

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра електричних мереж та систем

«На правах рукопису»
УДК 621.311

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

 В.В. Кирик

« 08 » 2019 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

на тему: «Моделювання мережі 20 кВ з резистивним
заземленням нейтралі»

Виконав:

студент II курсу, групи ЕС-71мн

Шаталов Євген Олександрович

Керівник: професор, д-р техн. наук Кирик В.В.

Рецензент: д.т.н., проф. Островерхов М.Я.

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

Студент 

Київ – 2019 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра електричних мереж та систем
Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою
програмою
Спеціальність (спеціалізація) – 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка» («Електричні системи і мережі»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 В.В. Кирик

«24» 03 2019 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Шаталову Євгену Олександровичу

1. Тема дисертації «Моделювання мережі 20 кВ з резистивним заземленням нейтралі», науковий керівник дисертації Кирик Валерій Валентинович професор, д-р техн. наук затверджено наказом по університету від «21» 03 2019 р. №941-с.
2. Термін подання студентом дисертації «08» травня 2019 р.
3. Об'єкт дослідження: резистивно заземлена нейтраль розподільної мережі.
4. Вихідні дані: обрати оптимальний до встановлення в розподільну мережу резистор, який забезпечить: селективну дію релейного захисту за умови мінімального зростання напруги під час короткого замикання; мінімальні коефіцієнти перенапруги на вцілілих фазах, максимальну простоту експлуатації.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1) визначити спосіб встановлення резистора в нейтраль мережі; 2) підібрати оптимальний опір резистора за якого забезпечується достатня чутливість релейного захисту та мінімальний рівень перенапруги в мережі.
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: 1) Режими роботи нейтралі розподільної мережі середньої напруги. 2) Встановлення високовольтного резистора в спільну нейтраль мережі (початок). 3) Встановлення високовольтного резистора в спільну нейтраль мережі

(продовження). 4) Встановлення високовольтного резистора в спільну нейтраль мережі (закінчення). 5) Встановлення високовольтного резистора в нейтраль мережі. 6) Встановлення низьковольтного резистора (початок). 7) Встановлення низьковольтного резистора (закінчення). 8) Встановлення низьковольтного резистора за допомогою трьох однофазних трансформаторів.

7. Орієнтовний перелік публікацій: Шаталов Є.О., Кирик В.В. Вибір способу встановлення резистора в нейтраль трансформатора розподільної мережі напругою 20 кВ. Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів, 2018. С. 146-149.

Шаталов Є.О., Кирик В.В. Розрахунок однофазного струму короткого замикання в мережі напругою 20 кВ із заземленою через резистор нейтраллю
Міжнародний науковий журнал "Інтернаука", 2019

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання «21» 03.2019 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд способів заземлення нейтралі	21.03-29.03	
2	Аналіз режимів роботи нейтралі в розвинених країнах світу	24.03-15.04	
3	Опис видів заземлюючих резисторів	15.04-16.04	
4	Розробка імітаційної моделі розподільної мережі	16.04-21.04	
5	Визначення основних залежностей, що притаманні резистивнозаземленим електричній мережі	21.04-01.05	
6	Визначення оптимального способу встановлення резистора в нейтраль	21.04-01.05	
7	Визначення оптимального опору резистора	21.04-01.05	
8	Перевірка обраної величини опору резистора за умово чутливості струмових захистів	1.05-04.05	

Студент

 Є.О. Шаталов

Науковий керівник дисертації

 В.В. Кирик

РЕФЕРАТ

Звіт про магістерську дисертацію: 75 ст., 64 рис., 10 табл., 8 креслень, 13 джерел.

Актуальність теми пов'язана із необхідністю заземлення нейтралі розподільної мережі напругою 20 кВ через резистор або дугогасний реактор. Використання дугогасного реактора пов'язане зі значними капіталовитратами, а також неможливістю використання простих пристроїв релейного захисту. Заземлення нейтралі через резистор дозволяє обмежити струми однофазного короткого замикання до значення, необхідного для виконання простого релейного захисту. Враховуючи меншу вартість резистивного заземлення постає необхідність визначення меж його застосування.

Дослідження за темою магістерської дисертації проведено у рамках ініціативних наукових досліджень кафедри електричних мереж та систем КПП ім. Ігоря Сікорського.

Мета і задачі дослідження. Метою магістерської дисертації є визначення оптимального способу виконання резистивного заземлення нейтралі розподільної мережі середнього класу напруги. Вибір опору резистора, який забезпечить: селективну дію релейного захисту за умови мінімального зростання напруги під час короткого замикання; мінімальні коефіцієнти перенапруги на вцілілих фазах, максимальну простоту експлуатації.

Задля досягнення мети були поставлені наступні задачі:

- вибір способу встановлення резистора в нейтраль мережі;
- визначення оптимального опору резистора за якого забезпечується достатня чутливість релейного захисту та мінімальний рівень перенапруги в мережі.

Об'єкт дослідження. Процеси, які відбуваються в резистивно заземленій мережі при однофазному короткому замиканні.

Предмет дослідження. Параметри заземлюючого резистора та його місце встановлення.

Методи дослідження. Теорія розрахунків струмів короткого замикання та вибору уставок релейного захисту. Методи математичного моделювання електричної мережі. Дослідження проводились в програмних комплексах Matlab та Mathcad.

Наукова новизна одержаних результатів. Визначено спосіб виконання резистивного заземлення нейтралі, а також опору резистора за умовою забезпечення селективної дії чотирьох послідовно встановлених пристроїв релейного захисту (у каскаді).

Практичне значення одержаних результатів. Одержані в дисертації результати можуть бути використані для вибору номінального значення опору резистора, що використовується для заземлення нейтралі мережі.

Публікації за темою дослідження:

а) Шаталов Є.О., Кирик В.В. Вибір способу встановлення резистора в нейтраль трансформатора розподільної мережі напругою 20 кВ. Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів, 2018. С. 146-149.

б) Шаталов Є.О., Кирик В.В. Розрахунок однофазного струму короткого замикання в мережі напругою 20 кВ із заземленою через резистор нейтралю. Міжнародний науковий журнал "Інтернаука", 2019

РЕЗИСТОР, КОРОТКЕ ЗАМИКАННЯ, ЄМНІСТЬ, РОЗПОДІЛЬНА МЕРЕЖА, ЗАЗЕМЛЕННЯ, НЕЙТРАЛЬ

ABSTRACT

Master's thesis report: 75 pages, 64 fig., 10 tables, 8 draws, 13 sources.

Relevance of the topic is connected with the need for grounding a neutral distribution network with a voltage of 20 kV through a resistor or an arc suppression reactor. The use of an arc suppression reactor is associated with significant capital expenditures, as well as the impossibility of using simple relay protection devices. A neutral grounding through a resistor allows one-phase short-circuit currents to be limited to the value needed to perform simple relay protection. Given the lower cost of resistive grounding, it is necessary to determine the limits of its application.

The research on the theme of the master's thesis was conducted in the framework of initiative research of the Department of electrical networks and systems KPI them. Igor Sikorsky.

The purpose and tasks of the study. The purpose of the master's thesis is to determine the optimal way to perform the resistive grounding of the neutral distribution network of the middle class voltage. The choice of resistance of the resistor, which will provide: selective action of relay protection with a minimum increase in voltage during a short circuit; minimum overvoltage factors on the surviving phases, maximum ease of operation.

In order to achieve the goal, were set the following tasks:

- the choice of the method of installation of the resistor in the neutral network;
- determination of the optimal resistance of the resistor at which provides sufficient sensitivity of the relay protection and the minimum level of overvoltage in the network.

Object of study. Processes occurring in a resistively grounded network with a single-phase short circuit.

Subject of study. The parameters of the grounding resistor and its installation location.

Research methods. The theory of calculation of short-circuit currents and the choice of the settings of relay protection. Methods of mathematical modeling of the electrical network. The studies were carried out in the Matlab and Mathcad software packages.

Scientific novelty of the obtained results. The method for performing the resistive neutral grounding as well as the resistance of the resistor is determined, provided that the four series-installed relay protection devices are provided selectively (in a cascade).

The practical value of the results. The results obtained in the thesis can be used to select the nominal value of the resistance of the resistor used to ground the network neutral.

Publications on research topics:

a) Shatalov Yevhen, Kyryk Valerii. The choice of the method of installation of the resistor in the neutral of the transformer distribution network of 20 kV, 2018. P. 146-149.

b) Shatalov Yevhen, Kyryk Valerii. Calculation of the single phase current of short circuit in a 20 kV grid with resistive grounded neutral. International scientific journal "Internauka", 2019.

RESISTOR, SHORT CIRCUIT, CAPACITANCE, DISTRIBUTION NETWORK, GROUNDING, NEUTRAL

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП.....	9
1 РЕЗИСТИВНЕ ЗАЗЕМЛЕННЯ НЕЙТРАЛІ ТА ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ В СВІТІ.....	10
1.1 Огляд способів заземлення нейтралі	10
1.2 Режим роботи нейтралі в розвинених країнах світу	12
1.3 Види резисторів	14
1.4 Способи встановлення резисторів в нейтраль мережі	16
Висновок до розділу 1.....	20
2 ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ МЕРЕЖІ ТА ЇЇ АНАЛІЗ	21
2.1 Параметри елементів моделі мережі.....	21
2.2 Верифікація моделі мережі	24
2.3 Встановлення заземлюючого резистора безпосередньо в спільну нейтраль мережі	26
2.4 Встановлення заземлюючого резистора в окремо створено спільну нейтраль	43
2.5 Встановлення заземлюючого резистора в окрему нейтраль мережі	47
2.5.1 Моделювання мережі	47
2.5.2 Ручний розрахунок струму однофазного замикання на землю	49
2.6 Використання низьковольтного заземлюючого резистора	52
2.6.1 Встановлення у вторинну обмотку однофазного трансформатора	52
2.6.2 Утворення нейтралі трьома однофазними трансформаторами	59
Висновок до розділу 2.....	61
3 ЧУТЛИВІСТЬ РОБОТИ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ОПОРУ РЕЗИСТОРА	63
Висновок до розділу 3.....	72
ВИСНОВКИ.....	73
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	74

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

ВН	–	Висока напруга
ДГР	–	Дугогасний ректор
ЗР	–	Заземлюючий резистор
КЗ	–	Коротке замикання
ЛЕП	–	Лінія електропередавання
МСЗ	–	Максимальний струмовий захист
НН	–	Низька напруга
ОЗЗ	–	Однофазне замикання на землю
ПЛ	–	Повітряна лінія
ПС	–	Підстанція
РЗА	–	Релейний захист та автоматика
РПН	–	Регулювання під навантаженням
РП	–	Розподільчий пункт
СВ	–	Струмова відсічка
СН	–	Середня напруга
ТВП	–	Трансформатор власних потреб
ТЗН	–	Трансформатор заземлення нейтралі
ТП	–	Трансформаторна підстанція
ФМЗО	–	Масляний фільтр нульової послідовності

ВСТУП

Розподільні мережі середнього класу напруги є найпротяжнішими серед електричних мереж України. Найбільші втрати електричної енергії та кількість випадків хибного спрацювання релейного захисту та автоматики (РЗА) випадають саме на них. Зростання навантаження споживання, збільшення кількості приєднань, а також застарілість обладнання зумовлюють необхідність переходу на вищі класи напруги. Аналогічно переходу з 6 кВ до 10 кВ передбачено реконструкцію мереж з переходом на клас напруги 20 кВ.

