від нуля навіть у симетричних мережах. Вона змінюється коливально з сталою кутовою частотою. У таких умовах

між окремими лініями мережі та землею можуть виникати перенапруги, величина яких визначається різницею між напругою зсуву фаз і напругою зсуву нейтралі.

$$U_A = U_{\text{фА}} - U_N; U_B = U_{\text{фВ}} - U_N; U_C = U_{\text{фС}} - U_N.$$

Дуга відновлюється в той момент, коли напруга досягає свого чергового максимуму, після чого процес повторюється. Водночас під час розрахунку перехідних струмів і напруг для наступної ділянки слід враховувати нові початкові значення струмів в індуктивності котушки як у момент замикання на землю, так і в момент згасання дуги.

Приведемо основні недоліки експлуатації повітряних мереж, при оснащенні їх нейтралей дугогасячими реакторами.

Оскільки зменшення струму ємності замикання на землю в цих мережах пов'язане з його компенсацією індуктивним струмом, що протікає через ДГР, то можливі режими експлуатації мережі, при яких виникають резонансні умови в контурах, що містять ємності мережі і індуктивність ДГР, що призводять до перенапружень і перекриття ізоляції електроустаткування.

До таких режимів можна віднести:

- нормальний експлуатаційний режим в мережі, де напруга несиметрії достатня висока (під напругою несиметрії розуміється напруга на нейтралі мережі при відключеному ДГР);
- різного роду неповнофазні режими, що виникають в процесі експлуатації.

З точки зору максимально можливого зменшення струму ОЗНЗ доцільно вибрати міру компенсації струму ємності, близької до одиниці. З точки зору надійнішої експлуатації мережі з ДГР в нормальному режимі розумно експлуатувати мережу при деякій перекомпенсації струму ємності.

1.3. Мережі із резистивною нейтраллю

Режим роботи мережі з ізольованою нейтраллю має суттєвий недолік, який полягає у можливості виникнення значних перенапруг під час повторного виникнення дуги. Це зумовлено тим, що у фазних ємностях мережі накопичується надлишковий заряд, який не встигає розрядитися до моменту наступного запалювання дуги через природну провідність між фазою та землею, що призводить до появи залишкової напруги на нейтралі. Тому очевидним способом зменшення перенапруг є забезпечення відведення надлишкового заряду до повторного виникнення дуги, тобто протягом півперіоду промислової частоти, шляхом заземлення нейтралі мережі через резистор із таким опором, який забезпечує майже повне розрядження накопиченого заряду.

Ідея застосування резистивного заземлення нейтралі відома вже досить давно [5, 6]. У цих наукових працях детально проаналізовано всі ключові аспекти, пов'язані з таким режимом заземлення. На сьогодні питання теоретичних і практичних основ резистивного заземлення нульової точки інтенсивно розвиваються. При цьому мережа має бути оснащена швидкодіючим захистом від замикань на землю з відключенням, оскільки недопустимо допускати тривале протікання струму в місці пошкодження. У даному випадку схема заміщення мережі із резистивним заземленням нейтралі виглядає таким чином (рис. 1.8.).

В ідеальному випадку схему вважаємо (рис. 1.8.) симетричною, тобто $(C_A = C_B = C_C = C)$, а $(r_A = r_B = r_C = r)$

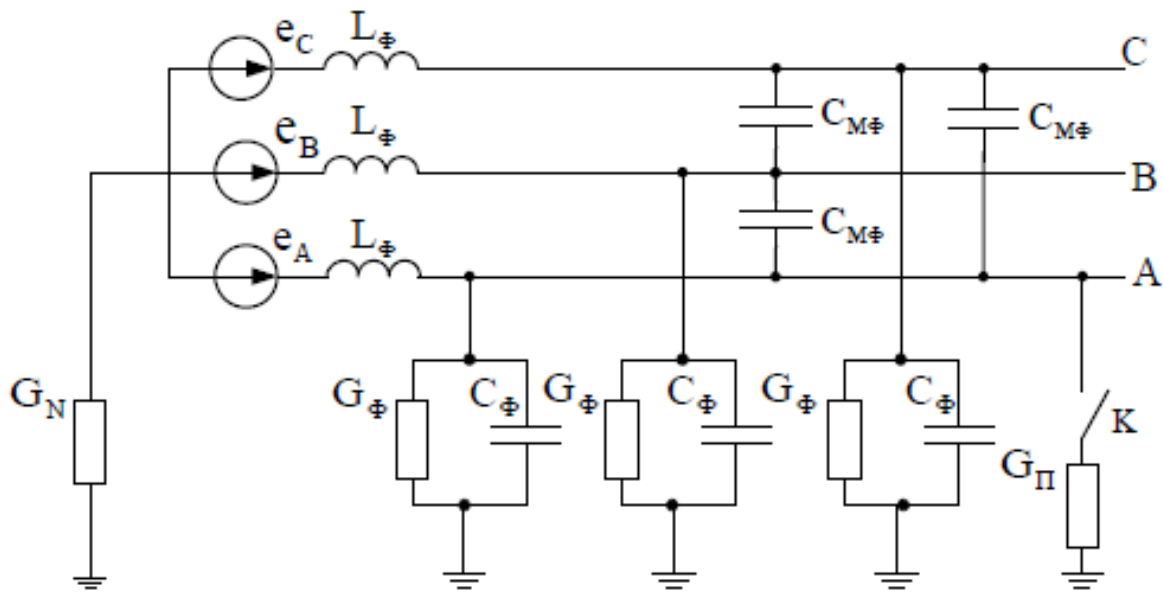


Рис. 1.8. Схема заміщення електричної розподільної мережі із резистивним заземленням нейтралі

Очевидно, що співвідношення, отримані для компенсованої мережі, справедливі й для мережі з резистивним заземленням нейтралі за зазначених вище умов. Проте, на відміну від систем, де компенсуються ємнісні струми, у разі резистивного заземлення нейтралі в повному струмі замикання частка вищих гармонік істотно менша, ніж у мережах, що компенсують залишковий струм. Тому визначення струму може обмежуватися лише робочою частотою. Відповідно, електричні параметри, які характеризують режим мережі з резистивним заземленням нейтралі при стійкому замиканні на землю, описуються таким співвідношенням:

напряга на нейтралі

$$\dot{U}_N = -\frac{\dot{E}_A G_{\Pi}}{3\underline{Y}_{\phi} + G_{\Pi} + G_N}; \quad (1.9)$$

напряга на пошкодженій фазі А

$$\dot{U}_A = \dot{E}_A + \dot{U}_N = \frac{\dot{E}_A (3\underline{Y}_\Phi + G_N)}{3\underline{Y}_\Phi + G_\Pi + G_N}; \quad (1.10)$$

струм в місці замикання на землю

$$\dot{I}_3 = \dot{U}_A \cdot G_\Pi = \frac{\dot{E}_A (3\underline{Y}_\Phi + G_N) G_\Pi}{3\underline{Y}_\Phi + G_\Pi + G_N}; \quad (1.11)$$

напряга у непошкоджених фазах В та С

$$\dot{U}_B = \dot{E}_B + \dot{U}_N = \frac{\dot{E}_B (3\underline{Y}_\Phi + G_N) - \dot{E}_A G_\Pi}{3\underline{Y}_\Phi + G_N + G_\Pi};$$

$$\dot{U}_C = \dot{E}_C + \dot{U}_N = \frac{\dot{E}_C (3\underline{Y}_\Phi + G_N) - \dot{E}_A G_\Pi}{3\underline{Y}_\Phi + G_N + G_\Pi}.$$

Таким чином оснащення нейтралі резисторами дозволяє здійснити досить надійне відключення фідера, на якому відбулося замикання на землю.

Не можна не відзначити, що оснащення нейтралі розподільчої мережі резисторами підвищить надійність експлуатації ізоляції при ОДЗ, оскільки практично забезпечить відсутність небезпечних повторних запалювань дуги та багатомісних ушкоджень. Також суттєво зменшується ймовірність появи перенапруг та надструмів в обмотках трансформаторів напруги при ферорезонансних явищах, обумовлених насиченням сталі трансформаторів напруги.

При оснащенні нейтралів трансформаторів резисторами кабельних розподільних мережах потрібна деяка модернізація релейного захисту. Тому питання про доцільність оснащення резисторами нейтралей мереж має вирішуватись у кожному конкретному випадку. Повинні враховуватися схема та клас напруги мережі, ступінь резервування живлення її споживачів,

статистика аварійності із зазначенням причин аварійних відключень фідерів, тип трансформаторів напруги тощо.

Оснащення нейтралі мережі резисторами призводить до появи струму замикання активної складової струму, величина якої залежить від величини опору у нейтралі. Для того, щоб зберегти властивість мережі, що полягає в малих струмах ОЗНЗ, опір у нейтралі має бути досить високоомним. Верхня межа величини опору доцільно вибирати виходячи з таких міркувань:

- введення опору в нейтраль при ОДЗ має виключити багатомісні ушкодження (або принаймні суттєво зменшити їх ймовірність), обумовлені повторними запалюваннями дуги при її нестійкому горінні;
- виключити виникнення небезпечних ферорезонансних коливань, обумовлених насиченням сталі магнітопроводів трансформаторів напруги;
- режимні параметри при ОЗНЗ повинні забезпечити надійне спрацювання пускових органів РЗ та селективне відключення фідера, на якому відбулося замикання на землю.

Нижню межу опору резистора доцільно вибирати таким чином, щоб селективно спрацьовувала струмовий ненаправлений захист.

Таким чином, вибір величини опору резистора повинен проводитися виходячи з вимоги виключення небезпечних ферорезонансних коливань та повторних запалень дуги при ОДЗ, а також забезпечення селективного відключення пошкодженого приєднання релейним захистом при ОЗНЗ.

Світовий досвід показує, що резистивні мережі напругою до 20 кВ успішно застосовуються у таких країнах як Франція, Чехія, Словаччина, Фінляндія, Німеччина, Польща, Португалія, Бельгія, Японія, деякі провінції Китаю [7] тощо.

У таблиці 1.1. для прикладу наведено європейський та світовий досвід застосування заземлення нейтралі через активний опір.

Табл. 1.1. Практичні питання стосовно способу заземлення нейтралі в різних країнах світу

Країна	Спосіб заземлення нейтралі			
	Ізольована	Заземлена через реактор	Заземлена через резистор	Глухозаземлена
Україна	+	+		
Австралія			+	+
Канада			+	+
США			+	+
Іспанія		+	+	+
Португалія			+	
Франція		+	+	
Японія	+		+	
Німеччина		+	+	
Австрія		+	+	
Бельгія			+	
Великобританія			+	+
Швейцарія		+	+	
Фінляндія	+	+	+	
Італія	+	+	+	
Чехія		+	+	
Словаччина		+	+	
Швеція		+	+	
Норвегія		+	+	

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ОЗЗ В КАБЕЛЬНИХ МЕРЕЖАХ 6-10 кВ

2.1. Постановка задачі досліджень

Кабелі середніх класів напруги застосовуються, в основному, розподільних міських мережах та в мережах власних потреб електричних станцій. В даний час міські розподільчі мережі експлуатуються або із ізольованою нейтраллю, або з компенсацією струмів замикання на землю за допомогою дугогасних реакторів (ДГР). Оскільки погонні фазні ємності кабелів майже в 100 разів перевищують відповідні ємності повітряних ліній, то струми замикання на землю в кабельних мережах у разі їх досить великої протяжності, (наприклад, в міських кабельних мережах або у передачах, що містять протяжні підводні кабельні лінії) суттєво перевищують струми замикання на землю у повітряних мережах. Ця обставина, а також простіші рішення в частині організації фільтрів нульової послідовності у схемах релейної захисту кабельних мереж дозволяють забезпечувати у цих мережах селективне швидкодіючий відключення пошкодженого фідера. Водночас таке відключення, що дозволяє знизити аварійність за рахунок попередження розвитку аварії, що не може забезпечити надійну експлуатацію ізоляції елементів обладнання мереж, оскільки час дії релейного захисту, орієнтованої на реєстрацію стаціонарних струмів нульової послідовності, суттєво більше часу розвитку перенапруг, обумовлених електромагнітними перехідними процесами.

Орієнтовна схема ділянки міської кабельної мережі великого міста наведено на рис. 2.1.

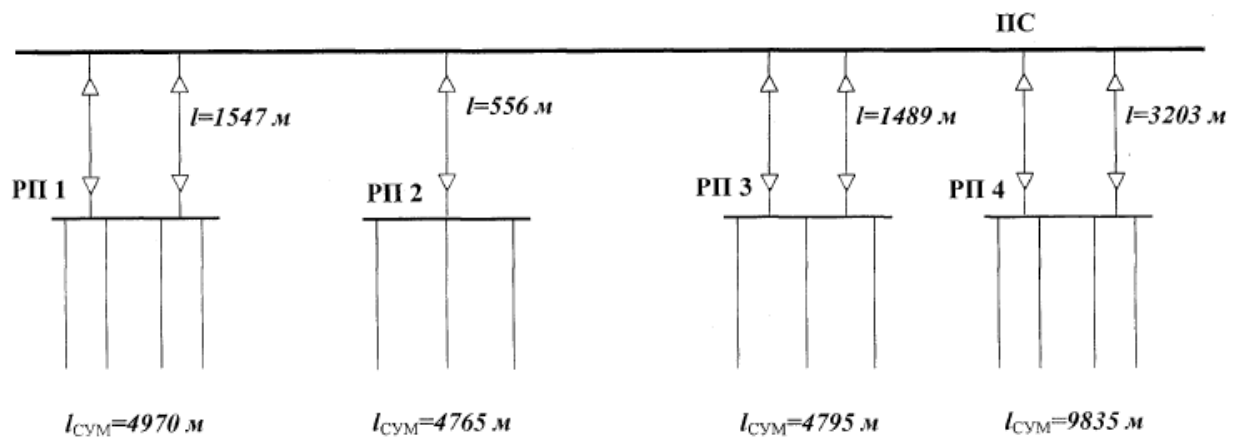


Рис. 2.1. Ділянка кабельної міської мережі

В даний час аварійність промислових та міських кабельних мереж достатньо велика. Основні причини їхньої ненадійності можна класифікувати наступним чином:

- рівень ізоляції кабелів та проміжних муфт в даний час нижчий нормованого, оскільки термін їхньої служби перевищує гарантований 25...30 років. Це великою мірою пов'язано як із природним старінням ізоляції, так і з великою кількістю муфт, що істотно перевищує

їх число, що нормується при спорудженні кабельної мережі (будь-яке пошкодження кабелю призводить до «врізання» до додаткової мережі сполучної муфти);

- відсутність узгодженої взаємодії між персоналами міських та центральних кабельних мереж при налаштуванні дугогасних реакторів;

- зниження експлуатаційним персоналом нормованого випробувального напруги при профілактичних випробуваннях кабелів або відмова від таких випробувань, зумовлені зношеністю кабельної мережі;

- відсутність надійного діагностичного обладнання, що дозволяє з достатньою точністю визначити місце розташування пошкодження та навіть найаварійнішої КЛ, що може призвести до людських жертв при проведенні ремонтно-відновлювальних робіт;

- поступове руйнування захисних покриттів КЛ та порушення корозійної стійкості металеві оболонки та броні кабелів, що призводять до

появи в ізоляції кабелів водних трингів та поступового виходу її з ладу. Недостатність використання заходів щодо боротьби з корозією - електричного дренажу, катодної та протекторний захист;

- практична відсутність засобів діагностичного моніторингу технічного стану ізоляції кабелів, що дозволяє запобігти розвиток локальних дендритів та трингів у пошкодження з наступною можливістю багатомісних замикань на землю при однофазних дугових замикання на землю (ОДЗ).

Підвищення надійності кабельної мережі поряд із відповідними експлуатаційними заходами може бути досягнуто шляхом більш ефективного режиму заземлення нейтральної мережі. Компенсація ємнісних струмів за допомогою ДГР пов'язана з введенням в нейтраль мережі елемента, запасє енергію, яка в різних ситуаціях (неповнофазних режимах, режимах недокомпенсації та ін.) у коливальному процесі обміну енергією з ємнісними елементами мережі може призвести до небезпечних перенапруг на ізоляції КЛ. Підвищити ефективність оснащення мережі ДГР можна за умови встановлення пристроїв з адаптивної системою управління, тобто. з автоматичним регулюванням коефіцієнта компенсації за зміни режиму експлуатації мережі [8]

Таблиця 2.1 Аварійність кабельних мереж Хмельницькобленерго у 2020 р.

Місяць	ЗНЗ	ЗНЗ, що перейшли у КЗ	Міжфазні КЗ	Всього пошкоджень
Січень	3	1	8	11
Лютий	6	2	15	21
Березень	5	3	12	17
Квітень	7	2	34	41
Травень	9	8	48	57
Червень	5	3	44	49
Липень	14	10	42	86
Серпень	13	8	41	44
Вересень	12	3	22	44
Жовтень	17	6	39	56
Листопад	12	4	26	38
Грудень	16	7	21	37
ВСЬОГО	119	57	372	491

З таблиці 2.1 видно, що 48% однофазних замикань на землю (ЗНЗ) перейшли до міжфазних к.з., це говорить про погане налаштування ДГР. ЗНЗ становлять близько 24% від повного числа замикань та коротких замикань. Великий відсоток міжфазних замикань говорить про малу експлуатаційної надійності кабельної мережі, що практично виробила свій ресурс. Експлуатаційний персонал не проводить ретельного аналізу причин ушкоджень. Водночас підвищення якості експлуатації мережі без сумніви пов'язані з чіткішим розпізнаванням причин аварій.

Мережі власних потреб електростанцій та підстанцій 6-10 кВ відрізняються від розподільних міських та промислових мереж значно меншою протяжністю і, отже, меншими струмами замикання землю (2...5)А [9].

Розпізнавання пошкодженого фідера в зазначених мережах здійснюється з допомогою струмових реле, що реагують на струм нульової послідовності приєднання, що відключається (реле РТ-40, РТ-50, РТЗ-51, ЗЗП), встановлюються кожному приєднанні в осередках КРУ. Мінімальна уставка по струму реле РТЗ-51 складає 20 мА. Іноді захист виконується з урахуванням спрямованих реле (наприклад, РМ-13).

Таким чином, проблем з організацією чутливої селективної релейного захисту як у міських кабельних мережах, так і в мережах власних потреб ТЕЦ немає. Отже, ефективність оснащення цих мереж резисторами нейтралі обумовлена в основному питаннями обмеження перенапруг, що супроводжують однофазні дугові замикання на землю. У разі малих ємностей мережі (наприклад, короткої кабельної тупикової лінії) можливо виникнення ферорезонансних небезпечних перенапруг, обумовлених насиченням магнітопроводів трансформаторів напруги. Увімкнення резисторів в нейтраль мережі дозволить не тільки виключити ферорезонансні перенапруги, а й знизити струмові навантаження в обмотках вищого напруги трансформаторів

для контролю ізоляції в комутаціях, що призводять до підвищення напруги на нейтралі мережі.

Викладене дозволяє зробити висновок, що аналіз ефективності резистивного заземлення нейтралі кабельних мереж повинен спиратися на порівняльне дослідження процесів, що відбуваються в цих мережах при дугових замикання на землю і при ферорезонансних явищах, при різних режимах заземлення нейтралі. При цьому вибір величини опору резистора, так само, як і в повітряних розподільчих мережах, повинен проводитися, виходячи з вимоги виключення повторних запалювань дуги при ЗНЗ.

2.2. Параметри обладнання промислових та міських кабельних мереж напругою 6-10 кВ

Небезпека перенапруг тієї чи іншої кратності визначається електричною міцністю ізоляції, на яку впливають ці перенапруги. У розподільних кабельних мережах перенапруги впливають на обладнання трансформаторних підстанцій (ТП) та на кабелі. У мережах власних потреб – на трансформатори ВП, трансформатори напруги та струму та на статорну ізоляцію двигунів.

При експлуатації кабелів у них виникають незворотні процеси, пов'язані з появою часткових розрядів, дендритів та водних триєнгів. І хоча в паперово-олійній ізоляції за даними деяких дослідників 80...90% всіх дефектів «запливає», спостерігається безперервне погіршення міцності характеристик ізоляції. На жаль, сприяють розвитку дефектів та профілактичні випробування постійною напругою, оскільки при цих випробуваннях підвищених напруг можуть піддаватися і ті ізоляційні конструкції, які в процесі експлуатації не піддаються впливу перенапруг високої кратності. Зокрема, під час випробувань не рідко відбуваються пробої кінцевих закладень і муфт. Після проведення профілактичних випробувань чітко простежується підвищена ушкоджуваність кабелів та муфт.

Таким чином, елементами міської електричної мережі, визначальними необхідний ступінь зниження кратностей перенапруг, є кабельні лінії та муфти. Важко сказати, які перенапруги допустимі для кабельної мережі, що експлуатується понад 20 років[10].

Отже, підвищення надійності експлуатації міської та промислової кабельної мережі неминуче пов'язано з необхідністю глибокого обмеження комутаційних перенапруг. Як уже вказувалося вище через саму сутність заземлення нейтралі через ДГР та неприйнятною практикою їхньої експлуатації в даний час цей режим заземлення не може виключити виникнення небезпечних перенапруг. Тому необхідний ретельний аналіз ефективності резистивного заземлення нейтралі міських кабельних мереж середніх класів напруги. У мережах власних потреб електричних станцій найслабшими точки зору електричної міцності елементами є обертові машини – двигуни.

Як правило, в даний час в мережах 6-10 кВ використовуються кабелі з паперово-масляною ізоляцією трифазного виконання з секторними жилами. Ємнісні параметри цих кабелів наведено у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 Характеристика масляно-паперових кабелів 6-10 кВ

$S, \text{мм}^2$	$U_{\text{ном}}$	70	95	120	150	185	240
$r_{\text{ж}}, \text{мм}$		4.72	5.50	6.18	6.91	7.67	8.74
$D_{\text{нар}}, \text{мм}$	6 кВ	41	43.6	47	49.7	52.7	57.6
	10 кВ	45.8	48.7	51	53.8	56.7	60.4
$C_{\phi}, \text{мкФ/км}$	6 кВ	0.214	0.247	0.278	0.311	0.343	0.383
	10 кВ	0.165	0.192	0.215	0.238	0.262	0.292
$C_{\phi\phi}, \text{мкФ/км}$	6 кВ	0.059	0.068	0.076	0.085	0.094	0.105
	10 кВ	0.045	0.053	0.058	0.064	0.0714	0.0793
$C_p, \text{мкФ/км}$	6 кВ	0.39	0.45	0.507	0.567	0.626	0.698
	10 кВ	0.3	0.35	0.39	0.43	0.476	0.55
$C_{\phi\phi}/C_{\phi}$	6 кВ	0.275	0.275	0.273	0.273	0.27	0.274
	10 кВ	0.273	0.276	0.27	0.269	0.272	0.272

Для синхронних та асинхронних двигунів з короткозамкнутим ротором [11]

$$C_{\text{фдв}} = \frac{0.0187 S_{\text{ном}} \cdot 10^{-6}}{1.2 \sqrt{U_{\text{ном}}} (1 + 0.08 U_{\text{ном}})} \quad (2.1)$$

Для інших типів електродвигунів [12]

$$C_{\text{фдв}} = \frac{40 S_{\text{ном}}^{3/4} \cdot 10^{-6}}{3(U_{\text{ном}} + 3600) \sqrt[3]{n_{\text{ном}}}} \quad (2.2)$$

В таблиці 2.3 наведено Сдв, які як правило використовуються на ТЕЦ

Табл. 2.3 Емнісні параметри електричних двигунів

Рн, кВт	200	250	500	630	800	1600
Сдв, нФ	5,7	6,3	8,9	10	11,3	16

Вхідна ємність силових трансформаторів на напрузі 6 – 10 кВ визначається із виразу

$$C_{\text{вх}} = C_1 + C_2 C_{12} / (C_2 + C_{12}) \quad (2.3)$$

де C_1 і C_2 – ємності обмоток відносно бака (або магнітопровода);

C_{12} – ємність між обмотками.

Вони як правило визначаються емпіричними формулами:

$$C_{\text{вн}} = C_2 = 0.07 \frac{S^{0.35}}{U_{\text{вн}}^{0.175}} \text{ нФ}$$

$$C_{\text{нн}} = C_1 = 1.3 \frac{\sqrt{S}}{U_{\text{нн}} + 13 + 0.2 \sqrt{S}} \text{ нФ}$$

$$C_{12} = \frac{\sqrt{S}}{U_{\text{вн}}} \text{ нФ}$$

Ємності кабельних ліній звичайно залежать від їх протяжності. Так для прикладу в таблиці 2.4 показано довжини КЛ, їх ємність та струми замикання на землю.

Табл. 2.4 Характеристики міської кабельної мережі та середні струми ЗНЗ

C_3 , мкФ	0.1	0.25	0.5	1	6	10	20	30	60	
l , км \approx	0.13	0.33	0.67	1.33	8	13.3	26.6	40	80	
I_3 , А	6 кВ	0.114	0.286	0.57	1.14	6.84	11.4	22.8	31.2	68.4

При аналізі струмів ЗНЗ у перехідному режимі та при аналізі перенапруг, що виникають при комутаціях двигунами, необхідні відомості не тільки про ємні параметри мережі, а й про індуктивні параметри обладнання. У таблиці 2.5 наведено активні та індуктивні опори кабелів 6 та 10 кВ на частоті 50 Гц й температурі 25°C.

Табл. 2.5 Опори кабелів 6 та 10 кВ з алюмінієвими жилами

S , мм ²		70	95	120	150	185	240
R , Ом/км		0.429	0.316	0.250	0.202	0.165	0.129
x , Ом/км	6 кВ	0.080	0.078	0.076	0.074	0.073	0.071
	10 кВ	0.086	0.083	0.081	0.079	0.077	0.075

Індуктивності двигунів можуть бути найдостовірніше оцінені за їх частотними характеристиками. Результати аналізу частотних характеристик двигунів, викладені, зокрема, [7], дозволяють визначити індуктивність двигуна при його моделюванні у вигляді Г-образної схеми заміщення

$$L_{\text{фдв}} = L'' / 1.4 \quad (2.4)$$

де L'' - надперехідна індуктивність

$$L'' = \frac{I_{\text{ном}}}{I_{\text{пуск}}} \frac{U_{\text{ном}}^2 \cos\varphi}{\omega P_{\text{ном}}} \quad (2.5)$$

Для прикладу в таблиці 2.6. наведено індуктивності для двигунів різної потужності

Табл. 2.6 Індуктивності електричних двигунів згідно Г-образної схеми заміщення

Рн, кВт	200	250	500	630	800	1600
Лдв, Гн	0,075	0,06	0,03	0,024	0,019	0,009

Індуктивність трансформаторів можливо визначити за виразом

$$L_T = u_k \frac{U_{ном}^2}{S_T \omega_s} \quad (2.6)$$

2.3. Особливості дугових замикань в кабельних електричних мережах

Ескалація перенапруг при ОДЗ пов'язана зі зростанням напруги на нейтралі в процесі згасань та запалювань дуги. Тому, при моделюванні цих процесів дуже суттєво правильно моделювати умови горіння дуги. Ці умови залежать від місця горіння дуги. дуга; дуга, що горить у вузькій щілині; дуга, що горить у муфті і т.д.). Так у [14] експериментально набутий наступний характер горіння дуги в кабелях: напруга повторного пробоя в початковій стадії процесу зростає, досягаючи величини більшої, ніж максимальна напруга мережі, а потім поступово спадає. Очевидно, що початкове зростання напруги повторного пробоя пов'язаний з дмухом у вузькій щілині, а спад з поступовим розширенням каналу та вуглерожуванням його стінок. Чим більша ємність мережі, тим більше струм замикання на землю і, отже, тим більше енергія, що виділяється в дуговому каналі, що призводить до більшої швидкості спаду напруги повторного пробоя і може призвести до стійкого горіння дуги.

При будь-якому механізмі горіння дуги напруга на ізоляції при повторних пробоях з певним ступенем ймовірності призводить до перенапруг, що перевищують рівень ізоляції кабелів і муфт в кабельних

розподільчих мережах і двигунів. Наведемо зразкові кратності перенапруг при повторних запалюваннях дуги у разі використання стандартної моделі її горіння. Згідно цієї моделі фаза першого запалення дуги приймалася розподіленою по закону рівномірної щільності в діапазоні $30 \dots 150^\circ$, напруга повторних пробоїв приймалася постійним, розподіленим за законом рівномірною щільності в діапазоні $(0.5 \dots 1.75)U_{ф}$. Число переходів струму через нуль, після чого слідує згасання дуги, розглядалося як випадкова дискретна величина, що з рівною ймовірністю приймає значення в діапазоні $1 \dots 10$.

За вдосконалення цієї моделі було введено ще одну додаткову характеристику процесу - критична похідна струму, коли він відбувається гасіння дуги. Дійсно, при великих значеннях похідної струму дуговий канал через інерцію процесу не встигає деіонізуватися при переході струму в дузі через нульове значення. Накладення цієї умови дозволяє отримувати гасіння дуги при парних та непарних переходах через нуль. Процеси ж при гашенні дуги при чотирьох і непарних її переходах через нульове значення різні. Ця обставина пояснюється тим, що при згасанні дуги при парному проходженні через нуль напруга на нейтралі виявляється мінімальним, при згасанні ж дуги при непарному проходженні струму в дузі через нульове значення – максимальним.

Можна запропонувати інші гіпотези горіння і згасання дуги. Найбільші перенапруги виникають у початковій стадії процесу, якщо згідно з експериментами у цій стадії процесу напруга повторного пробоя зростає. У розрахунках, проведених з цієї гіпотези приймалися такі умови протікання процесу: діапазон часу першого запалення дуги становив $1,66 \dots 8,33$ мс, максимальна напруга повторного пробоя змінювалося в діапазоні $0,5 \dots 1,75 U_{ф}$, час від початкового запалення дуги до досягнення напругою повторного пробоя максимальної величини приймалося розподіленим у діапазоні $100 \dots 200$ мс, швидкість підходу струму в дузі, при якій дуга не гасне, змінювалась у діапазоні $1,8 \dots 2,8$ А/мкс.

В таблиці 2.7. наведено результати обробки експериментів кабельних мереж різної довжини

Табл. 2.7 Ймовірнісні значення перенапруг за умов горіння дуги

Сф, мкФ	1,5	3,0	9,0
К_{max}	2,92	2,89	3,02
К_{0,95}	2,82	2,81	2,73

З таблиці видно, що рівень перенапруг у всіх розглянутих випадках перевищує рівень, допустимий для ізоляції КЛ та у ряді випадків для електродвигунів за зниженими в процесі експлуатації рівнем ізоляції Ефективним заходом, який практично виключить повторні запалення дуги, є резистивне заземлення нейтралі.

Оснащення нейтралі мережі резисторами практично не позначаються на перенапруженнях, що виникають при первинному запаленні дуги. При правильно обраної величини опору резистора перенапруги при первинному та вторинних запалюваннях дуги практично мають однаковий рівень. Тому зробимо інженерну оцінку закону розподілу кратностей перенапруг, що виникають при ОДЗ в кабельних мережах, на основі аналізу максимумів перенапруг на неушкоджених фаз при первинному запаленні дуги. На величини цих максимумів впливає, в основному, міжфазна ємність, протяжність кабельної мережі та момент запалення дуги.

В даний час міські кабельні мережі та мережі власних потреб електричних станцій виконуються на основі кабелів з масляно-паперовою ізоляцією з секторними жилами, котрим $C_{\phi\phi}/C_{\phi} = 0,25-0,3$.

При обліку ємнісного зв'язку фази, на якій сталося ОДЗ, зі здоровими фазами при запаленні дуги виникають три основні перехідні складових: високочастотна, середньочастотна та низькочастотна. Низькочастотна складова, пов'язана з появою напруги усунення нейтралі; високочастотна - із перезарядкою ємностей непошкоджених фаз за рахунок міжємнісних зв'язків; середньочастотна - із перезарядкою ємностей через індуктивність джерела.

Максимум напруги на непошкоджених фазах настає через половину періоду середньої частоти. Якщо знехтувати загасанням складової середньої частоти, то максимум напруги на неушкодженій фазі визначиться як:

$$U_{max} = 2u_{ввн}(0) - u_{0+} \quad (2.7)$$

де $u_{ввн}(0)$ – вимушена складова напруги в режимі замикання на землю u_0 – початкова напруги на неушкодженій фазі.

Як вимушена складова, так і початкова напруга будуть залежати від первинного кута запалення ψ . Запишемо напругу на ушкодженій фазі А у вигляді:

$$u_A(t) = U_{фм} \sin(\omega t + \psi) \quad (2.8)$$

Тоді напругу наприклад на фазі В запишемо таким чином

$$u_{B-}(t) = U_{фм} \sin(\omega t + \psi - 2\pi/3) \quad (2.9)$$

Таким чином вимушена складова напруги у фазі В у режимі замикання на землю буде

$$u_{ввн}(0) = u_B(0) + u_N(0) = U_{фм} [\sin(\psi - 2\pi/3) - \sin \psi] \quad (2.10)$$

Підставляючи (2.10) у (2.7) після деяких перетворень отримуємо

$$U_{max B} = U_{фм} [(-2.5 + \eta) \sin \psi + (\sqrt{3}/2) \cos \psi] \quad (2.11)$$

З (2.11) видно, що рівень перенапруг на непошкодженій фазі залежить від кута запалювання дуги та від відношення міжфазної ємності до фазної. При $C_{фф}=0$ максимум напруги спостерігається у разі запалення дуги при куті

70,9° і сягає рівня 2,645 Uф. У цьому випадку при $m=0.274$ і $\eta=0.215$ максимум напруги 2.44 Uф досягається при куті запалювання 110 °.