Мережі напругою 20 кВ характеризуються значними ємнісними струмами замикання на землю, що зумовлює необхідність їх обмеження для подальшої надійної експлуатації. Зокрема можна виділити два основних підходи, спрямовані на зменшення струмів при однофазних замиканнях на землю: обмеження струмів шляхом встановлення резистора в нейтраль мережі; повна компенсація завдяки використанню дугогасного ректора із самоналаштуванням.

Ефективність використання дугогасних реакторів неодноразово встановлена в процесі експлуатації, але водночас вони характеризуються найвищою собівартістю серед можливих варіантів. Зумовлено це потребою складного механізму підлаштування в залежності від параметрів мережі. Дешевою альтернативою є резистивне заземлення нейтралі, за якого струм в місці короткого замикання не зникає, а лише зменшується за своїм значенням відповідно до допустимого. Головним недоліком використання резистивного заземлення нейтралі є обмеження на подальший розвиток мережі, оскільки величина опору резистора обирається відповідно до ємності мережі.

У зв'язку зі значною протяжністю розподільних мереж середнього класу напруги та економічно нестабільного стану країни необхідно обґрунтувати доцільність використання резистивного заземлення нейтралі при модернізації розподільних електричних мереж.

В магістерській дисертації розглянуто способи заземлення нейтралі через резистор, вибір його опору в залежності від способу утворення нейтралі та параметрів мережі.

1 РЕЗИСТИВНЕ ЗАЗЕМЛЕННЯ НЕЙТРАЛІ ТА ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ В СВІТІ

1.1 Огляд способів заземлення нейтралі

Резистивне заземлення нейтралі є одним із можливих способів заземлення нейтралі. В залежності від напруги мережі, вимог до електробезпеки, а також протяжності ЛЕП – використовують різні варіанти заземлення нейтральної точки, які зазначені в табл. 1.1. Існує два підходи: забезпечити тривалу роботу мережі при однофазному замиканні на землю (ОЗЗ); забезпечити селективне вимкнення місця, де трапилося коротке замикання (КЗ) [1].

Тривала робота мережі при ОЗЗ необхідна для живлення відповідальних споживачів, які можуть отримувати живлення від двох вцілілих фаз з лінійними значеннями напруги.

Миттєве та селективне спрацювання захисту, яке обумовлене значними струмами КЗ – необхідне в мережах з можливою перервою електропостачання та при неможливості досягнення малих струмів КЗ.

Таблиця 1.1 – Способи заземлення нейтралі мережі та їх властивості

	Ізольована	Глухозаземлена	Низькоомна	Високоомна	Нерегульований ДРГ	Регульований ДРГ
Струм ОЗЗ	Деякі ампер	$20 \div 30 \cdot I_{ном}$	100 ÷ 300 А	<10 А	$25 \div 60 \cdot I_{озз}$	0
Напруга	Лінійна напруга	0	Фазна напруга	> Фазної напруги	> Фазної напруги	Фазна напруга
Поява подвійного КЗ на землю	Присутня	Відсутня	Можлива	Можлива	Можлива	Присутня
Характер дуги при ОЗЗ	Самоліквідується	Постійна (відсутнє самогасіння)	Самоліквідується	Самоліквідується	Самоліквідується	Носить поперемінний характер
Характерні співвідношення	–	$X_0/X_1 > 0$ $R_0/X_1 > 0$	$R_0 < X_{c0}$ $R_0 > 2 \times X_0$	$R_0 < X_{c0}$ $R_0 > 2 \times X_0$	$X_0/X_1 < 10$	–

Головною метою глухого заземлення нейтралі є зменшення рівня напруг під час коротких замикань. Водночас зростають струми КЗ, за рахунок яких пристрої РЗА селективно вимикають пошкоджену ділянку. Значний струм КЗ впливає на лінії телекомунікацій, що можуть проходити поряд з лініями електропередавання (ЛЕП), а також збільшує потенціал землі в місці пошкодження ЛЕП, оскільки зворотнім шляхом протікання струму до нейтралі є земля. Також, значна величина струму призводить до обгорання лінії або кабелю в місці пошкодження, що особливо негативно проявляється в кабельних мережах. Областю застосування глухо-заземленої нейтралі є мережі напругою 0,4 кВ [2], так як при більших значеннях напруги має місце значне зростання струму КЗ, а також зниження електробезпеки.

Ізольована нейтраль застосовується у таких мережах [2]:

- мережі 3 кВ – 20 кВ з залізобетонними та металевими опорами повітряних ліній (ПЛ), в мережах 35 кВ за сумарного ємнісного струму мережі менше за 10 А;
- мережах без залізобетонних та металевих опор ПЛ при: $U_{\text{ном}} = 3 \text{ кВ} - 6 \text{ кВ}$ та $I_{\Sigma} < 10 \text{ А}$; $U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$ та $I_{\Sigma} < 20 \text{ А}$; $U_{\text{ном}} = 15 \text{ кВ} - 20 \text{ кВ}$ та $I_{\Sigma} < 15 \text{ А}$.

Головною перевагою мережі з ізольованою нейтраллю вважається можливість нормального функціонування споживачів при живленні двома вцілілими фазами впродовж необхідного часу. Струм ОЗЗ відповідає значенню ємнісного струму мережі та зазвичай не перевищує декількох десятків ампер. Також такий режим роботи нейтралі є найдешевшим оскільки не потребує ніяких капіталовкладень. Слід зазначити, що основними недоліками є неможливість точного встановлення місця ОЗЗ у випадках пошкодження протяжної ЛЕП, а також великі перенапруги, що зумовлює необхідність розрахунку ізоляції на лінійні значення.

Використання регульованого дугогасного реактора (ДГР) (катушки Петерсена) дозволяє повністю компенсувати ємнісний струм ОЗЗ без відключення пошкодженої ділянки.

Головними протипоказаннями до застосування резонансного заземлення нейтралі є:

- несиметрія мереж за фазними провідностями на землю;

– недостатня досконалість приладів РЗА, що призводить до штучного збільшення струму в місці пошкодження для забезпечення необхідної стійкості їх функціонування або до збільшення часу пошуку пошкодженого елемента.

При резонансному налаштуванні ДГР залишковий струм ОЗЗ в місці пошкодження містить лише некомпенсовану активну частину та вищі гармоніки.

Використання резисторів (низькоомних або високоомних), а також нерегульованих ДГР покликане частково зменшити струми ОЗЗ. При використанні низькоомних резисторів забезпечується достатній струм для спрацювання РЗА, при обмеженні його величини до допустимої. Високоомні резистори мають значно зменшувати струми КЗ і тим самим забезпечувати нормальне функціонування мережі впродовж заданого часу. Зазвичай їх встановлюють при живленні потужних підприємств, які можуть житися двома вцілілими фазами. Завдяки більшому значенню струму КЗ порівняно з ємнісним струмом мережі – легко визначити місце пошкодження та відключити при необхідності. Нерегульовані ДГР діють подібно за винятком того, що обмежують ємнісну складову струму КЗ та рівні напруг на вцілілих фазах.

1.2 Режим роботи нейтралі в розвинених країнах світу

Європейські мережі середньої напруги виконано трипровідними, нейтральна точка в яких може бути як заземленою, так і ні. Найпоширенішим способом заземлення нейтралі – є резонансне заземлення, яке утворюється завдяки встановленню котушки Петерсена в нейтраль мережі [3, 4]. Також, в 70-ті роки поширеним був спосіб резистивного заземлення нейтралі, але на даний час майже зник, через малу ефективність в порівнянні з резонансним заземленням.

Визначення місця ОЗЗ в європейських мережах відбувається шляхом налаштування захистів на визначення високочастотних складових сигналів, що виникають при ОЗЗ в мережі та не затухають на ДГР [3].

Резистивне заземлення нейтралі набуло найбільшого поширення у Великій Британії, де більше половини високовольтних розподільних трансформаторів є резистивно заземленими. Для цього здебільшого використовуються рідинні резистори та суцільні металеві. Також використовують нерегульовані реактори, що встановлюються аналогічно.

Рідинні резистори встановлено в мережах 11 кВ, а також 33 кВ та вище. В мережах 33 кВ і вище використовують резистори номіналом 20 Ом, а в 11 кВ – суцільні металеві резистори номіналами 4,5 Ом або 6,3 Ом. На нових підстанціях (з 1985 р.) встановлюють резистори номіналом 8,5 Ом, по одній одиниці на кожний розподільний трансформатор. У зв'язку зі значною кількістю шахт в мережах напругою 6,6 кВ також використовують резистивне заземлення. Такі резистори можуть бути як суцільними металевими, так і керамічними.

Основною тенденцією є повна заміна рідких резисторів на суцільні, а також перехід до регульованих ДГР в міських електричних мережах [3].

Низькоомне заземлення нейтралі набуло такого поширення в Великій Британії через значну протяжність кабельних ліній прокладених поряд із лініями зв'язку. Завдяки цьому при ОЗЗ не виникають значні перешкоди на сусідніх кабелях, а місце КЗ легко виявити.

В Північній Америці електричні мережі середньої напруги виконані чотирипровідними [4], де четвертий провід виконує функцію заземлюючого провідника, що заземлюється з певним кроком. При такому виконанні заземлення мережі забезпечується електробезпека та швидкодія захисту. Головною причиною такого способу заземлення нейтралі є висока розосередженість мереж та споживачів, які живляться від малопотужних силових трансформаторів встановлених безпосередньо на опорах поряд із земельними ділянками.

В мережах України напругою 3 кВ – 35 кВ передбачено ізольовану роботу нейтралі, яка заземлена через ДГР або через резистор [2]. Компенсація ємнісного струму ОЗЗ повинна передбачатися в мережах, які не мають залізобетонних або металевих опор на повітряних ЛЕП, та у мережах з ємнісним струмом замикання

більше за 10 А – 15 А. При струмах ОЗЗ, більших за 50 А регламентується встановлення двох та більше заземлюючих ДГР.