На рис. 2.1 наведено залежність максимуму перенапруг на неушкодженій фазі від кута запалювання дуги

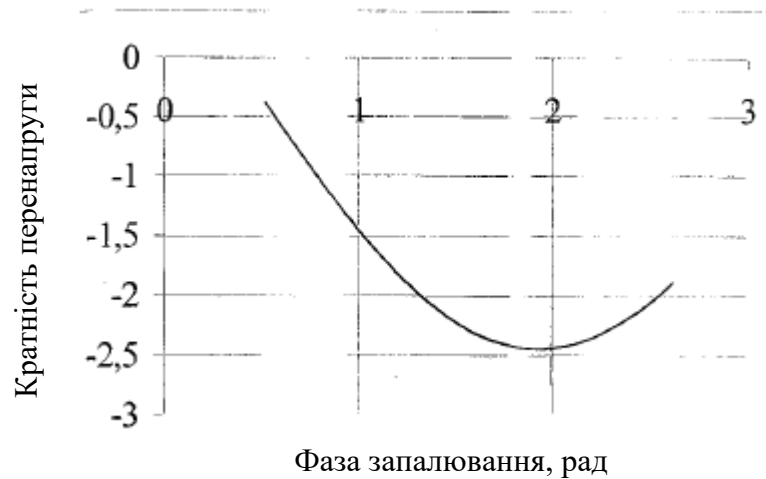


Рис. 2.1.

Приймаючи кути запалення дуги розподіленими згідно із законом рівномірної щільності, визначимо функцію розподілу модулів максимумів перенапруг:

$$F_{U_{\max}}(x) = P(U_{\max} < x) = \frac{\Psi_{\max .x} - \Psi_{\min .x}}{\Psi_{\max} - \Psi_{\min}} = \frac{\Psi_{\max .x} - \Psi_{\min .x}}{2.62 - 0.52} \quad (2.12)$$

$\Psi_{\max .x} - \Psi_{\min .x}$ - інтервал кута запалювання дуги, коли $U_{\max} < x$.

Функція розподілу максимумів перенапруг на неушкодженій фазі при первинному запаленні дуги наведена на рис.2.2.

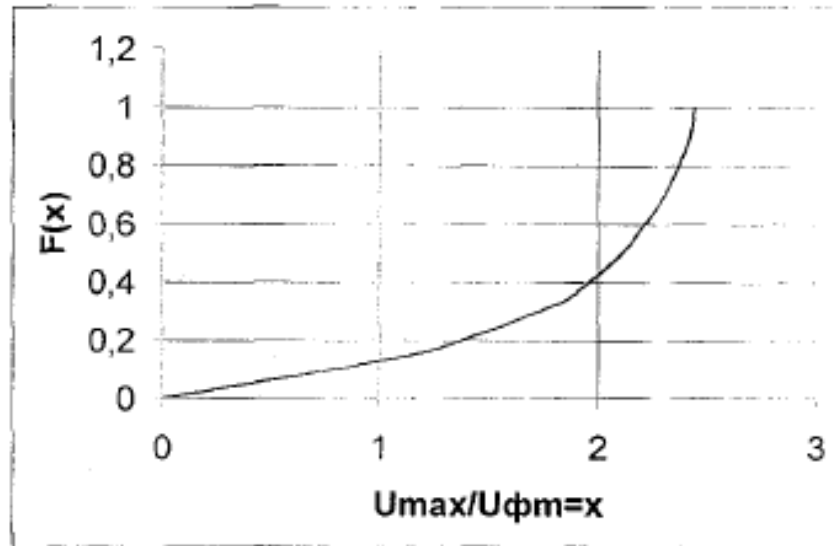


Рис. 2.2.

З рис. 2.2. видно, що максимальні перенапруги та значення максимуму за ймовірності його перевищення 0,05 практично збігаються. Тому перенапруги при первинному запаленні дуги досягають рівня, порядку 2.3...2.4 U_f , тобто, практично виявляються безпечними для нормальної ізоляції кабельних мереж.

При приєднанні резистора до нейтралі мережі через індуктивність спеціального пристрою ефективність резистивного заземлення нейтралі знижується. Тому слід оцінити максимально допустиму величину індуктивності нульової послідовності пристрою. Спрощена Схема для розрахунку процесів після згасання дуги наведена на рис. 2.3.

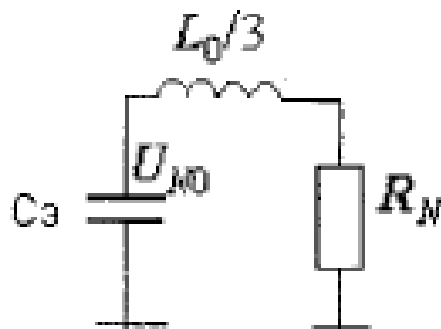


Рис.2.3. Розрахункова схема для визначення напруги в нейтралі після згасання дуги

Всі процеси у схемі (рис. 2.3.) носять аперіодичний характер при наступній умові

$$\alpha^2 \geq \omega_0^2, \text{ где } \alpha = R_N 3 / 2L_0, \omega_0 = 1 / \sqrt{L_0 C_{\phi\delta}} \quad (2.13)$$

Якщо взяти

$$R_N = \frac{1}{k_R 3\omega C_{\phi\delta}}$$

Тоді

$$L_0 \leq \frac{1}{4 k_R^2 \omega^2 C_{\phi\delta}} \quad (2.14)$$

де $k_R = 1/3\omega C_{\phi\delta} R_N$

Напряга в нейтралі у випадку аперіодичного процесу:

$$u_N(t) / U_{N0} = \frac{\omega_0^2}{2\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}} \left[\frac{1}{p_2} e^{p_2 t} - \frac{1}{p_1} e^{p_1 t} \right] \quad (2.15)$$

де $p_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$

На рис. 2.4. наведено процеси, що відбуваються у нейтралі після згасання дуги при $C_{\phi}=1$ мкФ та різних значеннях індуктивності

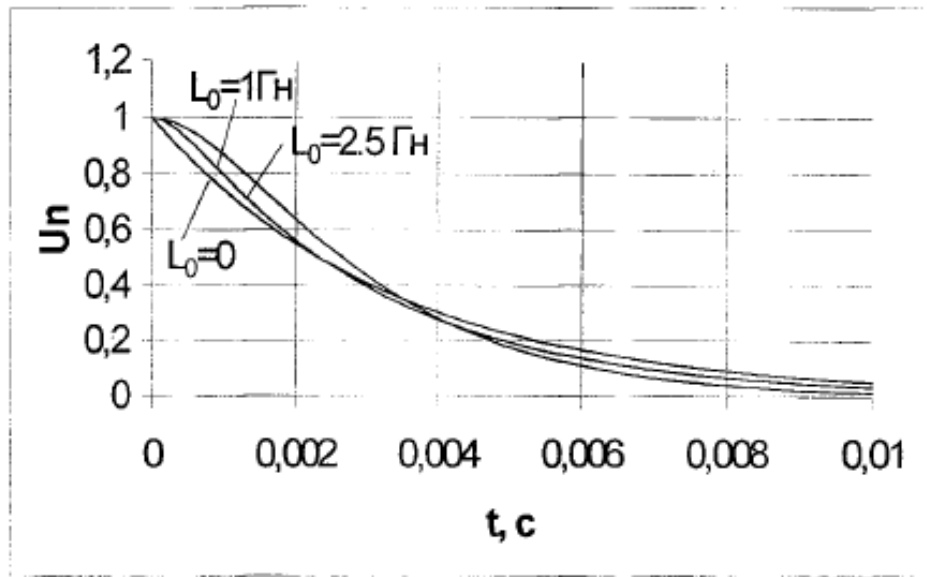


Рис. 2.4. Процеси в нейтралі мережі після згасання електричної дуги

З малюнка випливає, що з усіх розглянутих індуктивностей напруга на нейтралі через половину періоду промислової частоти практично стає нульовою.

2.4. Ферорезонансні процеси в кабельних мережах

Як відомо, небезпечні ферорезонансні коливання не характерні для кабельних мереж через їх великі ємності на землю. Однак, у таких мережах можливе виникнення так званого «перехідного» ферорезонансу, що супроводжується значними струмами в обмотках вищої напруги трансформаторів напруги (ТН). На ці струми впливають також і опори нейтралі мережі. Одержання відповідних кількісних результатів та присвячений цей підрозділ роботи.

Вирішення поставленого завдання проводилося в дещо спрощеній схемі. При виконанні досліджень у цьому підрозділі було прийнято такі припущення:

- не враховувалися індуктивності КЛ (через їх малість та несуттєвого впливу на процеси, що визначаються індуктивностями намагнічування ТН);

- приймалося, що на момент досягнення напругою непошкоджених фаз при первинному запалюванні дуги свого максимуму поточкозчеплення цих фаз рівні поточкозчеплень в момент первинного запалення.
- початкові значення напруг на фазах та напруга на нейтралі приймалися рівними деяким початковим значенням, що відповідають запалення первинної дуги в момент максимуму напруги на фазі А.

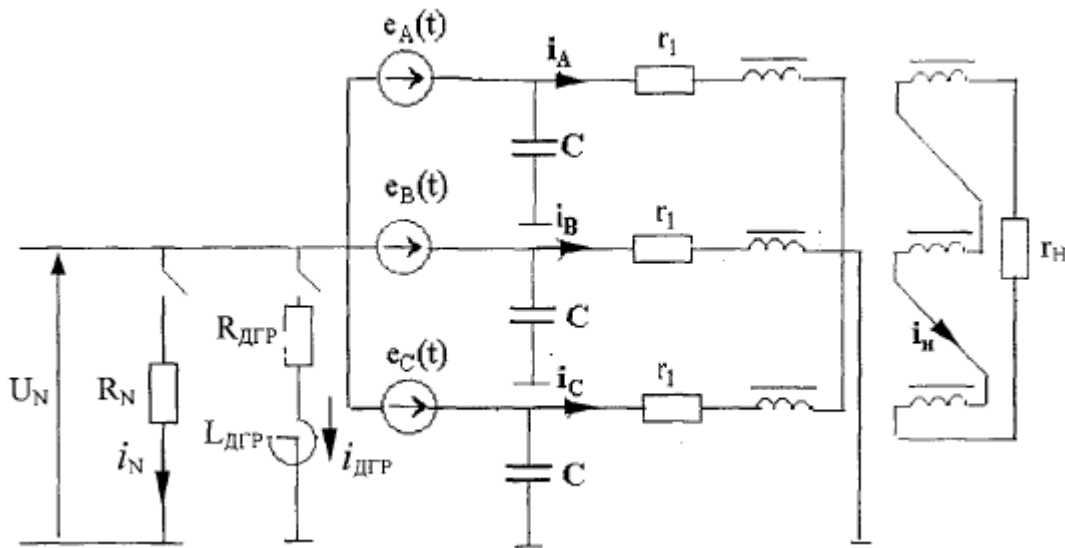


Рис. 2.5. Розрахункова схема для дослідження ферорезонансних явищ у кабельних мережах

Запишемо рівняння, що описують процеси після згасання електричної дуги у розрахунковій схемі:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\Psi_\gamma(t)}{dt} &= e_\gamma(t) + au_N(t) + bi_{\mu\gamma}(t) + c[i_{\mu\eta}(t) + i_{\mu\nu}(t)] \\
 \frac{du_N(t)}{dt} &= du_N(t) + gi_{\mu 0}(t) + hi_{ДГР}(t), \\
 \frac{di_N(t)}{dt} &= mu_N(t) + ni_{ДГР}(t), \\
 i_{\mu 0}(t) &= \frac{i_{\mu A}(t) + i_{\mu B}(t) + i_{\mu C}(t)}{3}, i_{\mu A}(t) = \varphi(\Psi_A(t)), i_{\mu B}(t) = \varphi(\Psi_B(t)), \\
 i_{\mu C}(t) &= \varphi(\Psi_C(t)).
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

де

$$a = -r'_n / 3z, \quad b = \frac{r_1^2}{3z} - r_1, \quad c = \frac{r_1^2}{3z}, \quad d = -\left(\frac{1}{R_N} + \frac{3}{z}\right) / c_3,$$

$$g = \frac{r'_n}{z} / c_3, \quad z = \frac{r'_n}{3} + r_1, \quad m = 1 / L_{ДГР}, \quad n = R_{ДГР} / L_{ДГР},$$

$$r'_n = r_n \cdot \kappa_{ТН}^2,$$

$\kappa_{ТН}$ – коефіцієнт трансформації ТН

Початкові значення напруги у нейтралі та потокозчеплень приймалися такими

$$u_N = \frac{5}{3} U_{\phi m}, \quad \psi_A(0) = 0, \quad \psi_B(0) = -\frac{E}{\omega} \sin \frac{2\pi}{3}, \quad \psi_C(0) = \frac{E}{\omega} \sin \frac{2\pi}{3}, \quad i_N(0) = i_{ДГР}(0) = 0$$

Дуже гарні результати моделювання для ТН різних типів дає апроксимація залежностями [14]:

НТМИ – 6 :

$$i_\mu = 7.519 \cdot 10^{-18} \psi^{11} \quad \text{при } |\psi| \leq 40.87 \text{ Вб},$$

$$i_\mu = 0.39138943 \psi - 11.996086 \quad \text{при } 0 \leq \psi \leq 40.87 \text{ Вб},$$

$$i_\mu = 0.39138943 \psi + 11.996086 \quad \text{при } 0 \geq \psi \geq -40.87 \text{ Вб},$$

НТМИ – 10 : .

$$i_\mu = 4.16 \cdot 10^{-21} \psi^{11} \quad \text{при } |\psi| \leq 72.58 \text{ Вб},$$

$$i_\mu = 0.2 \psi - 11.648 \quad \text{при } 0 \leq \psi \leq 72.58 \text{ Вб},$$

$$i_\mu = 0.2 \psi + 11.648 \quad \text{при } 0 \geq \psi \geq -72.58 \text{ Вб}$$

ЗНОМ – 35 [24] :

$$i_\mu = 4 \cdot 10^{-27} \psi^{11}$$

(i_μ – в А, ψ – в Вб).

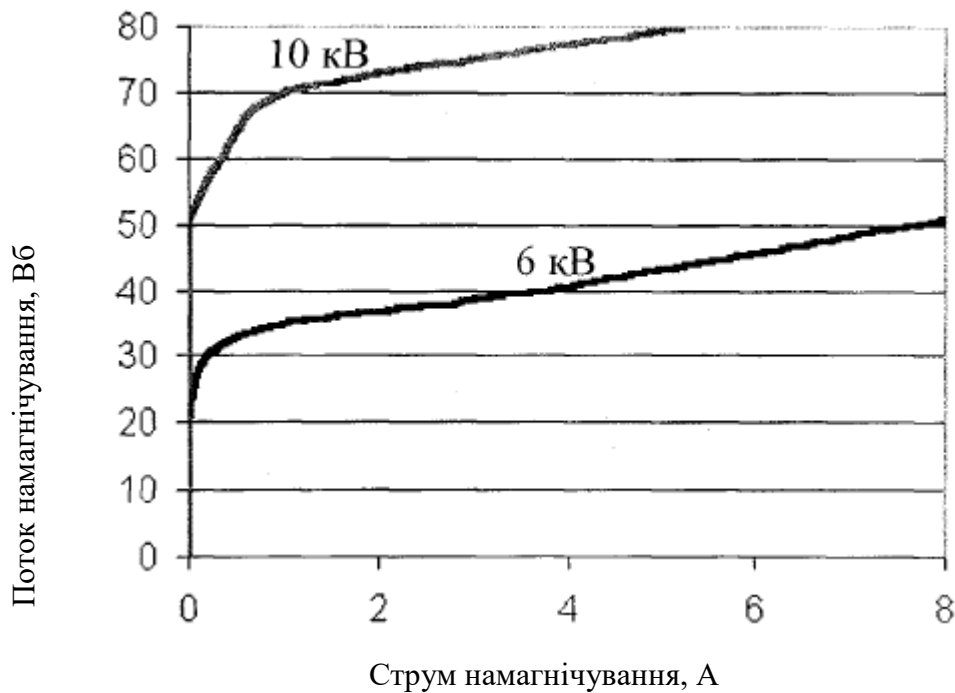


Рис. 2.6. Криві намагнічування ТН НТМІ-6 та НТМІ-10

Як зазначалося вище, до великих похибок розрахунків може привести розкид у криві намагнічування у трансформаторів різних років виготовлення. Тому результати розрахунків, що наводяться далі розглядати як деякою мірою якісні, що дозволяють порівняти струми в обмотках вищої напруги ТН за різних способів заземлення нейтралі кабельної мережі.

Розглянемо ферорезонансні процеси при наступних ємностях мережі, характерних для міських та промислових кабельних мереж ($C_e = 3C_f = 0,1$ і 30 мкФ). Аналіз процесів проведемо, як при розімкнутому трикутнику ТН ($r_N \rightarrow \infty$), так і при включеному в розсічення цього трикутника опору 25 Ом.

Розрахункові осцилограми струмів в обмотках ТН наведено нижче на рис. 2.6. – 2.13.

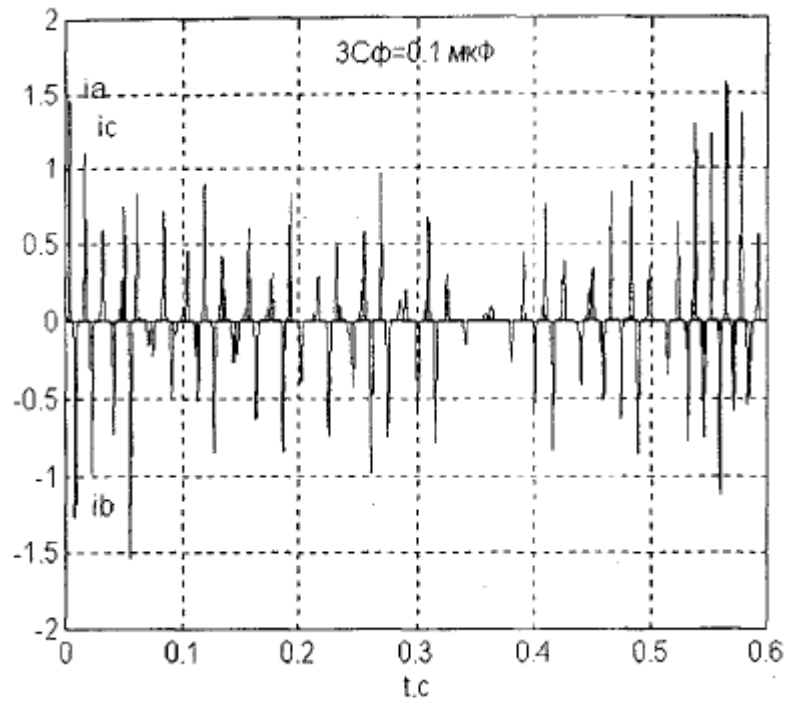


Рис. 2.6. Нейтраль ізольована; $r_N \rightarrow \infty$, $C_e = 0,1 \mu\text{F}$

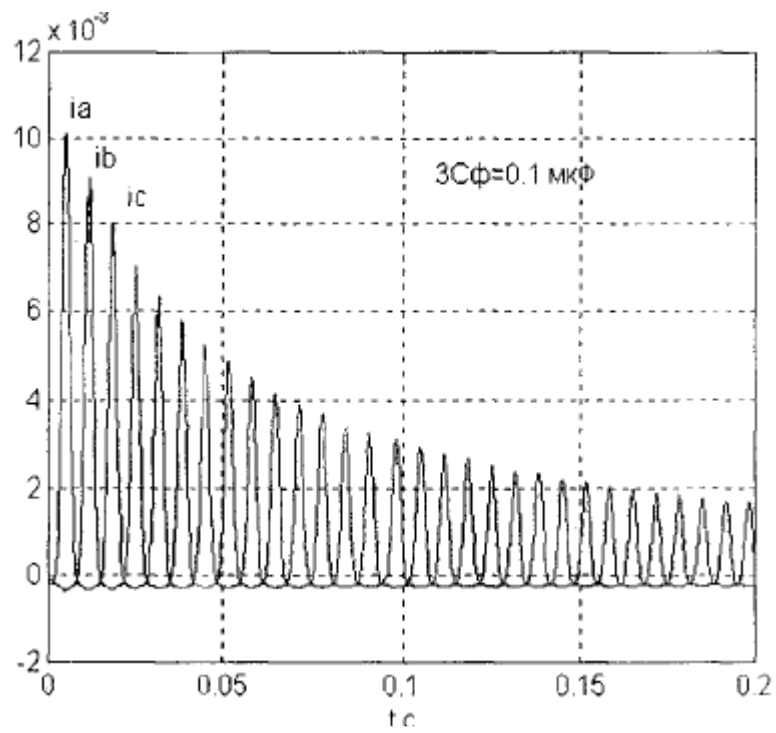


Рис. 2.7. Нейтраль ізольована; $r_N = 25 \Omega$, $C_e = 0,1 \mu\text{F}$

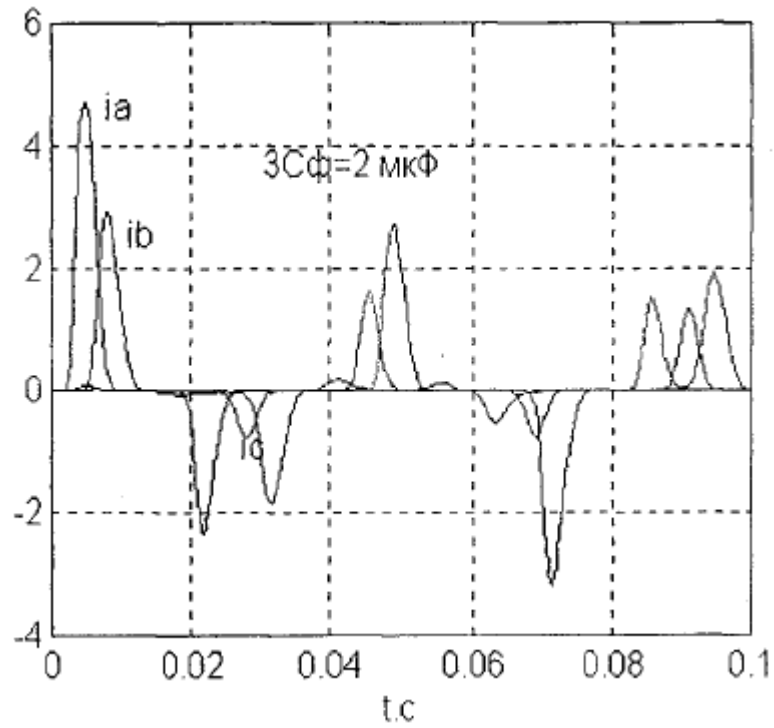


Рис. 2.8. Нейтраль ізолювана; $r_N \rightarrow \infty$, $C_e = 2 \text{ мкФ}$

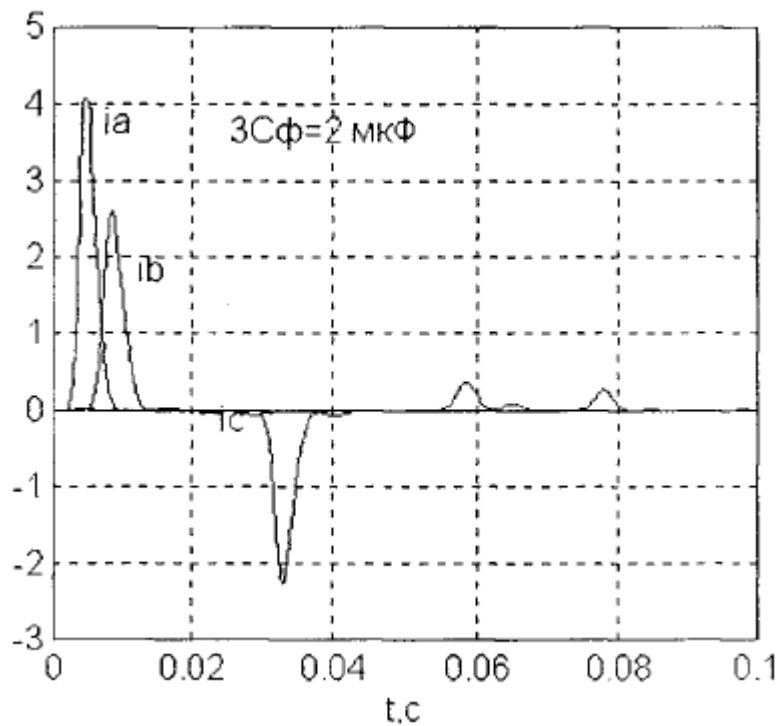


Рис. 2.9. Нейтраль ізолювана; $r_N = 25 \text{ Ом}$, $C_e = 2 \text{ мкФ}$

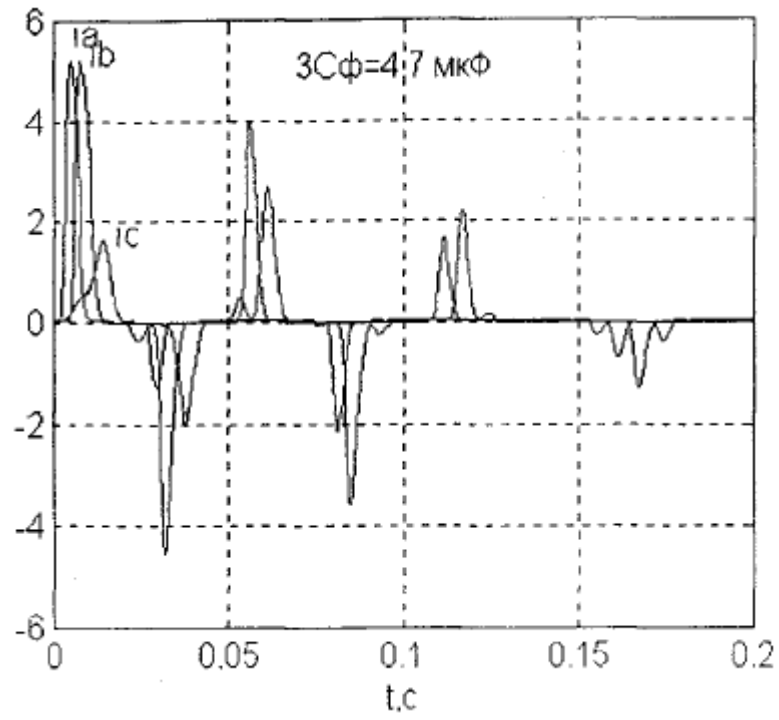


Рис. 2.10. Нейтраль ізольована; $r_N \rightarrow \infty$, $C_e = 4,7 \text{ мкФ}$

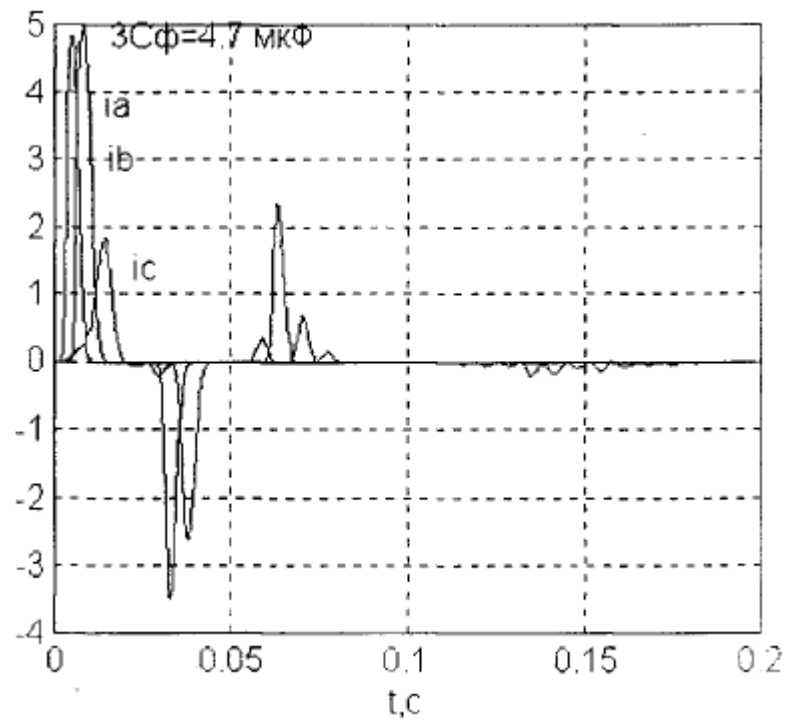


Рис. 2.11. Нейтраль ізольована; $r_N = 25 \text{ Ом}$, $C_e = 4,7 \text{ мкФ}$

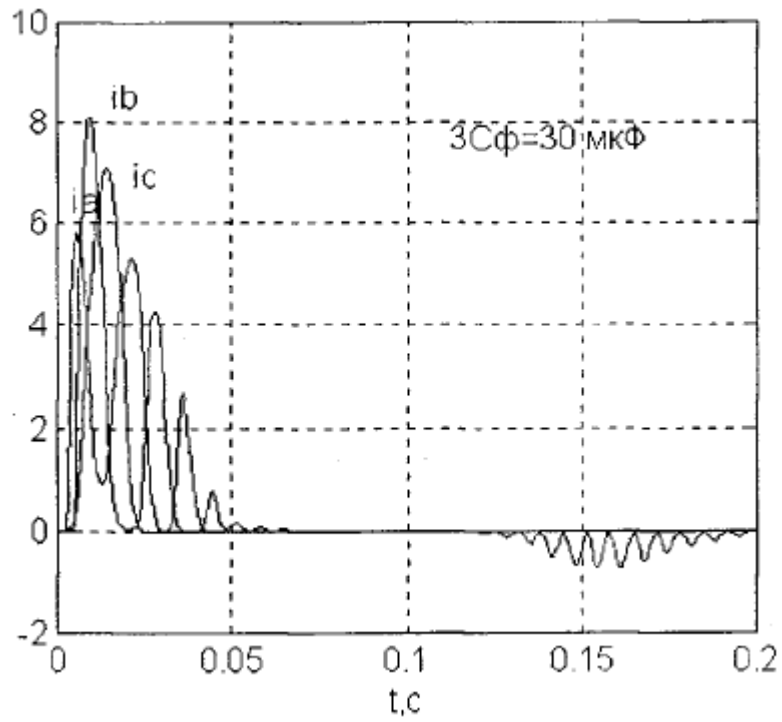


Рис. 2.12. Нейтраль ізольована; $r_N \rightarrow \infty$, $C_e = 30 \text{ мкФ}$

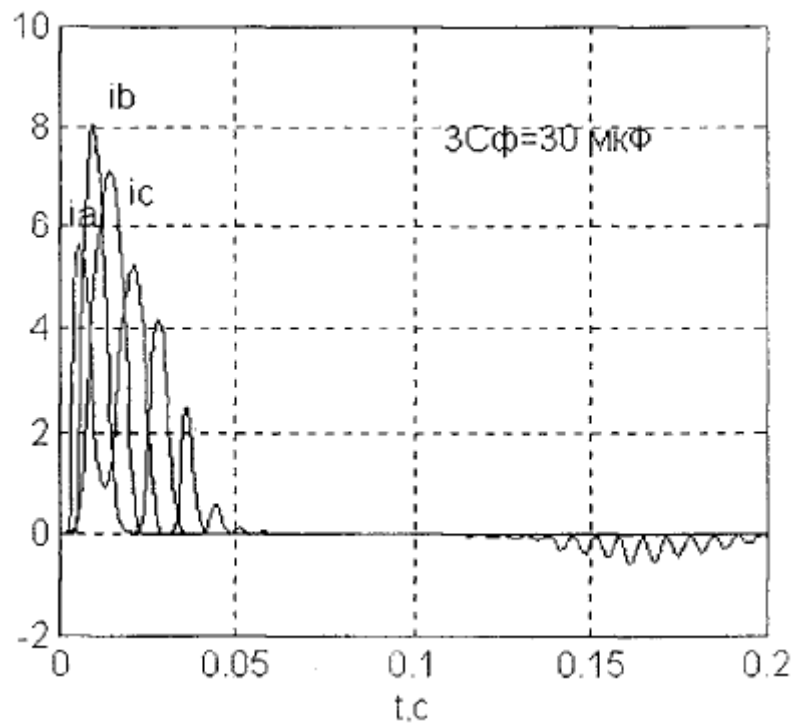


Рис. 2.13. Нейтраль ізольована; $r_N = 25 \text{ Ом}$, $C_e = 30 \text{ мкФ}$

З рис. 2.6 -2.13 видно, що резонанс у стаціонарному режимі спостерігається лише за ємності мережі 0.1 мкФ. В інших розглянутих випадках спостерігається так званий перехідний ферорезонанс. З збільшенням ємності мережі струми в обмотці ВН ТН збільшуються, див. (табл. 2.8).