Найпоширенішим є спосіб заземлення нейтралі через регульований ДГР, а за незначних ємнісних струмів вона є ізольованою. Водночас, до недавнього часу широко використовувалась резистивно заземлена нейтраль, як така, що забезпечує зниження ємнісних струмів при простоті виконання релейного захисту.

1.3 Види резисторів

Основною вимогою до заземлюючого резистора є здатність розсіювати достатню кількість енергії у найгіршому режимі роботи мережі [5], тобто при протіканні струму КЗ по ньому за заданий проміжок часу. Проміжок часу, за який може існувати КЗ в мережі, струми якого не завдають шкоди резистору, зазвичай, становить не більше 10 с. Струм КЗ, що витримає резистор, а також його опір може варіюватися у широких межах, в залежності від конкретних вимог замовника.

В ролі резистора можуть виступати як спеціальні рідини (дистильована вода з домішками електроліту), так і суцільні резистивні матеріали, такі як нержавіюча сталь або подібні сплави.

Резистори рідкого типу є одними з перших, які почали використовуватися. Рідкий резистор зовнішнього встановлення наведений на рис. 1.1. Нині вони застарілі та не ефективні у порівнянні із твердими (суцільними) резисторами. Вони являють собою металевий бак, наповнений дистильованою водою із домішкою розчинних солей, які виступають в ролі електроліту. Конкретне значення опору досягається шляхом варіювання відношення діелектрику та електроліту, а також площею електродів, що занурюються у рідину. Завдяки цьому легко одразу отримати необхідні електричні характеристики, але водночас виникає необхідність постійного обслуговування та контролю стану розчину.

Важливою особливістю використання рідких резисторів є негативна залежність опору від температури (змінюється розчинна здатність рідини). Коли по резистору починає протікати струм КЗ, то рідина нагрівається, а опір зменшується.

Таке явище може мати позитивний характер, оскільки з часом струм КЗ зростатиме, що дасть змогу надійно спрацювати слабо чутливому релейному захисту, наприклад, при значно віддаленому КЗ. Це явище може розглядатися як резервування "нижче" встановлених захистів.



Рис. 1.1 – Рідкий резистор зовнішнього встановлення

Використання рідких резисторів зумовлює ряд складнощів в експлуатації, адже рідина може замерзати при низьких температурах, а наявність солей сприяє швидкій корозії баку. Отже, вартість встановлення рідкого резистору є значно меншою за вартість його обслуговування впродовж терміну служби.

Тверді, або суцільні, резистори є найпоширенішим типом в даний час. Конструкція складається із металевого резистивного елемента, а також охолоджувальної системи для відводу тепла, показано на рис. 1.2. Резистивний елемент зазвичай виготовляють із чавуна, сталі, а також нержавіючої сталі. На відміну від рідинних резисторів, що встановлюються лише на відкритому повітрі, суцільні металеві резистори можуть мати як внутрішнє, так і зовнішнє виконання. Важливою перевагою є практична незмінність електричних властивостей під час експлуатації, а також відсутність необхідності обслуговування.

Віднедавна почали виробляти керамічні/карбонові суцільні резистори. Вони складаються із запеченої суміші мілко-дисперсних часток карбону, високоякісного

алюмінію та спеціальної глини. Завдяки такому процесу значно покращуються термічні властивості та термін експлуатації.



Рис. 1.2 – Суцільний резистор внутрішнього встановлення, набраний зі сталевих резистивних елементів

Необхідну величину опору, при використанні суцільних резисторів, отримують шляхом збірки подібних елементів в послідовний ланцюг, що забезпечує можливість модернізації (долаштування) конструкції заземлюючого пристрою відповідно до розвитку мережі.

1.4 Способи встановлення резисторів в нейтраль мережі

Схеми підключення резисторів в мережу можуть відрізнитися в залежності від наявності/відсутності виведеної нейтралі і виконання резисторів (високовольтні чи низьковольтні). Від способу встановлення резистора залежать значення напруг в мережі, а також вимоги до термічної стійкості обладнання під час ОЗЗ в мережі.

Існує два підходи, щодо місця встановлення резистора [3]:

– один заземлюючий резистор (ЗР) на один розподільний трансформатор;

– один ЗР на одну підстанцію.

При використанні одного ЗР на кожний трансформатор, струм однофазного короткого замикання буде залежати від кількості резисторів та їх загального опору. Такий спосіб дозволяє виводити з роботи будь-який резистор, не змінюючи спосіб заземлення нейтралі, а лише її опір. З іншого боку зростає вартість підстанції, як при побудові, так і в експлуатації, а також збільшується набір уставок РЗА в залежності від значень опорів резисторів.

Об'єднання нейтралей призводить до зменшення капіталовкладень, але потребує надійного функціонування резистора та забезпечення електробезпеки при роботах пов'язаних з ним. Також виникає електричний зв'язок між частинами мережі, які не є об'єднаними на паралельну роботу.

В залежності від робочої напруги резистора (низько- або високовольтний), також можливі різні способи організації заземлення нейтралі [6]. Низьковольтний резистор має встановлюватися у вторинну обмотку однофазного понижуючого трансформатора (рис.1.3. а), б) в)) або до розімкнутого трикутника вторинних обмоток трьох однофазних понижуючих трансформаторів (рис.1.3 г)).

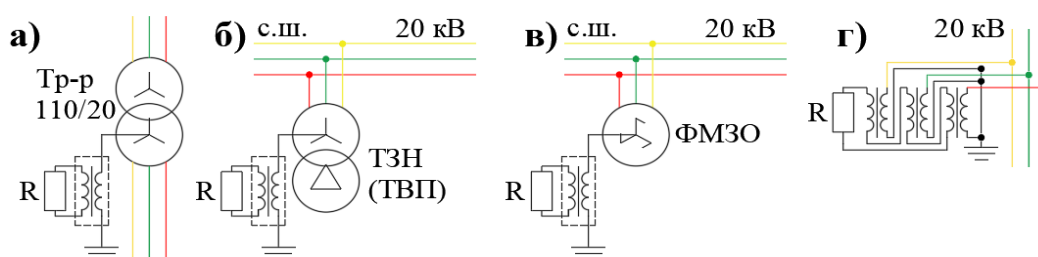


Рис. 1.3 – Заземлення нейтралі за через низьковольтний резистор

Очевидно, що наведені на рис.1.3 варіанти значно ускладнюють схему заземлення через необхідність використання додаткових(-го) понижуючого трансформатора, а також через значне зростання струму на резисторі.

Високовольтний резистор встановлюється в нейтраль обмотки НН розподільного трансформатора (рис. 1.4 а), рис. 1.5 а)) або окремого трансформатора заземлення нейтралі (ТЗН). Замість використання окремого ТЗН (рис. 1.4 б), рис. 1.5 б)),

можливо встановлювати резистор у нейтраль трансформатора власних потреб (ТВП). Для зменшення напруг при ОЗЗ, а також струму на резисторі при несиметрії навантаження, в мережі використовують масляні фільтри нульової послідовності (ФМЗО), які являють собою обмотки ВН трифазного трансформатора, з'єднані за схемою "зигзаг" (рис. 1.4 г), рис. 1.5 в)).

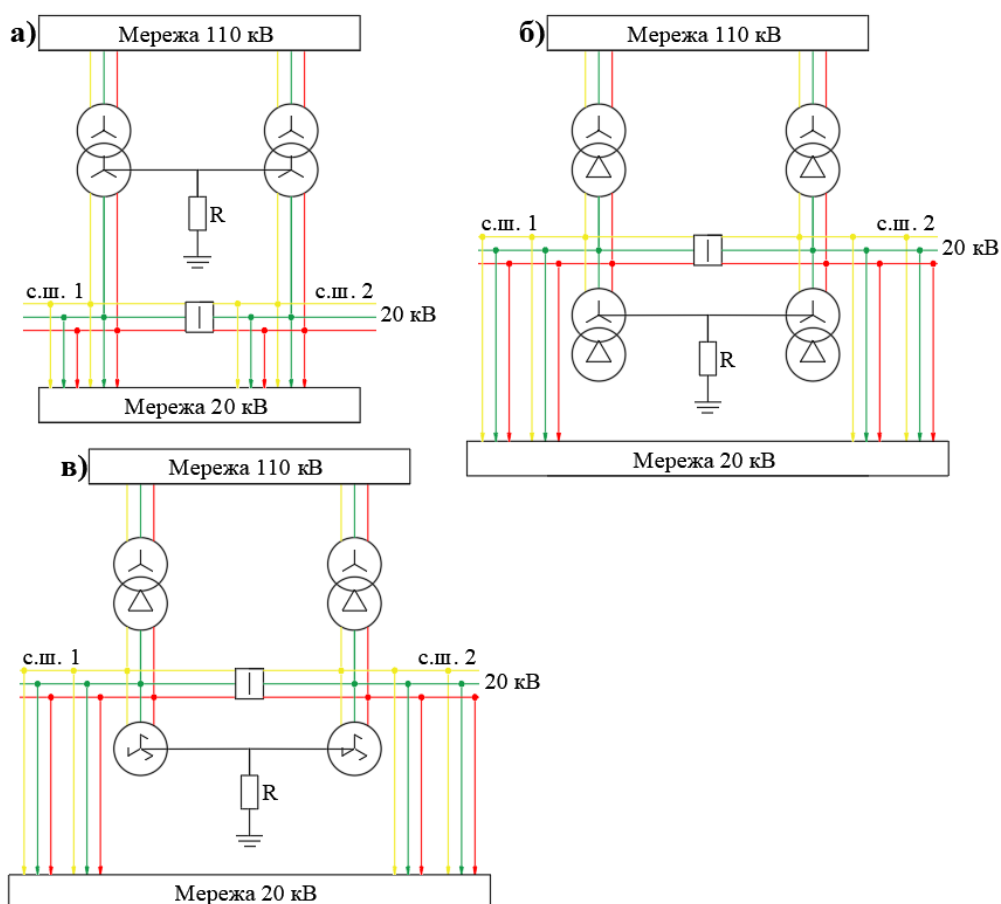


Рис. 1.4 – Заземлення об'єднаної нейтралі через високовольтний резистор

При встановленні резистора в нейтраль розподільного трансформатора змінюється група з'єднання його обмоток з " $Y/D_{0,11}$ " на " Y/Y_n ". В такому випадку суттєво змінюється опір нульової послідовності трансформатора та виникає можливість "перетікання" гармонік струмів з однієї частини мережі в іншу. Також слід пам'ятати, що мережі напругою 110 кВ – 750 кВ функціонують з ефективно заземленою нейтраллю, що зумовлює ще одну робочу групу з'єднання обмоток – " $Y_g/D_{0,11}$ ".

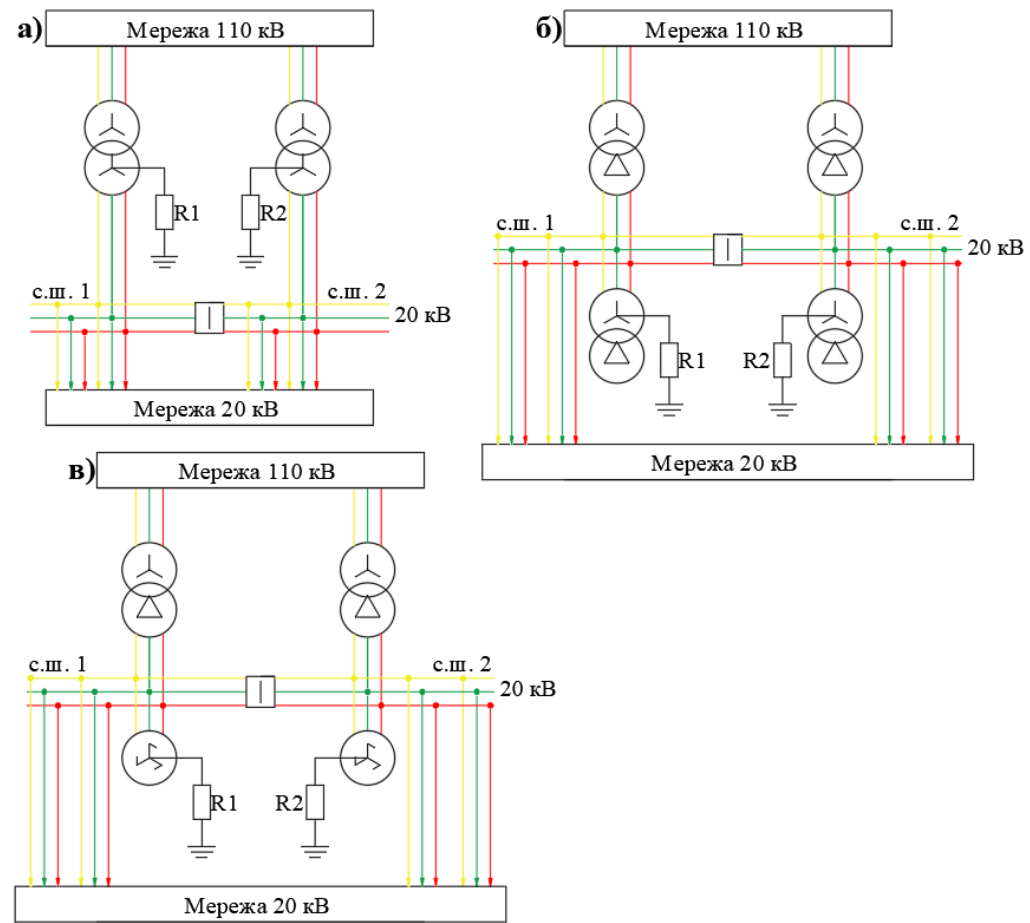


Рис. 1.5 – Заземлення нейтралей через високовольтний резистор

Висновки до розділу 1

Існує три основні режими роботи нейтралі мережі в залежності від величини ємнісного струму. Так при його значенні більше ніж 15 А необхідно виконувати заземлення нейтралі через резистор або дугогасний реактор. У випадку коли ємнісні струми мережі менше 15 А використовують ізольовану нейтраль.

Перевагою використання регульованого дугогасного реактора є повне усунення струму однофазного короткого замикання по пошкодженій ділянці, що унеможливує виявлення місця пошкодження простими методами. Крім необхідності використання спеціального релейного захисту недоліком є й ціна такого рішення, оскільки кожен реактор обладнується чутливим пристроєм регулювання.

Резистивне заземлення нейтралі забезпечує прийнятне значення струмів однофазного короткого замикання завдяки збільшенню опору нульової послідовності. Головними перевагами заземлення нейтралі через резистор є дешевизна обладнання (резистор не вимагає налаштування) та простота виконання релейного захисту.

Широкого розповсюдження резистивне заземлення нейтралі набуло в Європі в 70-х роках. Нині єдиною країною де все ще залишається основним є Велика Британія, що пов'язано зі специфікою мереж, а саме високою протяжністю кабельних мереж у вугільних шахтах. Основною світовою тенденцією є перехід на ДГР з підлаштуванням, що пов'язано з вдосконаленням цифрових пристроїв керування та захисту, а також зменшенням їх вартості.

При проектуванні нових, а також переоснащенні старих мереж слід виконувати резистивне заземлення нейтралі із перспективою подальшого встановлення дугогасного ректора. При такому рішенні досягається надійна робота мережі при мінімальних капіталовкладеннях.

Спосіб встановлення резистора в нейтраль залежить від параметрів обладнання та вимог щодо пристроїв релейного захисту. Залежність струму однофазного короткого замикання від способу встановлення резистора і величини його опору розглянуто в розділі 2.

2 ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ МЕРЕЖІ ТА ЇЇ АНАЛІЗ

2.1 Параметри елементів моделі мережі

Відомо, що при розрахунках струмів однофазних замикань на землю в мережах з ізольованою нейтраллю спираються на значення ємностей елементів мережі, нехтуючи при цьому іншими параметрами, наприклад опорами. Водночас в розрахунках КЗ в мережах із глухозаземленою нейтраллю ємності не враховують [7]. Виникає необхідність встановити, якими параметрами можна нехтувати, а які впливають безпосередньо на струм ОЗЗ при резистивному заземленні нейтралі.

При побудові моделі мережі використано програмний комплекс Matlab. Слід зважати на особливості задання та розрахунку параметрів електричних мереж в цьому обчислювальному комплексі. В Україні прийнято зазначати погонну ємність кабелів не вказуючи окремо параметри прямої та зворотної послідовності [8], але ці дані необхідні для правильного опису ЛЕП (рис. 2.1).

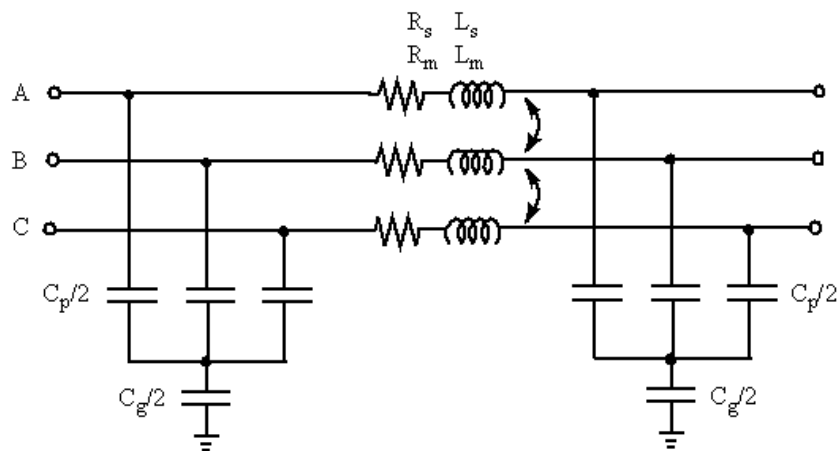


Рис. 2.1 – Схема заміщення ЛЕП

Параметри схеми заміщення ЛЕП мають наступний вигляд:

$$R_s = (2 \cdot R_1 + R_0) / 3, \quad (2.1)$$

$$L_s = (2 \cdot L_1 + L_0) / 3, \quad (2.2)$$

$$R_m = (R_0 - R_1) / 3, \quad (2.3)$$

$$L_m = (L_0 - L_1) / 3, \quad (2.4)$$

$$C_p = C_1, \quad (2.5)$$

$$C_g = 3 \cdot C_1 \cdot C_0 / (C_1 - C_0), \quad (2.6)$$

де C_1 ; C_0 – погонні ємності прямої та нульової послідовностей; R_1 ; R_0 – погонні опори прямої та нульової послідовностей; L_1 ; L_0 – погонні індуктивності прямої та нульової послідовностей.

Оскільки встановити значення C_1 і C_0 можливо лише конкретними замірами на етапі прокладки кабелю, то приймаємо наступні допущення:

$$C_1 / C_0 = 2 / 1. \quad (2.7)$$

Тоді, з виразу 2.6: $C_g = 3 \cdot C_0$. Параметри кабельних ліній наведено в табл.2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри силових кабелів 20 кВ в Matlab Simulink

Назва кабелю	r1 Ом/км	r0 Ом/км	x1 мГн/км	x0 мкГн/км	сg Ф/км	c1 мкФ/км	c0 мкФ/км
XRUNAKXS-20 (1x150/50)	0,268	0,7	0,37	194,169	0,25	0,5	0,25
XRUNAKXS-20 (1x120/50)	0,328	0,76	0,39	213,268	0,23	0,46	0,23
XRUNAKXS-20 (1x95/35)	0,413	1,05	0,41	226	0,22	0,44	0,22
XRUNAKXS-20 (1x70/25)	0,571	1,47	0,43	248,282	0,20	0,4	0,20
XRUNAKXS-20 (1x50/16)	0,825	2,15	0,45	267,38	0,18	0,36	0,18

* Дані стосовно кабельної продукції взято згідно даних заводу виробника [8].