Табл. 2.8 Струми у первинній обмотці ТН (А)

$r_N, \text{ Ом}$	$C_e, \text{ мкФ}$			
	0,1	2	4,7	30
∞	1,5	4,8	5,3	8,0
25	0,001	4,0	5,0	8,0

З таблиці видно, що вже з ємності, що дорівнює 2 мкФ опір у розімкнутому трикутнику ТН, що дорівнює 25 Ом, практично не впливає рівень струмів в обмотці ВН. При малих ємностях мережі це опір засмучує резонанс і суттєво впливає на струми в обмотці ВН ТН. «Зрив» ферорезонансу, що встановився, у разі розімкнутого трикутника при прийнятій моделі кривої намагнічування ТН відбувається за сумарної ємності мережі приблизно дорівнює 0.4 мкФ. Це відповідає довжини кабельної мережі близько 500 м. Опір 25 Ом запобігає умові виникнення ферорезонансних коливань у режимі, що встановився, і в цьому випадку.

Перехідний резонанс спостерігається при всіх ємностях мережі, причому, чим більше ємність, тим більше пік струму в обмотці ВН ТН (при протяжності близько 60 км пік струму в обмотці ВН ТН досягає величини близько 8 А). У разі необхідності зниження цього піку необхідно застосовувати більше потужний опір в обмотці ТН, з'єднаної у відкритий трикутник. У цьому випадку може знадобитися застосування спеціальної схеми. Для того, щоб у нормальному експлуатаційному режимі не перевантажувати обмотку ТН, доцільно передбачати два ступені опорів: постійно підключати опір порядку 25 Ом та шунтувати цей опір опором меншої величини (5...10 Ом) після реєстрації напруги нульової послідовності

у разі появи в обмотці ТН значних струмів, обумовлених появою субгармонічних через ферорезонансні явища.

Оцінити можливість повторного запалення дуги на пошкодженій фазі і перекриттів на непошкоджених фазах можна, проаналізувавши напруги на фазах після згасання дуги, які, своєю чергою, залежить від напруги на нейтралі. При малих ємностях мережі та відсутності резистора у відкритому трикутнику ТН процеси на нейтралі носять коливальний нелінійний характер.

Тепер покажемо аналогічні осцилограми при заземленні нейтралі через резистор.

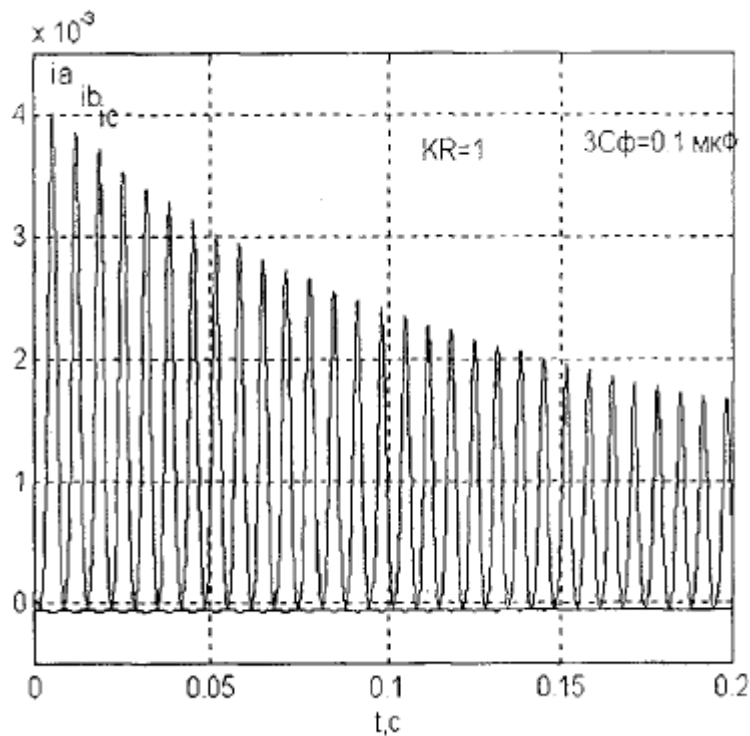


Рис. 2.14. Нейтраль заземлена через резистор; $r_N=25 \text{ Ом}$, $C_e=0,1 \text{ мкФ}$

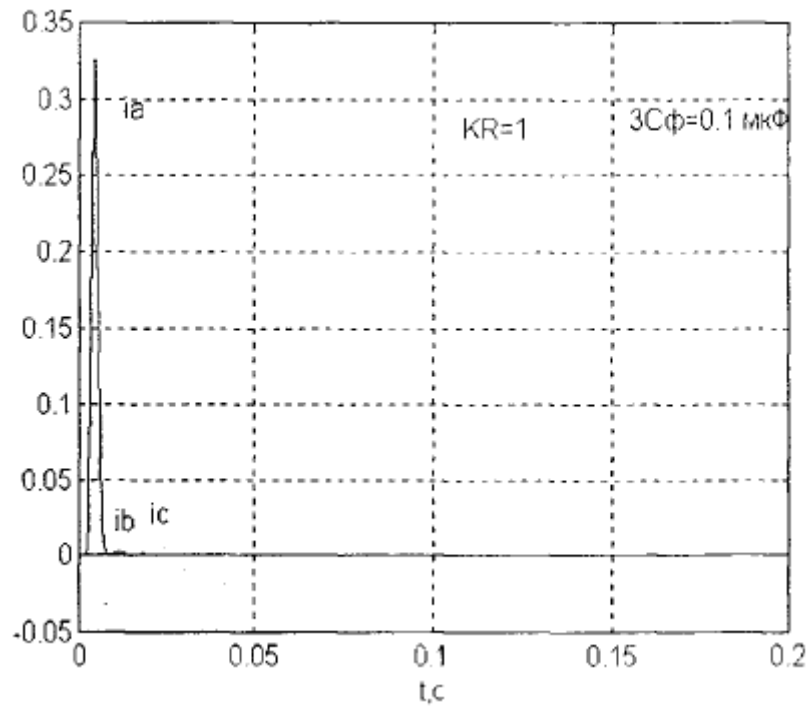


Рис. 2.15. Нейтраль заземлена через резистор; $r_N \rightarrow \infty$, $C_e = 0,1 \text{ мкФ}$

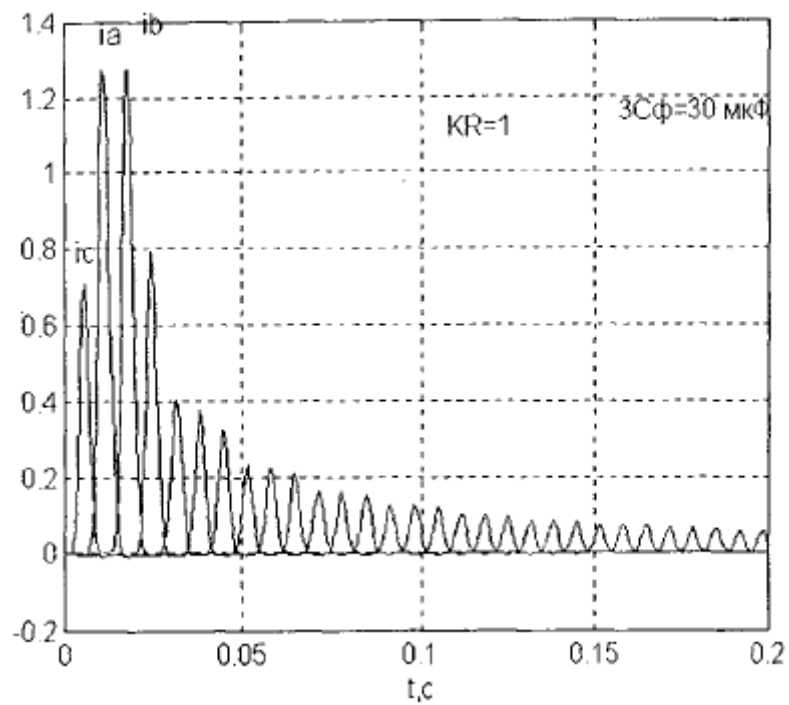


Рис. 2.16. Нейтраль заземлена через резистор; $r_N = 25 \text{ Ом}$, $C_e = 30 \text{ мкФ}$

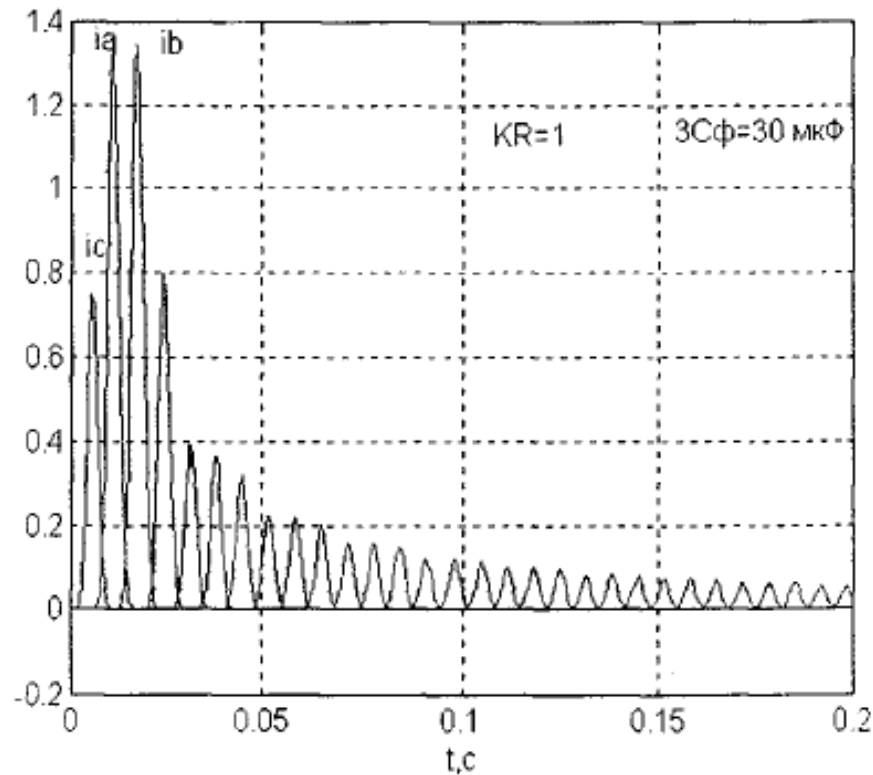


Рис. 2.17. Нейтраль заземлена через резистор; $r_N \rightarrow \infty$, $C_e = 30$ мкФ

Порівняння осцилограм (нейтраль ізольована та резистивна) показує, що у разі малої ємності мережі та оснащення трикутника ТН додатковим резистором включення до нейтралю резистора несуттєво змінює характер процесу. У разі відсутності r_N оснащення нейтралі мережі резистором кардинально змінює процес (при $r_N \rightarrow \infty$ спостерігалися ферорезонансні коливання). З рис. 2.17 видно, що єдиний пік струму в обмотці ВН ТН має тривалість порядку 0,01 і величину 0,32 А.

У табл. 2.9 наведено результати розрахунків максимумів струмів в обмотці ВН ТН при наступних умовах:

Таблиця 2.9 Максимальні значення струмів у обмотках ВН ТН при резистивному заземленні

C _e , мкФ	k _R				
	0	0,8	1	1,2	1,5
0,1	1,46	0,46	0,33	0,23	0,13

0,5	3,65	0,91	0,59	0,35	0,18
1,0	4,7	1,09	0,66	0,39	0,2
3,0	6,0	1,45	0,95	0,58	0,25
6,0	6,5	1,82	1,16	0,66	0,27
30,0	8,0	2,31	1,36	0,74	0,29

З таблиці видно, що максимум струму в обмотці ВН ТН зменшується із збільшенням коефіцієнта та зі зменшенням ємності мережі. При встановленні резистора в нейтралі стійких ферорезонансних явищ не спостерігається. По обмотці ВН ТН течуть імпульси струму тривалістю близько 0.01 с і амплітудами в діапазоні 0.3... 1.4 А. Напруга на нейтралі досить швидко (за 0.01 - 0.02 с) згасає і ймовірність повторних запалювань дуги практично дорівнює нулю.

РОЗДІЛ 3

ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕЗИСТИВНОГО ЗАЗЕМЛЕННЯ НЕЙТРАЛІ В КАБЕЛЬНИХ МЕРЕЖАХ 6-10 кВ

3.1. Математична модель процесів при замиканнях на землю в мережі із резистивним заземленням

У попередніх розділах показано, що при оснащенні нейтралі мережі резисторами найбільші перенапруги виникають при первинному запалення дуги. Розрахункова схема при дослідженні процесів, що супроводжують ОДЗ, наведено на рис. 3.1.

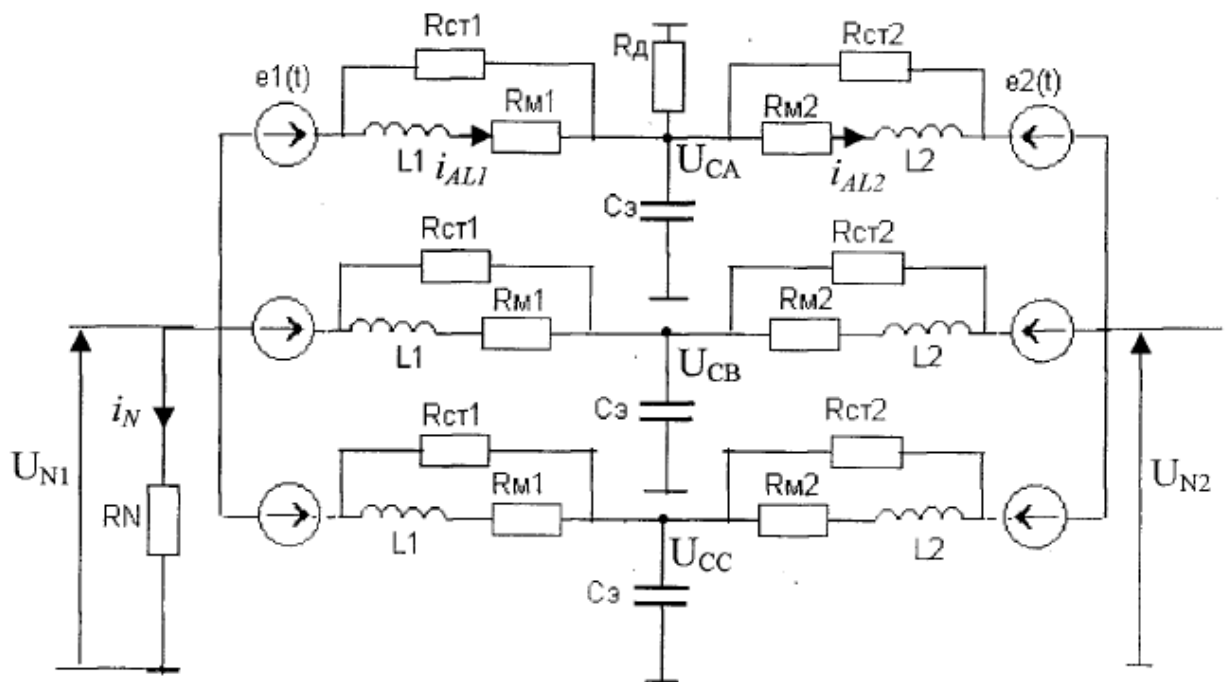


Рис. 3.1. Розрахункова схема мережі для дослідження ОДЗ

Наведемо параметри елементів схеми заміщення:

Джерело живлення генератор типу СВФ 1285/275-43 640 МВт, повна потужність 711 МВт; $U_{ном} = 15,75$ кВ; $L_d'' = 0,33$ мГн; $R_m = 0,001$ Ом; $R_{ст} = 38$ Ом; $C_{ГФ} = 1,2$ мкФ.

Параметри трансформатора. Потужність трансформатора з розщепленою обмоткою нижчої напруги типу ОРЦ-533000/525/15.75 – 530 МВА; уквн-нн=13.5% ($L_T = 0,139$ мГн), унн-нн=52%; $R_m = 0,0008$ Ом; $R_{ст} = 198$ Ом; $C_{1T} = 7,3$ нФ, $C_{2T} = 9$ нФ, $C_2 = 16,3$ нФ.

Параметри струмопроводів. Тип ТЕКН-20, довжини: на фазі А - 78 м, на фазі В – 92 м, на фазі С – 72 м; середня довжина на фазу - 80 м, Спог.тек=80 пФ/м. Отже, Сток = 6,4 нФ.

Вхідна ємність ТВП-Ствп = 1 нФ.

Таким чином, $C_e = 1.2 + 0.016 + 0.006 + 0.001 = 1,223$ мкФ, при цьому $C_T/C_e = 0,98$, тобто. еквівалентна ємність мережі генераторної напруги практично збігається з ємністю джерела живлення.

Опір резистора в нейтралі визначаємо як:

$$R_N = 1/(3-5)C_3\omega = (860-515) \text{ Ом.}$$

Запишемо рівняння для схеми рис. 3.1., що характеризують процес ОДЗ

$$\begin{aligned} \frac{du_{CA}}{dt} &= \frac{1}{C_A} i_{CA}; \\ \frac{du_{CB}}{dt} &= \frac{1}{C_B} i_{CB}; \\ \frac{du_{CC}}{dt} &= \frac{1}{C_C} i_{CC}; \\ \frac{di_{AL1}}{dt} &= -\frac{R_{M1}}{L_1} i_{AL1} + \frac{1}{L_1} u_{N1} + \frac{1}{L_1} e_{A1} - \frac{1}{L_1} u_{CA}; \\ \frac{di_{BL1}}{dt} &= -\frac{R_{M1}}{L_1} i_{BL1} + \frac{1}{L_1} u_{N1} + \frac{1}{L_1} e_{B1} - \frac{1}{L_1} u_{CB}; \\ \frac{di_{CL1}}{dt} &= -\frac{R_{M1}}{L_1} i_{CL1} + \frac{1}{L_1} u_{N1} + \frac{1}{L_1} e_{C1} - \frac{1}{L_1} u_{CC}; \end{aligned} \tag{3.1}$$

$$\frac{di_{AL2}}{dt} = -\frac{R_{M2}}{L_2} i_{AL2} + \frac{1}{L_2} u_{N2} + \frac{1}{L_2} e_{A2} - \frac{1}{L_2} u_{CA};$$

$$\frac{di_{BL2}}{dt} = -\frac{R_{M2}}{L_2} i_{BL2} + \frac{1}{L_2} u_{N2} + \frac{1}{L_2} e_{B2} - \frac{1}{L_2} u_{CB};$$

$$\frac{di_{CL2}}{dt} = -\frac{R_{M2}}{L_2} i_{CL2} + \frac{1}{L_2} u_{N2} + \frac{1}{L_2} e_{C2} - \frac{1}{L_2} u_{CC};$$

$$i_{CA} = -\left(\frac{1}{R_D} + \frac{1}{R_{CT1}} + \frac{1}{R_{CT2}}\right)u_{CA} + \frac{1}{R_{CT1}}u_{N1} + \frac{1}{R_{CT2}}u_{N2} + i_{AL1} + i_{AL2} + \frac{1}{R_{CT1}}e_{A1} - \frac{1}{R_{CT2}}e_{A2};$$

$$i_{CB} = -\left(\frac{1}{R_{CT1}} + \frac{1}{R_{CT2}}\right)u_{CB} + \frac{1}{R_{CT1}}u_{N1} + \frac{1}{R_{CT2}}u_{N2} + i_{BL1} + i_{BL2} + \frac{1}{R_{CT1}}e_{B1} - \frac{1}{R_{CT2}}e_{B2};$$

$$i_{CC} = -\left(\frac{1}{R_{CT1}} + \frac{1}{R_{CT2}}\right)u_{CC} + \frac{1}{R_{CT1}}u_{N1} + \frac{1}{R_{CT2}}u_{N2} + i_{CL1} + i_{CL2} + \frac{1}{R_{CT1}}e_{C1} - \frac{1}{R_{CT2}}e_{C2};$$

При заземленні нейтралі через резистор

$$u_{N1} = -\frac{R_N R_{CT1}}{R_{CT1} + 3R_N} (i_{AL1} + i_{BL1} + i_{CL1}) - \frac{R_N}{R_{CT1} + 3R_N} (e_{A1} + e_{B1} + e_{C1}) +$$

$$+ \frac{R_N}{R_{CT1} + 3R_N} (u_{CA} + u_{CB} + u_{CC})$$

$$u_{N2} = -\frac{R_{CT2}}{3} (i_{AL2} + i_{BL2} + i_{CL2}) - \frac{1}{3} (e_{A2} + e_{B2} + e_{C2}) + \frac{1}{3} (u_{CA} + u_{CB} + u_{CC})$$

Далі розглянемо спосіб заземлення нейтралі на перший максимум коливань. Результати наведено в таблиці 3.1.

Табл. 3.1. Вплив способу заземлення нейтралі на максимум перенапруги при першому запалюванні дуги

Спосіб заземлення нейтралі	$K_L,$ (K_R)	$\frac{U_{Bm}}{U_{\phi m}}$	$\frac{U_{Cm}}{U_{\phi m}}$	$\frac{U_{Nm}}{U_{\phi m}}$	$\delta, \%$
Ізольована	0	2,137	2,135	1,423	-
Резистивна	1	2,138	2,134	1,422	0,28

З таблиці випливає, що спосіб заземлення нейтралі практично не впливає рівень перенапруг, що виникають при першому запаленні дуги. Це пояснюється тим, що процеси під час першого запалювання характеризуються високою частотою, яка визначається параметрами схеми заміщення для прямої послідовності фаз:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_3 2C_3}} \quad L_3 = \frac{3L_1L_2}{2(L_1 + L_2)}$$

У розглянутій схемі блоку ця частота становить 8,32 кГц. Частота ж у схемі нульової послідовності, наприклад, у схемі з ДГР, близька до 50 Гц. Очевидно, що при різних частотах процеси в схемі нульової послідовності практично не впливають на максимум коливань при Перше запалення дуги. Спосіб заземлення нейтралі впливає на подальший розвиток процесу, що супроводжує ОДЗ, зокрема, на можливість повторних запалювань дуги. На рисунках 3.2. та 3.3. гаведено процеси в мережі після згасання дуги.

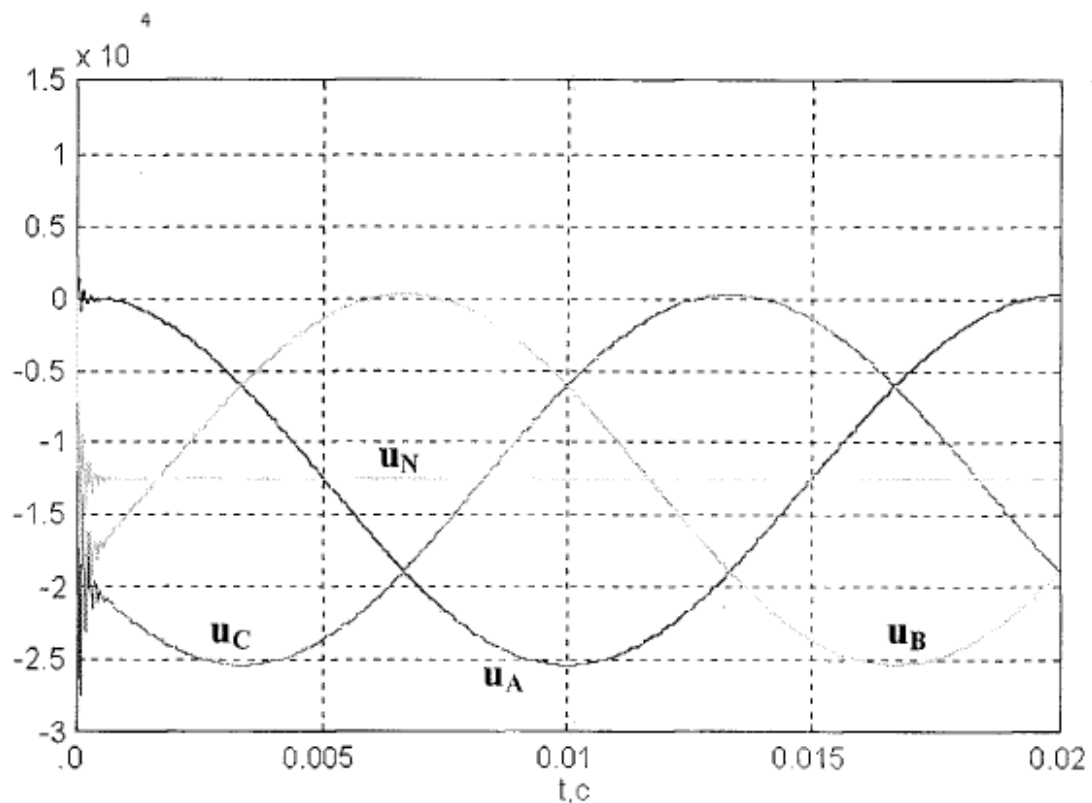


Рис. 3.2. Ізольована нейтраль. Напруги після затухання високочастотного перехідного процесу

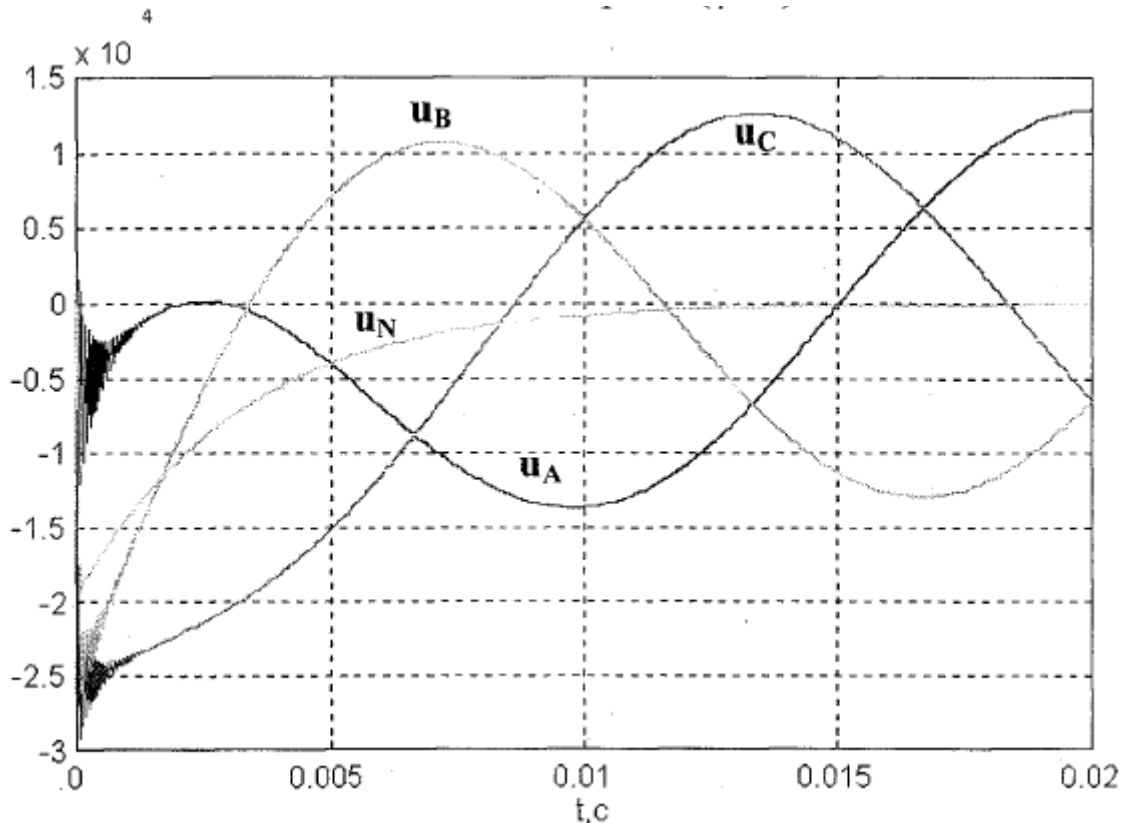


Рис. 3.3. Резистивна нейтраль. Напруги після затухання високочастотного перехідного процесу

3.2. Дослідження перенапруг в мережі при повторному запалюванні дуги

Оцінку рівня перенапруг, що виникають при повторному запалюванні дуги, слід проводити з урахуванням імовірнісного характеру процесу ОДЗ.

В якості випадкових факторів можна, зокрема, прийняти моменти запалювань та згасань дуги. Далі наводиться методика та результати визначення ймовірнісних характеристик напруги на неушкоджених фазах при вторганому запаленні дуги в схемі з ізольованою нейтраллю та при першому запаленні дуги у схемі з нейтраллю, заземлену через резистор.

Як випадкові фактори, для визначення процесів при повторному запалюванні дуги, приймалися такі:

- момент першого запалення дуги, що характеризується фазою ψ під час запису е.д.с. фази А;
- момент згасання дуги;
- момент повторного запалення дуги.

Усі три чинники є випадковими величинами. Причому перший і третій фактори – безперервні величини, а другий – дискретна величина, визначається моментами переходу повного струму в дузі через нульове значення (погасання дуги).

Прийmemo далі, що безперервні величини розподілені за законами рівномірної щільності в діапазонах:

$\psi = -35^\circ \dots +35^\circ$; U_{\max} - максимум напруги на фазі А після першого згасання дуги, а дуга гасне з однаковою ймовірністю за будь-якого з перших трьох моментів проходження струму в дузі через нульове значення. Розрахунки показали, що у розглянутій схемі ці моменти майже не залежить від моменту первинного запалення дуги.

Як функціональний зв'язок між випадковими факторами та функцією відгуку - рівнем перенапруг при ОДЗ - було прийнято повний квадратичний поліном [16]:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_1^2 + b_4 X_2^2 + b_5 X_1 X_2 \quad (3.2)$$

Матриця коефіцієнтів регресійного поліному визначалася наступним чином:

$$B = C^{-1} F^{*T} Y$$

де $C = F^{*T} F$ - інформаційна матриця

Y – матриця стовбець відгуку.

$$F^* = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 \\ 1 & -1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & -1 \\ 1 & 1 & -1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & -1 \\ 1 & -1 & -1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 \\ 1 & 1 & 0 & \frac{1}{3} & -\frac{2}{3} & 0 \\ 1 & -1 & 0 & \frac{1}{3} & -\frac{2}{3} & 0 \\ 1 & 0 & 1 & -\frac{2}{3} & \frac{1}{3} & 0 \\ 1 & 0 & -1 & -\frac{2}{3} & \frac{1}{3} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -\frac{2}{3} & -\frac{2}{3} & 0 \end{bmatrix}$$

Коефіцієнти поліному (3.2) наведені нижче:

$$b_0 = 2,7$$

$$b_1 = -0,0183$$

$$b_2 = 0,22$$

$$b_3 = -0,098$$

$$b_4 = -0,183$$

$$b_5 = 0,005$$

Адекватність моделі між кратністю перенапруг та випадковими факторами перевірялася за критерієм Фішера

$$F^* = \frac{S_{ad}^2 (\nu = 4)}{S_Y^2 (\nu = 3)}$$

де дисперсія функції відгуку

$$S_Y^2 = \frac{1}{3}(b_1^2 + b_2^2) + \frac{4}{45}(b_3^2 + b_4^2) + \frac{1}{9}b_5^2$$

дисперсія адекватності

$$S_{a\partial}^2 = \frac{Q}{f_{a\partial}} = \frac{\sum_{l=1}^9 (y_l - \tilde{y}_l)^2}{f_{a\partial}}$$

При кутах запалення ψ і напруги повторного запалення U_z , розподілених за законами рівномірної щільності, оцінки математичних очікувань кратності перенапруг визначаються як:

$$\bar{U}_{\max} / U_{\phi\max} = b_0 + \frac{1}{3}(b_3 + b_4) \quad (3.3)$$

Отримані поліноми регресії надають змоги отримати умовні закони розподілення $F_{U_{\max}/\text{tin}}(y)$. Так по β розподіленню:

$$F_Z(z) = \frac{B_Z(\varphi, \zeta)}{B(\varphi, \zeta)} \quad (3.4)$$

де $Z = \frac{(Y - y_{\min})m_Z^2}{y_{\max} - y_{\min}} \quad (Y = U_{\max} / U_{\phi\max})$

$$\varphi = \frac{(1 - m_Z)m_Z^2}{D_Z} - m_Z; \quad \zeta = \frac{\varphi}{m_Z} - \varphi;$$

$$M[Z] = \frac{M[Y] - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}}, \quad D[Z] = \frac{S_Y^2}{(y_{\max} - y_{\min})^2}$$

Безумовна функція розподілу максимальних напруг при ймовірності моментів згасання електричної дуги визначається таким чином:

$$F_{U_{\max}}(y) = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 F_{U_{\max}/\text{tin}}(y) \quad (3.5)$$

На рисунках 3.4 та 3.5 показано відповідно безумовні функції розподілення мережі з ізолюваною та резистивною нейтраллю