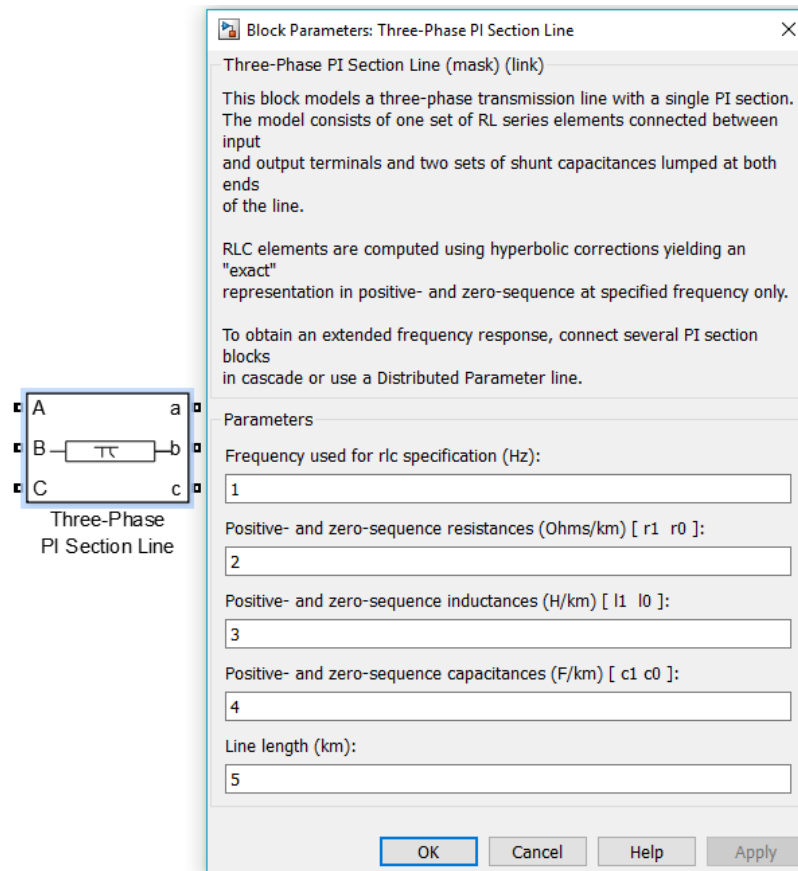


Рис. 2.2 – Вікно вводу параметрів ЛЕП

1 – номінальна частота мережі; 2 – погонні опори прямої та нульової послідовності; 3 – погонна індуктивність прямої та нульової послідовності; 4 – погонна ємність прямої та нульової послідовності; 5 – довжина лінії.

Параметри трансформаторів можуть задаватися як у номінальних – так і у відносних одиницях. Для кожної обмотки вони задаються окремо, для чого необхідно попередньо виконати їх розрахунок та приведення до базисних значень.

Перевагою використання програмного комплексу Matlab є можливість моделювання процесу намагнічування трансформатора, що впливає на характер перехідних процесів в мережі. В табл. 2.2 приведено параметри силових трансформаторів з номінальною напругою первинної обмотки 110 та 20 кВ.

Точки кривої намагнічування відповідають усередненим даним для силових трансформаторів відповідної потужності [9].

Таблиця 2.2 – Параметри силових трансформаторів

Nominal power, VA	Frequency, Hz	Winding 1 parameters			Winding 2 parameters			Magnetization resistance, pu	Inductance L0 of zero-sequence flux path return, pu	Saturation characteristic, pu
		V1 Ph-Ph, Vrms	R1, pu	L1, pu	V2 Ph-Ph, Vrms	R2, pu	L2, pu			
16e6	50	1,1e5	0,0023	0,0525	2e4	0,0525	0,0023	987,654	439,542	(0;0), (0,0078;1,15), (1;1,308)
20e6			0,0022					1041,667	439,053	(0;0), (0,0079;1,15), (1;1,308)
25e6			0,0021					1101,322	473,541	(0;0), (0,0073;1,15), (1;1,308)
31,5e6			0,002					1166,667	473,01	(0;0), (0,0073;1,15), (1;1,308)
1e6	50	2e4	0,0052	0,0219	400	0,0219	0,0052	869,565	434,475	(0;0), (0,0079;1,15), (1;1,218)
1,25e6			0,0052	0,0219				919,118	508,428	(0;0), (0,0068;1,15), (1;1,218)
1,6e6			0,0045	0,022				975,61	507,459	(0;0), (0,0068;1,15), (1;1,218)
2e6			0,0043	0,0221				1030,928	506,664	(0;0), (0,0068;1,15), (1;1,218)
2,5e6			0,0041	0,0221				1086,957	610,422	(0;0), (0,0068;1,15), (1;1,218)

2.2 Верифікація моделі мережі

Створено просту модель мережі із однією системою шин та лінією, що відходить від неї (рис. 2.3). Струм ОЗЗ має відповідати ємнісному струму мережі, а в даному випадку ЛЕП.

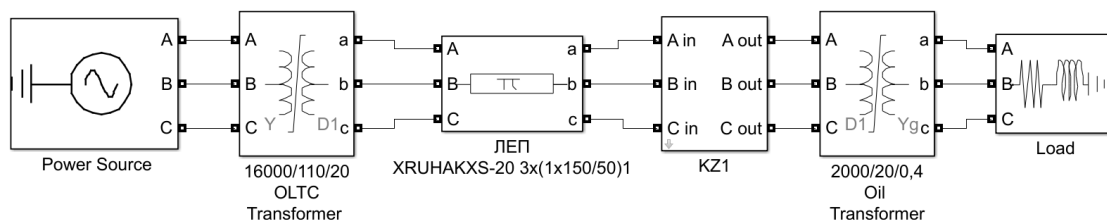


Рис. 2.3 – Фрагмент мережі 20 кВ із ізолюваною нейтраллю

Довжина лінії прийнята 15 км, потужність навантаження складає $(1+0,3) \cdot \text{МВА}$, номінальна напруга – 20 кВ.

Проведемо ручний розрахунок струму ОЗЗ при КЗ в кінці ЛЕП:

$$I_c = 3 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}} \cdot (2 \cdot f \cdot \pi) \cdot c_{150} \cdot L = \frac{20}{\sqrt{3}} \cdot (2 \cdot 50 \cdot 3,14) \cdot 7,5 \cdot 10^{-7} \cdot 15 = 40,81 \text{ А.}$$

Результат розрахунку струмів по лінії наведено на рис. 2.4. Амплітудне значення струму по фазі А (фаза на якій відбулося КЗ) становить 56,73 А, а діюче – 40,114 А. Незначна розбіжність в десяті ампера зумовлена відмінними від номінального значеннями напруг в мережі.

Аналогічним чином можна проілюструвати процеси в мережі при резонансному заземленні нейтралі через ДГР. Для цього виведемо нейтраль розподільного трансформатора 110/20 кВ та заземлимо її через індуктивний опір, величина якого обчислюється за формулою 2.8.

$$\frac{1}{L_N \cdot \omega} = 3 \cdot C_{\Sigma} \cdot \omega, \quad (2.8)$$

де C_{Σ} – сумарна ємність однієї фази.

$$L_N = \frac{1}{3 \cdot C_{\Sigma} \cdot \omega^2} = \frac{1}{3 \cdot c_{150} \cdot L \cdot (2 \cdot f \cdot \pi)^2} = \frac{1}{7,5 \cdot 10^{-7} \cdot 15 \cdot (2 \cdot 50 \cdot 3,14)^2} = 0,901 \text{ Гн.}$$

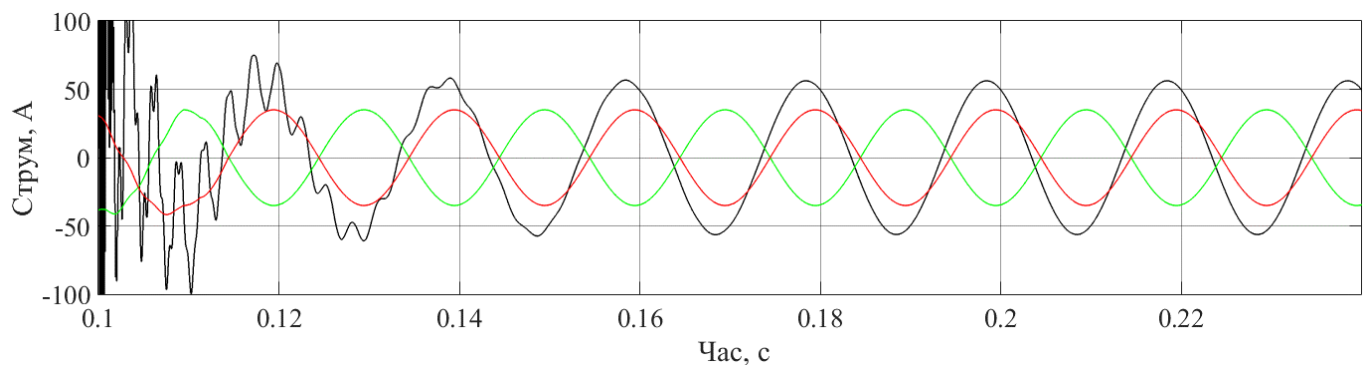


Рис. 2.4 – Струми по фазах в лінії, в мережі з ізольованою нейтраллю

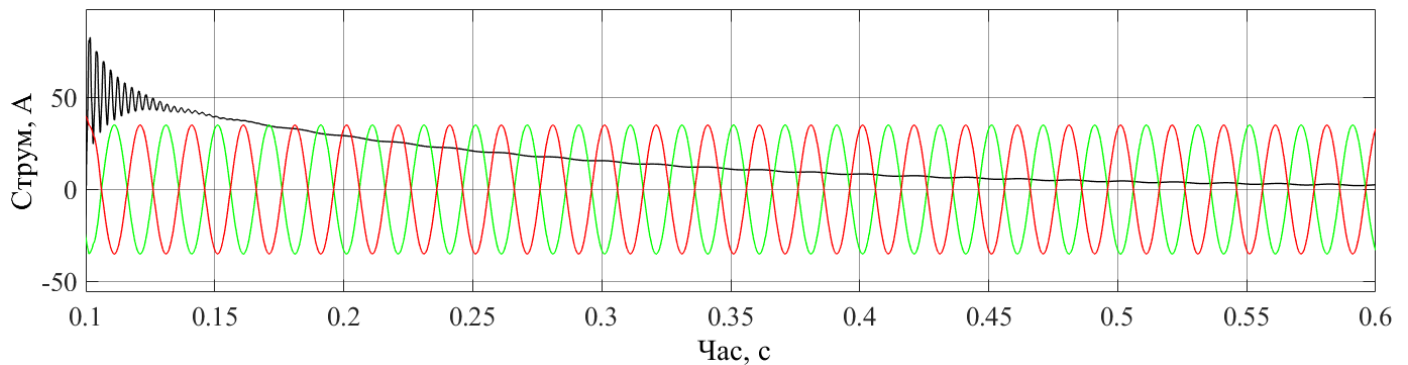


Рисунок 2.5 – Струми по фазах в лінії, в мережі з резонансно заземленою нейтраллю

Як видно з рис. 2.5 індуктивність ДГР розрахована вірно, а струм ОЗЗ стрімко наближається до 0. Таким чином, побудована модель мережі достовірно передає основні залежності, що дозволяє використовувати програмний комплекс в подальших дослідженнях.