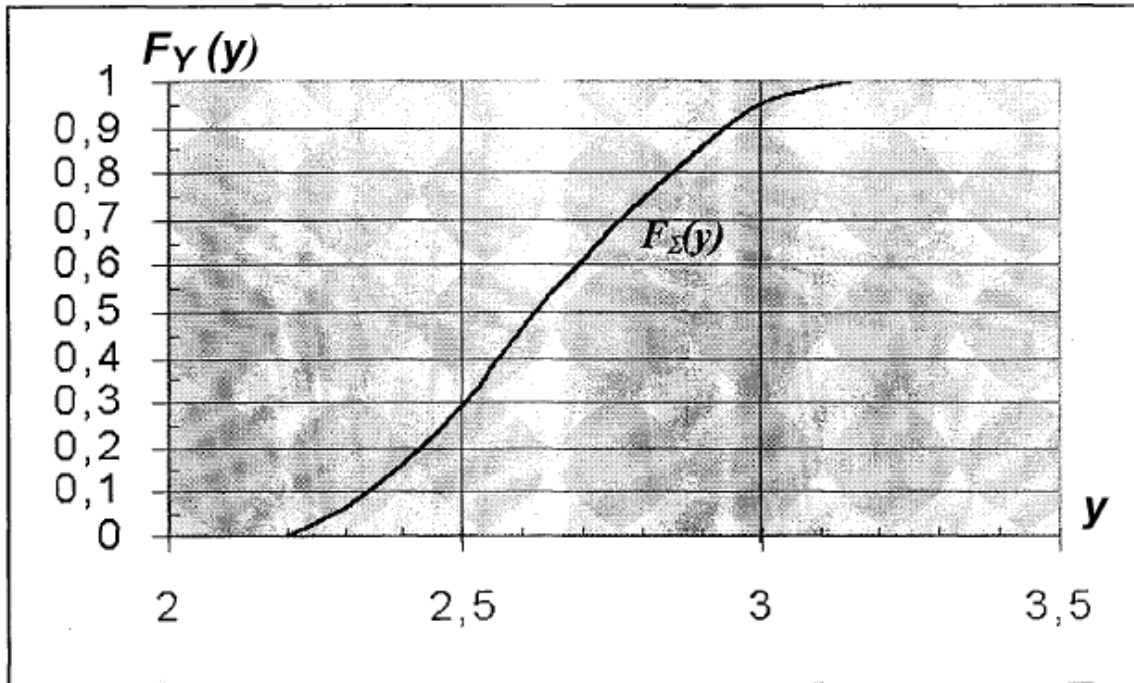


Рис. 3.4. Функція розподілення максимальних перенапруг при ізолюваній нейтралі мережі

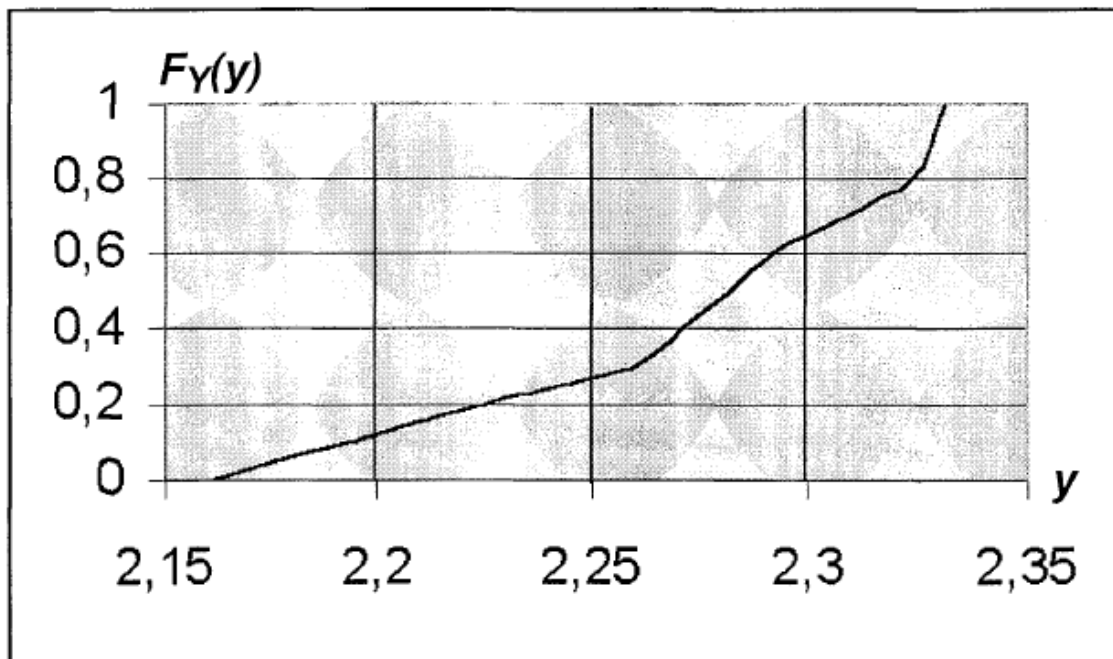


Рис. 3.5. Функція розподілення максимальних перенапруг при резистивному заземленні нейтралі мережі ($R_N = 1/3 \omega C$)

Як видно з графіків кратність перенапруг при резистивному заземленні майже в 1,5 разів менше ніж при ізолюваному способі заземлення нейтралі.

3.3. Вимоги до заземлюючих резисторів в нейтралях кабельних електричних мережах

Ефективність оснащення кабельних мереж резисторами у нейтралі зумовлена, в основному, питаннями обмеження перенапруг, що супроводжують однофазні дугові замикання на землю. У разі малих ємностей мережі (наприклад, короткої кабельної тупикової лінії) можливо виникнення ферорезонансних небезпечних перенапруг, обумовлених насиченням магнітопроводів трансформаторів напруги. Включення у нейтраль мережі резистора, обраного за умовою (3.6) дозволить не тільки виключити ферорезонансні перенапруги, а й знизити струмові навантаження в обмотках вищої напруги трансформаторів для контролю ізоляції в комутаціях, що призводять до підвищення напруги на нейтралі мережі. Тому верхня межа величини опору резистора в кабельних мережах доцільно вибирати, таким чином, щоб введення опору в нейтраль запобігало багатомісним ушкодженням при дугових замиканнях на землю:

$$R_N \leq 1/3 \omega C_\phi \quad (3.6)$$

Для кабельних мереж не характерні значні струми небалансу і навіть у разі ізолюваної нейтралі мережі, побудова селективного захисту від ОЗНЗ та визначення пошкодженого фідера не зустрічають перешкод. При резистивному заземленні нейтралі, вибраним відповідно до наведеним виразом, струм ОЗНЗ зростає приблизно в $\sqrt{2}$ рази, по порівняно з режимом ізолюваної нейтралі, і тому селективність захисту від ОЗНЗ лише збільшиться.

Отже, для забезпечення надійного спрацювання пускових органів РЗ та селективного відключення фідера, на якому сталося замикання на землю, немає необхідності зменшувати величину опору резистора, вибрану з умови (3.6).

Якщо ж з якихось причин необхідно цю величину зменшити, то межу опору резистора необхідно вибирати таким чином, щоб не спрацював захист від міжфазних замикань.

$$R_{NH} = f(I_{C3M\Phi})$$

Таким чином, величину опору резистора в кабельних мережах доцільно приймати рівною:

$$f(I_{C3M\Phi}) \leq R_N \leq 1/(3...5) \omega C_{\Phi} \quad (3.7)$$

Щодо вимог до енергетичних характеристик резисторів.

Розглянемо енергію, що поглинається (при неврахуванні розсіювання) резистором у нейтралі протягом процесу ОДЗ. Вище було показано, що за умови оснащення мережі резистором можуть спостерігатися повторні запалення дуги, але перенапруги при повторних запалюваннях дуги, що не перевищують рівнів, що виникають при первинному запаленні. При горінні дуги в муфтах або кабелях відбувається науглерожування дугового проміжку, що перешкоджає згасання дуги. Тому при оцінці енергії, що поглинається резистором у протягом процесу ОДЗ, прийmemo із запасом, що відбуваються три повторні запалювання та згасання дуги при напрузі на нейтралі мережі, що дорівнює $1,67U_{фм}$. У цьому випадку струм у опорі після згасання дуги змінюється за закону

$$i_{R_N}(t) = \frac{U_{N0}}{R_N} e^{-t/T} \quad (3.8)$$

де T – постійна часу, яка дорівнює $0,01/3...0,01/5$ секунд.

Енергія, яку поглинає заземлюючий опір

$$w_{R_N} = 3 \frac{U_{N0}^2}{R_N} \int_0^{\infty} e^{-2t/T} dt = 3 \frac{U_{N0}^2}{R_N} \cdot \frac{T}{2} \quad (3.9)$$

Якщо прийняти, що:

$$U_{N0} = 8,6 \text{ кВ};$$

$$T = 0,01/3 \text{ та } 0,01/5$$

то (3.9) запишемо у наступному вигляді (кДж):

$$\begin{aligned} w_{R_N} &= \frac{369}{R_N} \text{ при } T = 0,01/3 \text{ с,} \\ w_{R_N} &= \frac{221}{R_N} \text{ при } T = 0,01/5 \text{ с} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Поскільки

$$R_N = 10^4 / 3C_3 \text{ при } T = 0,01/3 \text{ с, } R_N = 10^4 / 5C_3 \text{ при } T = 0,01/5 \text{ с}$$

то енергія, що поглинається на резисторі не залежить від його опору, а визначається лише ємністю мережі.

На рис. 3.7. показано залежність енергії на резисторі від ємності електричної мережі

З рис. 3.7. видно, що в процесі ОДЗ енергія, яка поглинається резистором при зміні еквівалентної ємності від 0 до 30 мкФ лежить у діапазоні:

$$\text{при } R_N = 1/3\omega C - 0,4 - 120 \text{ кДж};$$

$$\text{при } R_N = 1/5\omega C - 0,67 - 194 \text{ кДж.}$$

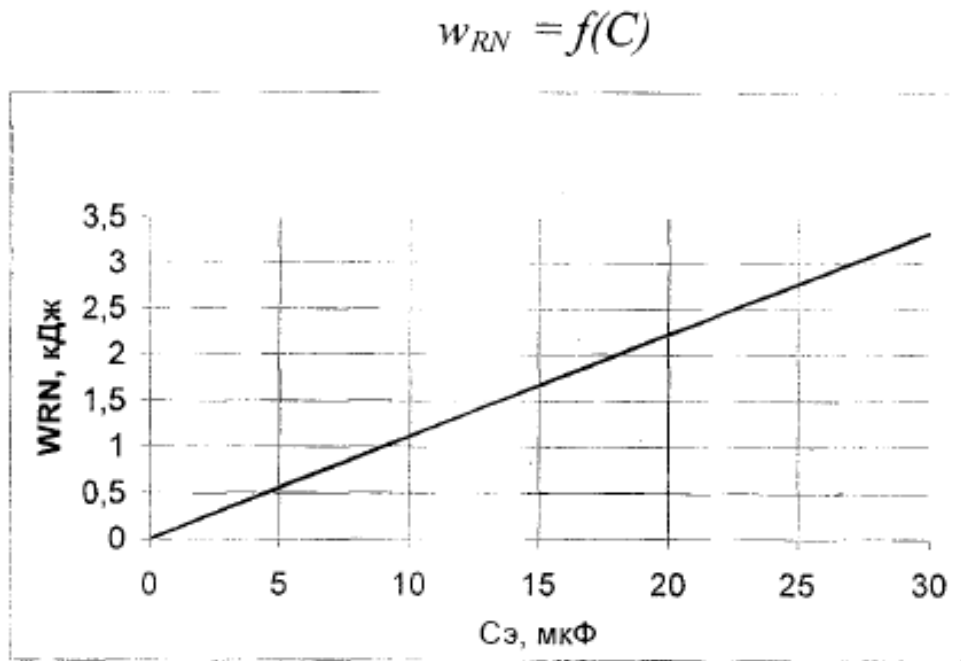


Рис. 3.7. Залежність енергії, що поглинається резистором від ємності електричної мережі

Захист фідерів міських та промислових кабельних мереж спрацьовує на відключення пошкодженого фідера чи певного навантаження. Час дії захисту близько кількох секунд. Протягом часу ОЗНЗ через резистор тече струм під впливом номінального напруги.

В табл. 3.2. наведені значення потужності резисторів та енергія, що поглинається ними для кабельних мереж 6 та 10 кВ різної довжини.

Табл. 3.2. Необхідна потужність заземлюючих резисторів в процесі ОЗНЗ для електричних мереж 6 – 10 кВ

l , км		0.3	3.3	6.66	16.66	33.3	100
C_z , мкФ		0.1	1	2	5	10	30
$R_N=1/3\omega C$, Ом		33333	3333	1667	666	333	111
P , кВт	6кВ	0.36	3.6	7.2	18	36	108
	10кВ	1	10	20	50	100	300
W , кДж	6кВ	1.08	10.8	21.6	54	108	324
	10кВ	3	30	60	150	300	900

Із аналізу табл. 3.2. видно, що необхідна потужність для заземлюючих резисторів 6 кВ лежить у діапазоні 0,36 – 108 кВт, а для 10 кВ в діапазоні 1 – 300 кВт.

3.4. Практичні питання по застосуванню резистивного заземлення

Резистори для заземлення нейтралі виробляють понад 40 компаній по всьому світу: в Японії (MILUOKI RESISTOR), Індії (NATIONAL RESISTORS ONIES), Італії (TELEMA), США (JENKINS), Німеччині (GINO ESE), Туреччина (HILKAR), Канаді (AVTRON, ICP), тощо.

Аналіз міжнародного досвіду показує, що резистивне заземлення нейтралі є найбільш поширеним і ефективним методом, який знаходить широке застосування в електричних мережах середньої напруги на промислових підприємствах за кордоном. Такий спосіб заземлення дозволяє суттєво знизити рівень перенапруг, забезпечує стабільність роботи мережі, підвищує безпеку експлуатації та спрощує виявлення місць пошкодження. Завдяки цим перевагам він розглядається як оптимальне рішення для систем електропостачання з високими вимогами до надійності та захисту обладнання.

Далі покажемо конструктивне виконання резисторів різних марок і типів, як закордонного так і вітчизняного виробництва.





Рис.3.8.

а) резистор 6,0 кВ/34, 5 Ом/100 А виробництва GINO ESE GmbH
(Німеччина)

б) резистор 2,5 кВ / 3,45 Ом/400 А виробництва Avtron Loadbank Inc
(США)



Рис. 3.9. Резистор РЗ-8000-51-35 на підстанції 150/35/10 кВ



а)

б)

Рис. 3.10 Резистор заземлення:

а — рідинний зовнішнього встановлення;

б — суцільний металевий внутрішнього встановлення



Рис. 3.11. Резистори РЗ-800-15-6(10) в мережі ГРП ТЕЦ 6-10 кВ



Рис. 3.12. Резисторы РЗ-4000-102-35 на ВРП-35 кВ

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Заходи щодо безпечної експлуатації електроустановок

Ураження людини електричним струмом завжди відбувається внаслідок дотику щонайменше до двох точок електричного кола, між якими існує різниця потенціалів. Ступінь небезпеки такого контакту визначається величиною струму, що проходить крізь тіло людини, або напругою дотику, під дією якої вона опинилася.

Напруга дотику та відповідно сила струму залежать від низки факторів:

- способу включення людини в електричне коло;
- рівня напруги в мережі;
- електричної схеми та режиму нейтралі;
- стану та ступеня ізоляції струмоведучих частин;
- ємності провідників відносно землі;
- умов навколишнього середовища (вологість, температура, стан ґрунту);
- електричного опору тіла людини, який змінюється залежно від стану шкіри (суха, волога, пошкоджена).

Таким чином, небезпека ураження струмом не є сталою величиною. В одних випадках включення людини в коло може супроводжуватися протіканням відносно малих струмів, що не становлять значної загрози. В інших же — величина струму може досягати критичних або смертельно небезпечних значень. Особливо небезпечними є ситуації, коли через тіло людини проходить струм понад 50–100 мА, адже він може призвести до зупинки дихання, фібриляції серця та летального наслідку.

З огляду на це, особливу увагу приділяють правильному вибору режиму нейтралі, надійності ізоляції, заземленню та використанню захисних засобів. Це дозволяє знизити ймовірність ураження людини та забезпечити безпечні умови експлуатації електроустановок.

Під час експлуатації електроустановок часто виникають ситуації, коли навіть найбільш досконала конструкція обладнання не гарантує повної

безпеки персоналу. Тому виникає необхідність застосування спеціальних засобів і пристроїв, які додатково захищають працівників від небезпечних виробничих факторів.