2.3 Встановлення заземлюючого резистора безпосередньо в спільну нейтраль мережі

Для дослідження мережі із об'єднаною нейтраллю створено модель із двома секціями шин (рис. 2.6), при чому від першої відходить дві лінії, а від другої – одна. Очевидно, що будь яку зовнішню частину мережі можливо замінити еквівалентними параметрами, в даному випадку, для цього слугують ЛЕП 2 та 3.

При встановленні резистора безпосередньо в спільну нейтраль мережі (рис. 1.4.а) виконано серію замірів струмів ОЗЗ в залежності від довжини лінії 1 (2), наявності або відсутності глухого заземлення зі сторони ВН трансформаторів 110/20 кВ, а також від величини навантаження 1. Опір контуру заземлення не враховується, адже вивід резистора під'єднується до нього послідовно, тобто варіювання величини опору резистора враховує й опір контуру заземлення. Потужність розподільних трансформаторів 110/20 кВ становить 16 МВА, кожен. Потужність КЗ мережі складає $1 \cdot 10^8$ ВА.

Таблиця 2.3 – Вхідні параметри моделі мережі із спільною резистивно заземленою нейтраллю

№ досліджу	Незмінні параметри	Змінні параметри	Рисунки
1	Схема з'єднання обмоток Т1 та Т2 – Y/Y _n ; лінія 1 – 3х(1х150/50); лінія 2 – 3х(1х120/50), l=15 км; лінія 3 – 3х(1х150/50), l=15 км; навантаження 1, 2, 3 – 1,46+j0,3 МВА.	Лінія 1: l=0,5, 1, ..., 12 км; Резистор: R=5, 10, ..., 200 Ом.	2.7 – 2.13
2	Схема з'єднання обмоток Т1– Yg/Y _n ; схема з'єднання обмоток Т2– Y/Y _n ; лінія 1 – 3х(1х150/50); лінія 2 – 3х(1х120/50), l=15 км; лінія 3 – 3х(1х150/50), l=15 км; навантаження 1, 2, 3 – 1,46+j0,3 МВА.	Лінія 1: l=0,5, 1, ..., 12 км; Резистор: R=5, 10, ..., 200 Ом.	2.14 – 2.19
3	Схема з'єднання обмоток Т1– Y/Y _n ; схема з'єднання обмоток Т2– Yg/Y _n ; лінія 1 – 3х(1х150/50); лінія 2 – 3х(1х120/50), l=15 км; лінія 3 – 3х(1х150/50), l=15 км; навантаження 1, 2, 3 – 1,46+j0,3 МВА.	Лінія 1: l=0,5, 1, ..., 12 км; Резистор: R=5, 10, ..., 200 Ом.	2.20– 2.24
4	Схема з'єднання обмоток Т1– Y/Y _n ; схема з'єднання обмоток Т2– Yg/Y _n ; лінія 1 – 3х(1х150/50); l=15 км; лінія 2 – 3х(1х120/50); лінія 3 – 3х(1х150/50), l=15 км; навантаження 1, 2, 3 – 1,46+j0,3 МВА.	Лінія 2: l=0,5, 1, ..., 12 км; Резистор: R=5, 10, ..., 200 Ом.	2.25

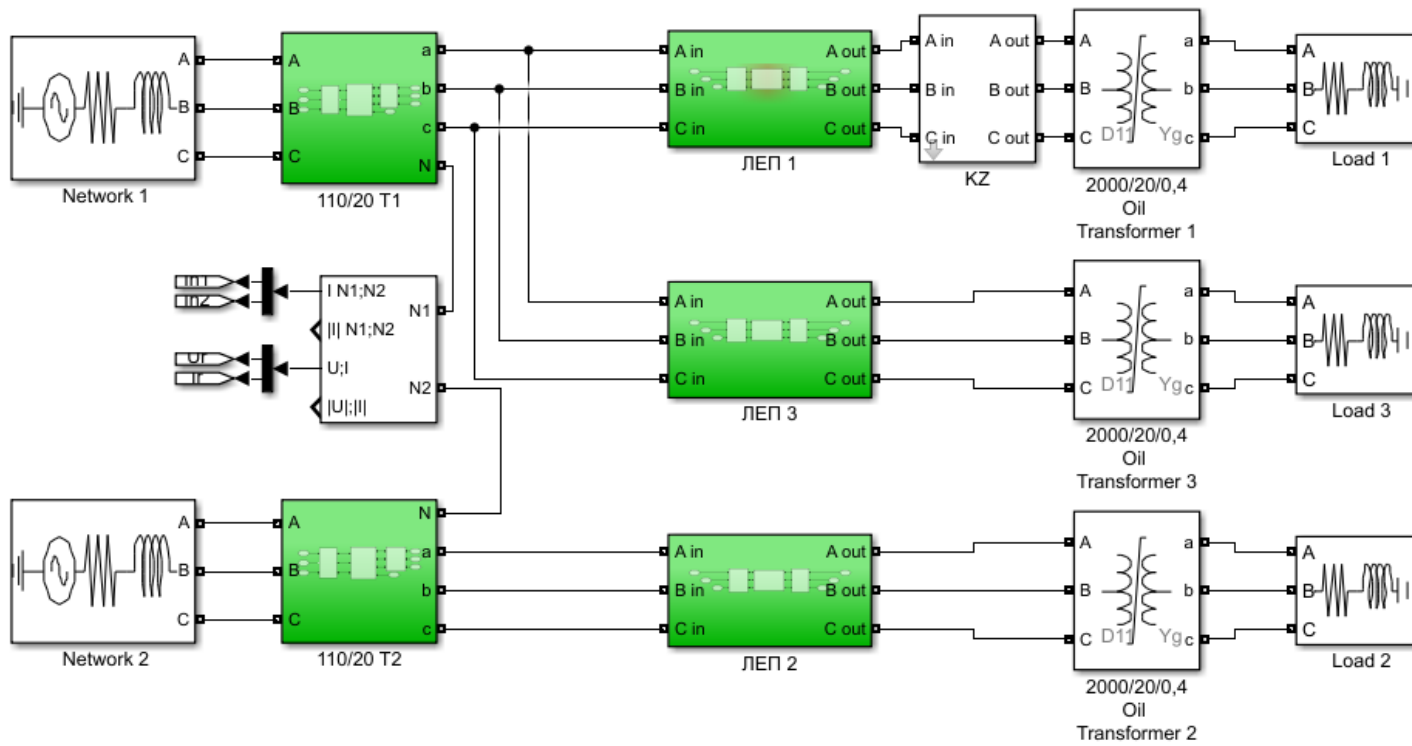


Рис. 2.6 – Фрагмент мережі 110/20 кВ

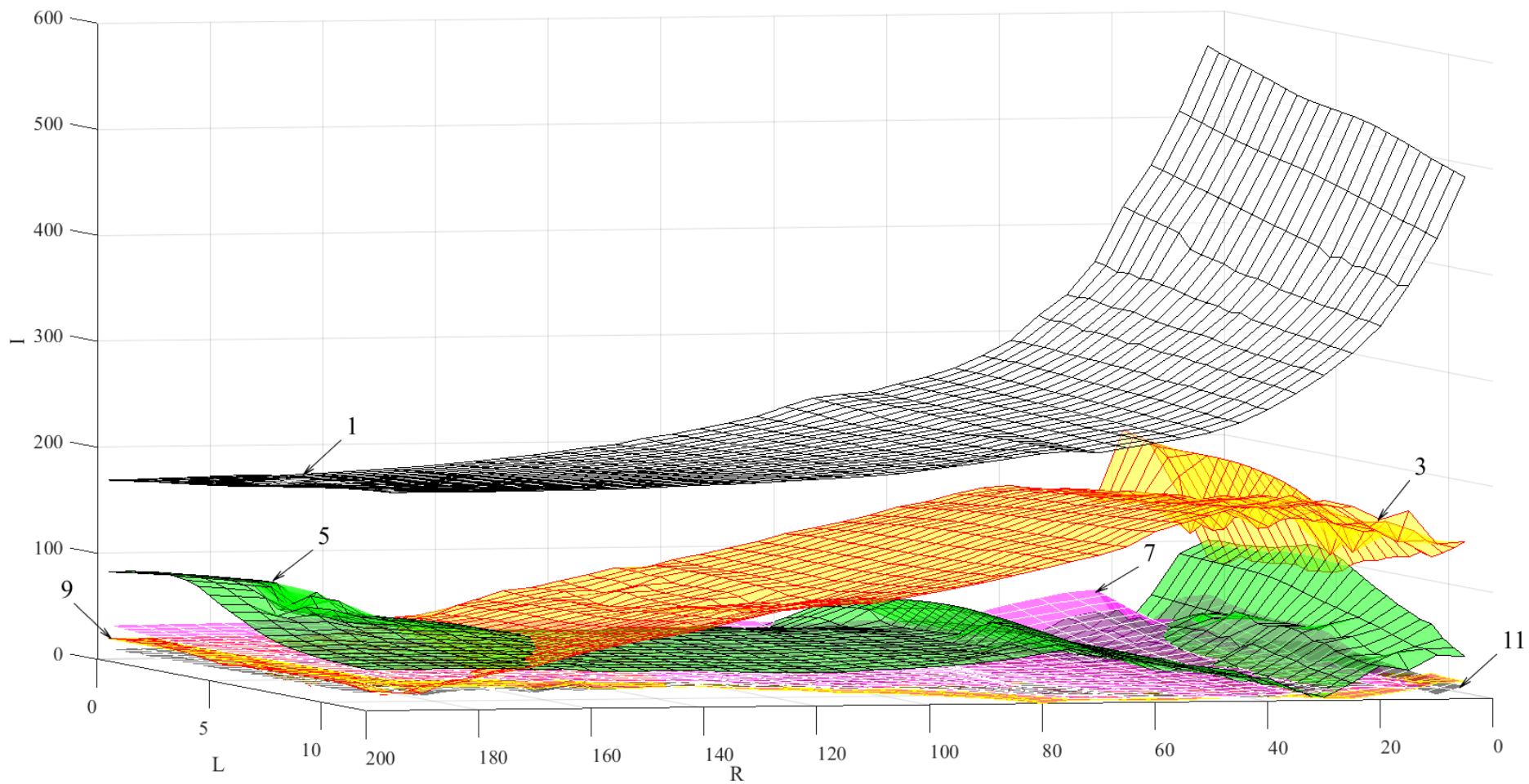


Рис. 2.7 – Гармонічні складові струму ОЗЗ при об'єднанні нейтралей, утворених вторинними обмотками розподільних трансформаторів зі зхемами з'єднання Y/Y_n для першого та Y/Y_n для другого

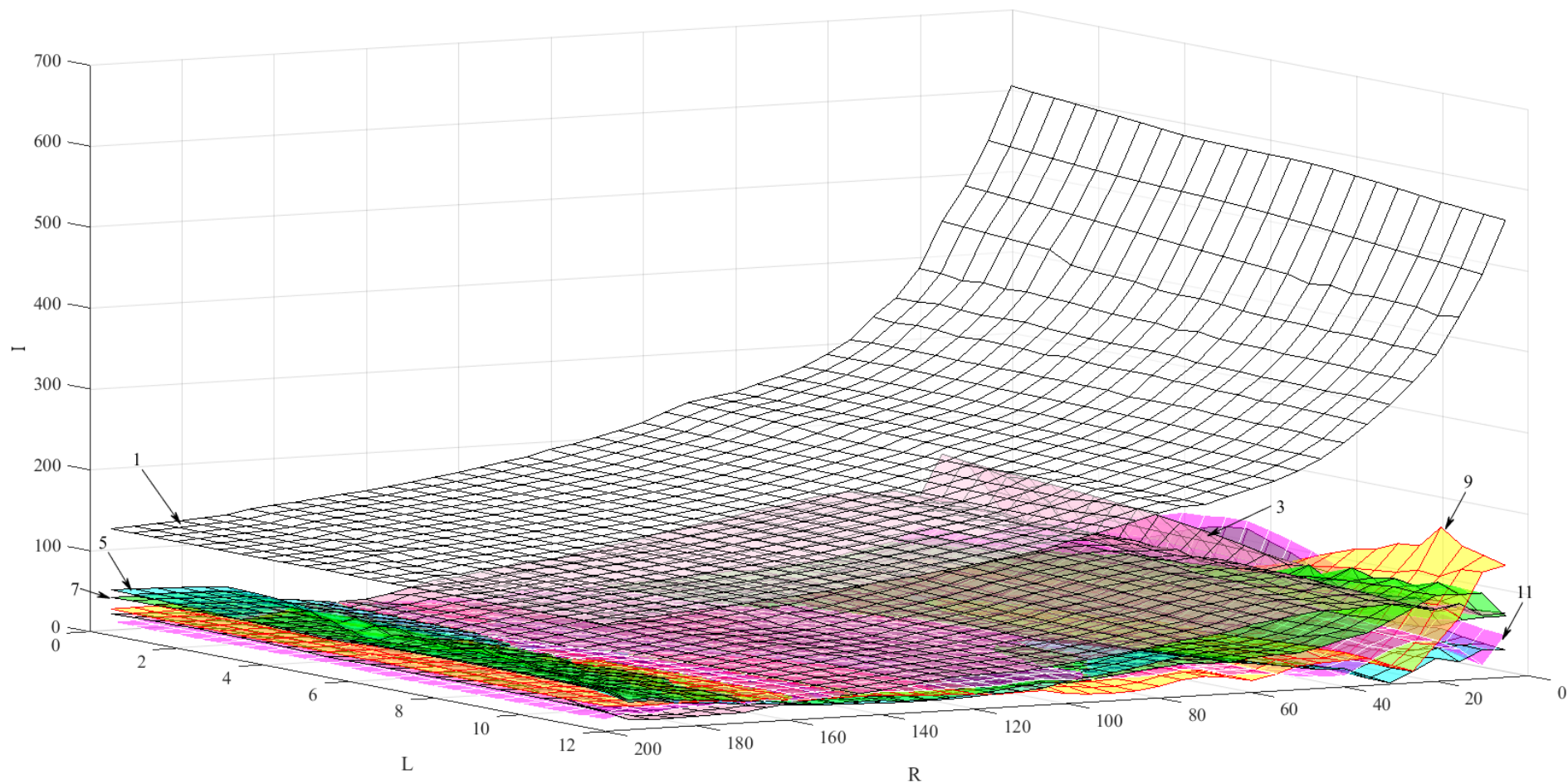


Рис. 2.8 – Гармонічні складові струму в першій нейтралі при об'єднанні нейтралей, утворених вторинними обмотками розподільних трансформаторів зі зхеми з'єднання Y/Y_n для першого та Y/Y_n для другого

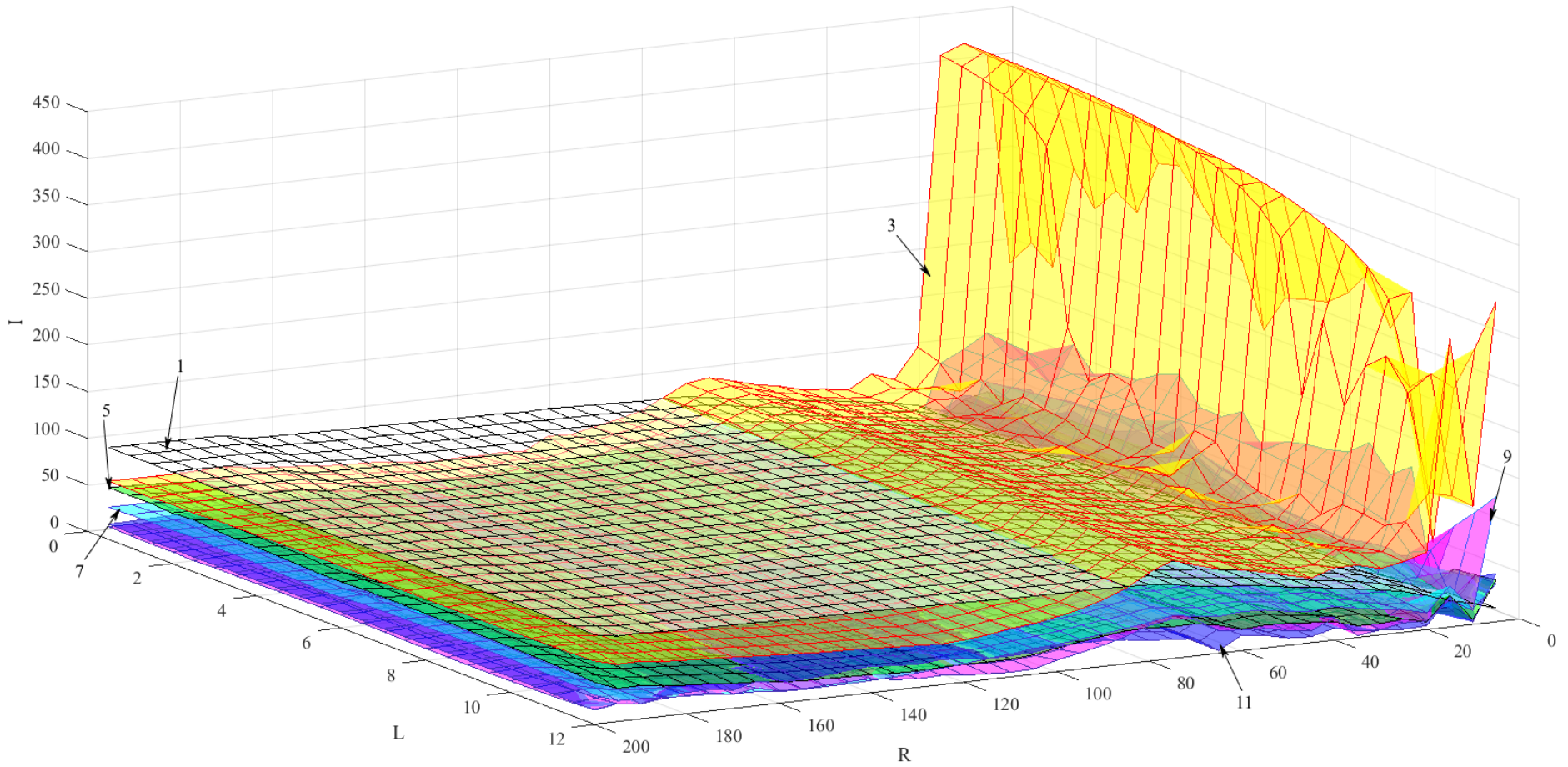


Рис. 2.9 – Гармонічні складові струму в другій нейтралі при об'єднанні нейтралей, утворених вторинними обмотками розподільних трансформаторів зі зхемами з'єднання Y/Y_n для першого та Y/Y_n для другого

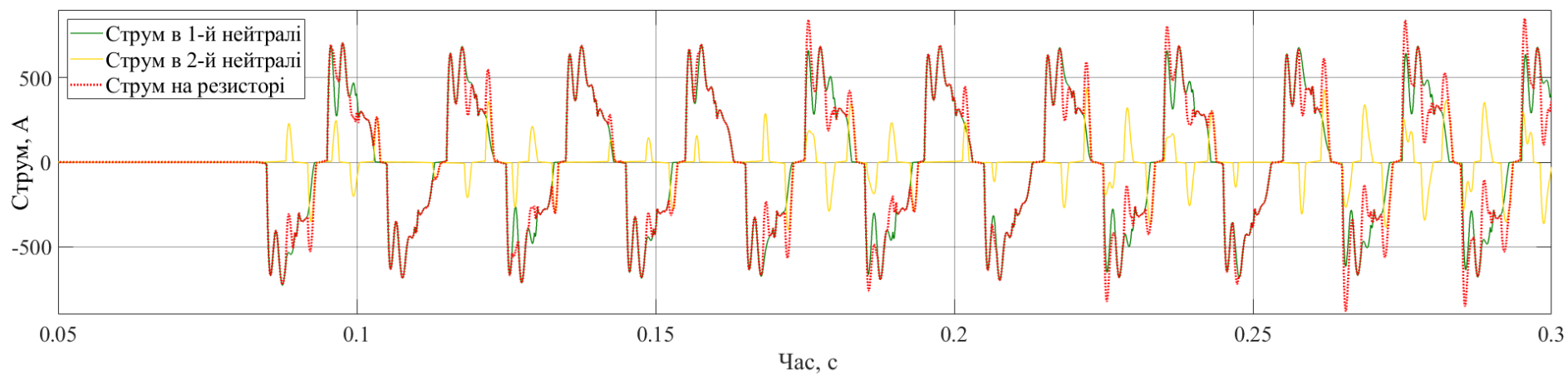


Рис. 2.10 – Струми в нейтралях мережі і на резисторі для випадку $L1=5$ км, $R=10$ Ом, при об'єднанні нейтралей, утворених вторинними обмотками розподільних трансформаторів зі зсхемами з'єднання Y/Y_n для першого та Y/Y_n для другого