До таких засобів належать прилади, апарати, переносні та пересувні пристосування й устаткування, що забезпечують захист людини від:

- ураження електричним струмом;
- впливу електричної дуги та іонізованого середовища;
- дії електромагнітних полів;
- термічних та токсичних продуктів горіння;
- механічних небезпек (ударів, падінь з висоти, уражень уламками тощо).

Ці засоби не входять до конструктивних елементів електроустановок, а лише доповнюють системи стаціонарного захисту — огороження, блокування, сигналізацію, заземлення, занулення та інші технічні заходи.

Умовно захисні засоби поділяють на три основні групи:

1. Ізольючі — пристрої, що перешкоджають проходженню струму через тіло людини (діелектричні рукавички, калоші, килимки, ізолювальні штанги, покажчики напруги).

2. Огороджувальні — пристосування, що обмежують доступ до струмоведучих частин та небезпечних зон (щити, переносні огорожі, попереджувальні плакати й знаки).

3. Запобіжні — допоміжні засоби, що знижують ймовірність нещасних випадків у складних або аварійних умовах (запобіжні пояси, каски, захисні окуляри, спецодяг, протигази, страхувальні пристрої).

Комплексне застосування цих засобів разом із дотриманням правил техніки безпеки та експлуатаційних інструкцій забезпечує високий рівень захисту персоналу, мінімізує ризик виробничого травматизму та підвищує надійність роботи електроустановок.

На рисунку 4.1. показано схему – інфографіку із зазначеними групами захисту.



Рис. 4.1. Інфографіка – схема засобів безпечного виконання робіт в електроустановках

4.2. Розрахунок заземлення ТП 10/04 кВ

Визначимо нормативне значення опору заземлення (R_{zn}). У випадку, коли заземлювальний пристрій застосовується одночасно для електроустановок із напругою до 1000 В та понад 1000 В.

$$R_z = U_p / I_z = 125 / 27 = 4,63 \text{ Ом};$$

Згідно вимог [4] R_z повинен бути не більше 4 Ом.

Розрахунковий питомий опір нашого ґрунту:

$$\rho_p = \rho_{\text{табл}} \cdot \Psi = 200 \cdot 1,3 = 260 \text{ Ом}\cdot\text{м},$$

Де $\rho_{\text{табл}}$ - довідникове значення

$\rho_{\text{табл}} = 200 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ - для черноземної зони.

Ψ - коефіцієнт, який для стержньових заземлювачів дорівнює 1,30

Опір одинарного вертикального заземлювача у нашому випадку:

$$R_0 = 0,366 \cdot (\rho_p / l) \cdot (\lg(2 \cdot l / d) + (1/2) \cdot \lg((4 \cdot t + 1) / (4 \cdot t - 1))) = 0,366 \cdot (260 / 5) \cdot (\lg(2 \cdot 5 / 2,5 \cdot 10^{-3}) + (1/2) \cdot \lg((4 \cdot 3 + 5) / (4 \cdot 3 - 5))) = 53,19 \text{ Ом},$$

Довжина (l) заземлювача 5,0 метрів, діаметр – 25 міліметрів.

$$t = h + l/2 = 0,5 + 5/2 = 3 \text{ м};$$

де h – глибина прокладання смуг (приймаємо 0,50 м.)

Кількість заземлювачів:

$$n_0 = R_B / (R_3^H \cdot \eta_0) = 53,19 / (4 \cdot 0,59) = 22,54 \approx 23 \text{ шт.}$$

Довжина горизонтальної з'єднувальної смуги:

$$l_n = 1,05 \cdot a \cdot n = 1,05 \cdot 4 \cdot 23 = 96,6 \text{ м.}$$

Опір смуги (з урахуванням екранування):

$$R_n = 0,366 \cdot ((\rho_p) / (l_n \cdot \eta_n)) \cdot \lg((2 \cdot l_n^2) / (b \cdot n)) = 0,366 \cdot ((260) / (96,6 \cdot 0,51)) \cdot \lg((2 \cdot 96,6^2) / (0,01 \cdot 23)) = 9,48 \text{ Ом};$$

При цьому ширина смуги 10 мм, а товщина 5 мм.

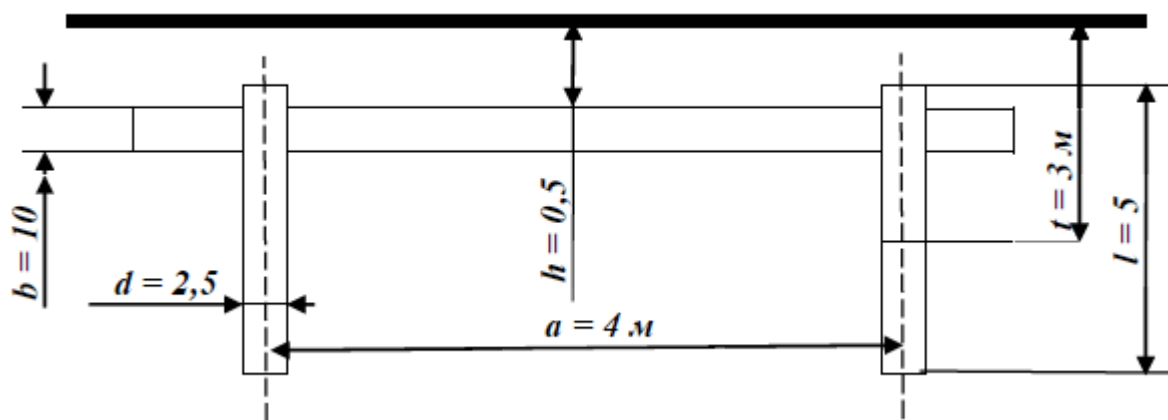


Рис.4.2. Схема прокладки заземлюючого пристрою

Знаходимо необхідний опір вертикальних заземлювачів (з урахуванням опору з'єднувальної смуги):

$$R_{\text{тр}} = (R_n \cdot R_3^{\text{н}}) / (R_n - R_3^{\text{н}}) = (9,48 \cdot 4) / (9,48 - 4) = 6,92 \text{ Ом}$$

Визначаємо остаточну кількість заземлюючих електродів:

$$n = R_0 / (R_{\text{тр}} \cdot \eta_0) = 53,19 / (6,92 \cdot 0,59) = 13,02 \approx 13 \text{ шт.}$$

Перевірка опору заземлювача:

$$R_3 = 1 / ((1/R_{\text{тр}}) + (1/R_n)) = 1 / ((1/6,92) + (1/9,48)) = 3,74 \text{ Ом.}$$

$$3,74 < 4 \text{ Ом}$$

Висновок: розрахункове значення заземлювача цілком задовольняє заданій умові.

На рисунках 4.3. та 4.4. показано зовнішній вигляд та конструкцію штирьового заземлювача, який часто – густо використовується для контурів заземлення трансформаторів різних потужностей та класів напруг.



Рис. 4.3. Зовнішній вигляд заземлювача

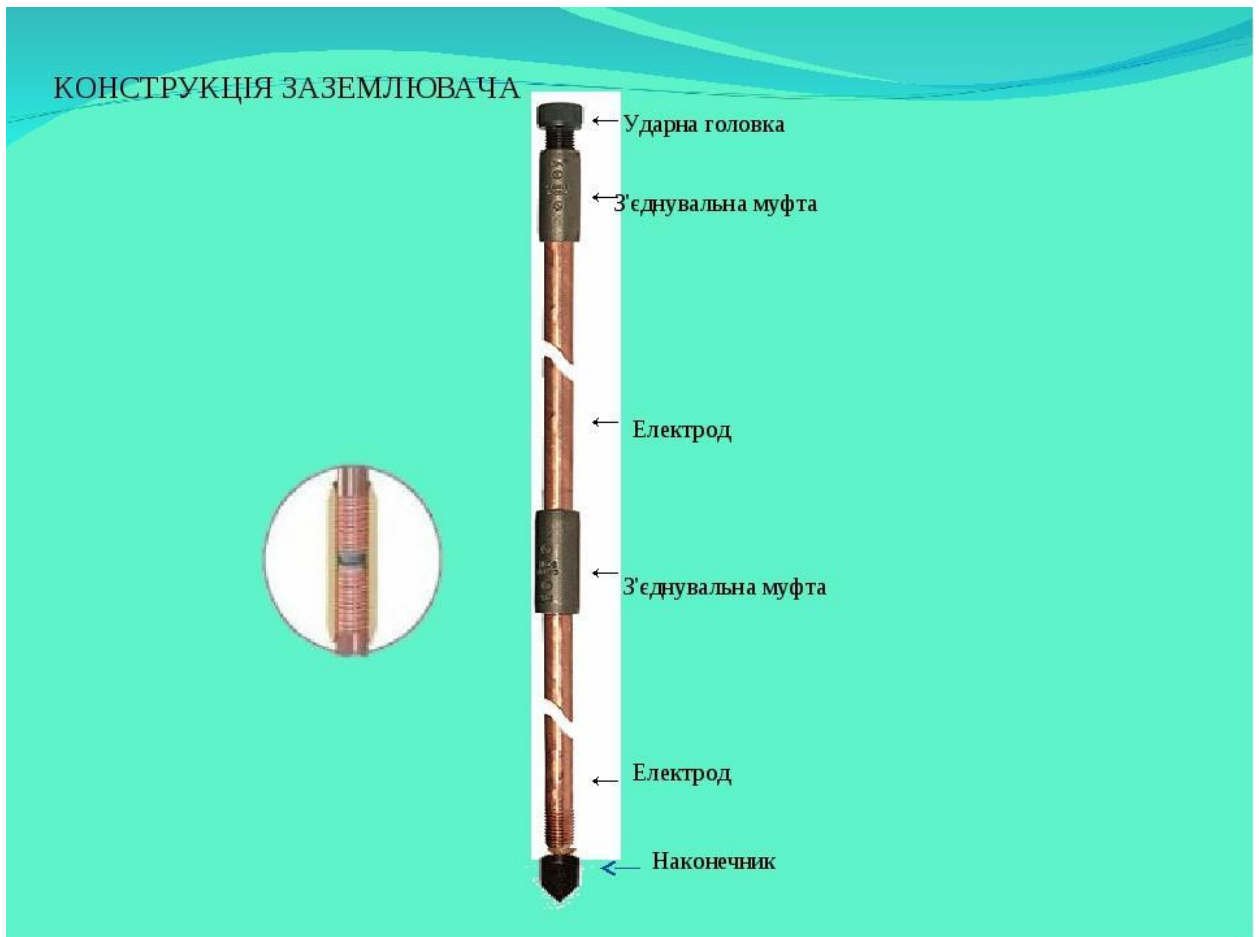


Рис. 4.4. Типова конструкція заземлювача

ВИСНОВКИ

1. Найпоширенішим видом пошкодження в електричних мережах напругою 6–35 кВ є однофазне замикання на землю. Таке явище не завжди розглядається як повноцінна аварія, проте воно становить серйозну небезпеку, оскільки може стати причиною виникнення високих багаторазових перенапруг у мережі. Таким чином, хоча однофазне замикання на землю і не призводить негайно до виходу мережі з ладу, воно потребує обов'язкового контролю й своєчасного усунення, адже є потенційним джерелом серйозних аварійних ситуацій.

2. Найбільш небезпечними перенапругами, що охоплюють все обладнання кабельної мережі, є перенапруги при ОДЗ, які можуть призводити до багатомісних ушкоджень ізоляції обладнання. Величина перехідного опору в місці замикання на землю суттєво впливає на всі режимні параметри та на чутливість захистів, пов'язаних із виявленням ЗНЗ.

3. Оснащення нейтралі мережі резисторами дозволяє обмежити перенапруги при ОДЗ до рівня, що відповідає первинному запаленню дуги ($\approx 2.3U_{\phi}$). Величина верхньої межі опору резистора в нейтралі залежить від протяжності кабельної мережі та вибирається, виходячи з вимоги практичного виключення повторних запалювань дуги при ОДЗ.

4. Нижню межу опору резистора необхідно вибирати таким чином, щоб не спрацьовував захист від міжфазних замикань. Потужність та енергія, що поглинаються резистором у процесі ОЗНЗ при зміні еквівалентної ємності мережі у діапазоні 0.1...30 мкФ складають:

- на напрузі 6 кВ – 0.35-110 кВт та 1.1-325 кДж;
- на напрузі 10 кВ – 1-300 кВт та 3-900 кДж.

5. Для кабельних мереж не притаманне виникнення стійких небезпечних ферорезонансних коливань. Підвищені струми у первинній обмотці трансформаторів типів НТМІ, ЗНОМ чи ЗНОЛ виникають при $C_{\text{ЕФ}}=0.1 - 0.4$ мкф. При цьому включення у відкритий трикутник опору 25 Ом

не змінює характеру перехідного ферорезонансу, а тому практично марно. Оснащення нейтралі мережі резистором призводить до зменшення цих струмів приблизно в 5 разів до значень 0.3-1.5 А, при тривалості імпульсів струму, що не перевищує 0.01 с.

б. Через відносно високі рівні струмів, що протікають по КЛ в режимі ОЗНЗ навіть у разі ізольованої нейтралі мережі, резистивне заземлення нейтралей цих мереж не привносить додаткових вимог до релейної захисту, що реагує на стаціонарні струми нульової послідовності та тому не вимагає її докорінної перебудови.

ПРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Анализ эффективности существующих режимов нейтрали сетей 6–35 кВ в энергетике / Б. С. Стогний, В. В. Масляник, В. В. Назаров [та ін.] // Технічна електродинаміка. – 2002. – № 3. – С. 37–41
2. Романовський В. І. Аналіз замикань на землю в мережах 6 кВ для вибору оптимального способу заземлення нейтралі / В. І. Романовський, С. М. Леbedка // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 1. – С. 101-104.
3. Гапон Д.А. Резонансні явища у енергосистемі як причина пошкодження електрообладнання / Д.А. Гапон, Н.В. Рудевич // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. 2019. Ч. II. С. 139-140.
4. Правила улаштування електроустановок. ПУЕ. 6-те видання, перероблене та доповнене. Затверджено та надано чинності: Наказ Міненерговугілля України від 21.07.2017 № 476
5. Електричні мережі та системи. Режими роботи розімкнених мереж: Навчальний посібник з дисципліни для всіх форм навчання та студентів іноземців на пряму підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» / Укл. В.В. Кирик. – К. НТУУ «КПІ», 2014. – 130 с.
6. Методичні рекомендації щодо заземлення нейтралі електричних мереж 6-35 кВ через резистор. Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=77549
7. T. Francis, Optimal neutral ground resistor rating of the medium voltage systems in power generating stations, 2015. [Electronic resource]. Available: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/22348972.2015.1110878>
8. Обабков В.К. Синтез адаптивних систем управління резонансними об'єктами. – К.: Наукова думка, 1993. – 225 с.
9. Лагунін В.М., Тептя В.В., Вишневський С.Я. Власні потреби електричних станцій. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 102 с.

10. Експлуатація силових кабельних ліній. Режим доступу: <https://kek.edu.ua/8-ekspluatacija-silovih-kabelnih-linij/>
11. Релейний захист і автоматика: Навч. посібник / С. В. Панченко, В. С. Блиндюк, В. М. Баженов та ін.; за ред. В. М. Баженова. – Харків: УкрДУЗТ, 2020. – Ч. 1. – 250 с.
12. Релейний захист високовольтних електродвигунів. Частина 2 : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / В. В. Тептя, В. О. Комар, В. В. Нетребський, О. О. Рубаненко. – Вінниця : ВНТУ, 2022. – 136 с.
13. Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М. Куценко, В.Ф. Яковлев та ін. – К.: Аграрна освіта, 2013. – 449 с.
14. Особливі режими електричних мереж: Навчальний посібник/ Г.Г. Півняк, А.К. Шидловський, Г.А. Кігель, А.Я. Рибалко, О.І. Хованська. - Д.: Національний гірничий університет, 2009.-376 с.
15. Вавин В.Н. Трансформаторы напряжения и их вторичные цепи. - М.: Энергия, 1977. - 104 с.
16. Котиш А.І. Автоматизовані засоби технічної діагностики та електричного контролю за станом ізоляції в сільських електричних мережах: Автореф. дис... к-та техн. наук: 05.11.13 / НТУ «ХП». – Харків, 2001. – 17 С.
17. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці. Підручник. – Львів: УАД, 2009.- 336с
18. Методичні рекомендації до виконання розділу «Охорона праці і безпека у надзвичайних ситуаціях» у дипломному проекті для студентів енергетичних спеціальностей за освітньо-кваліфікаційним рівнем «спеціаліст» / Укл.: Л. Д. Третякова. – К.: НТУУ «КП», ІЕЕ, 2013. – 52 с.