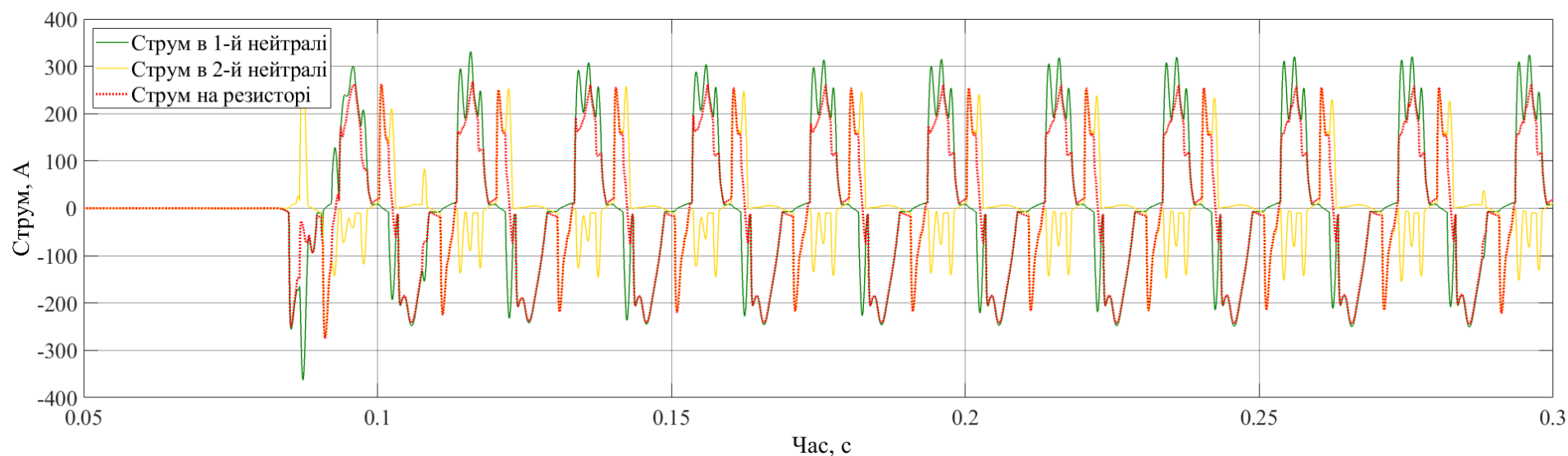


Рис. 2.11 – Струми в нейтралях мережі і на резисторі для випадку $L1=5$ км, $R=100$ Ом, при об'єднанні нейтралей, утворених вторинними обмотками розподільних трансформаторів зі зсхемами з'єднання Y/Y_n для першого та Y/Y_n для другого

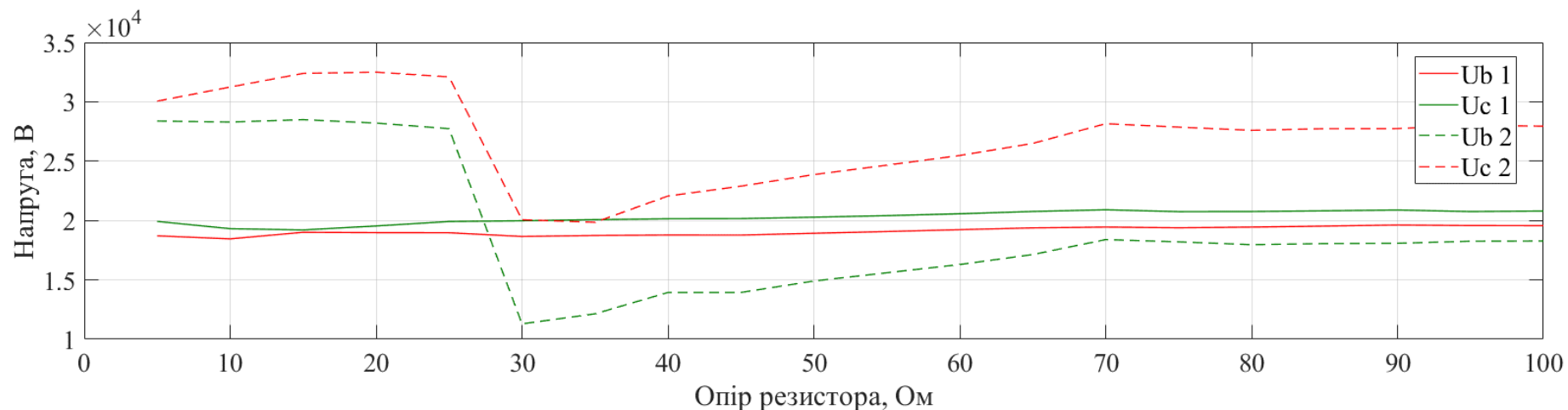


Рис. 2.12 – Середня квадратична величина напруги в мережі при КЗ при об'єднанні нейтралей, утворених вторинними обмотками розподільних трансформаторів зі зхемами з'єднання Y/Y_n для першого та Y/Y_n для другого

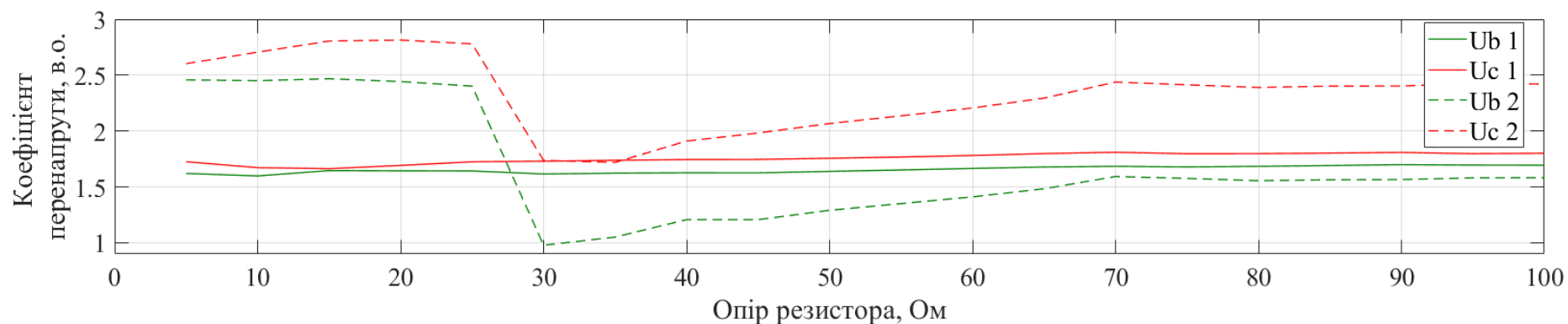


Рис. 2.13 – Коефіцієнт перенапруги в мережі при КЗ при об'єднанні нейтралей, утворених вторинними обмотками розподільних трансформаторів зі зхемами з'єднання Y/Y_n для першого та Y/Y_n для другого

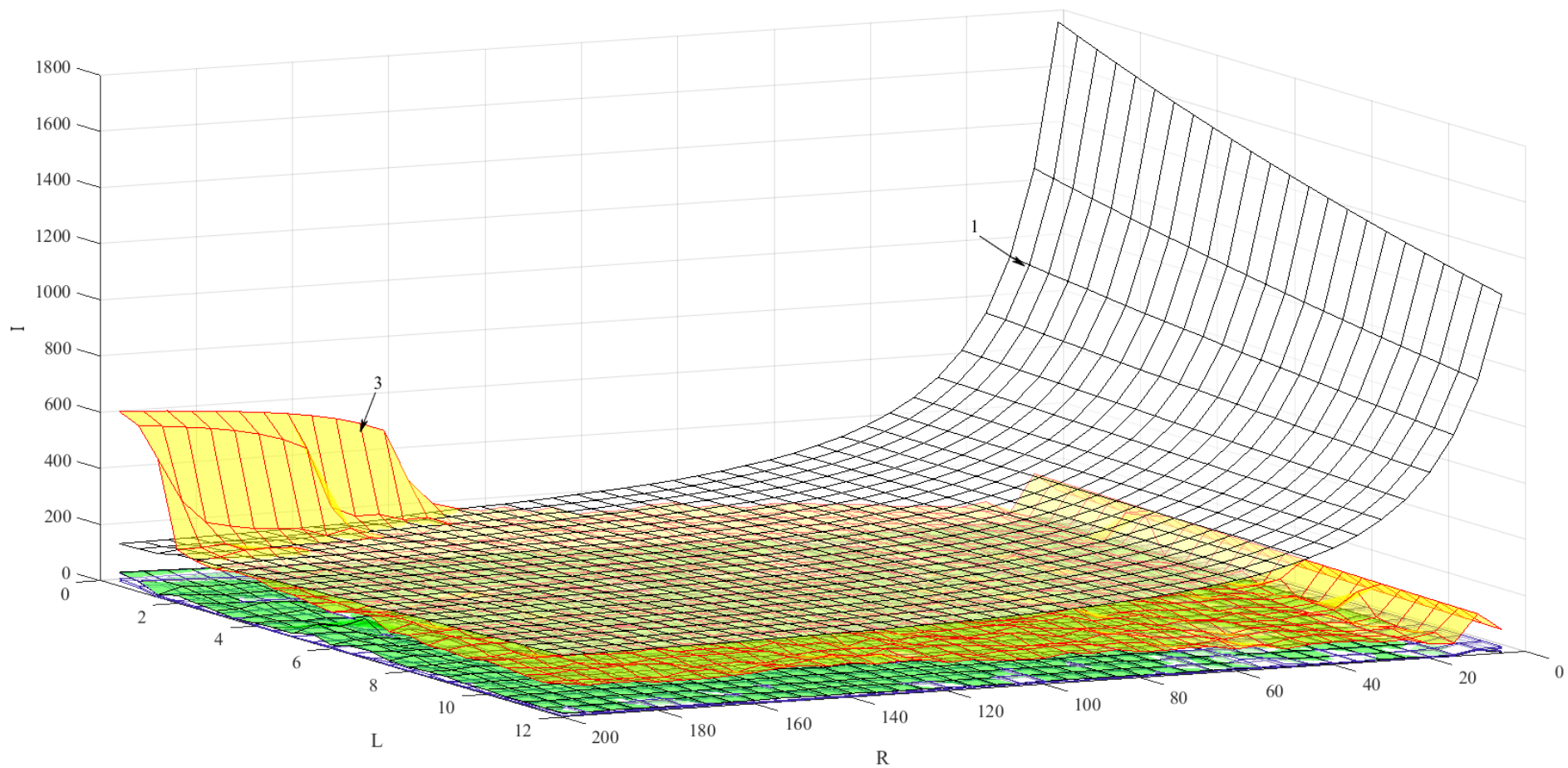


Рис. 2.14 – Гармонічні складові струму ОЗЗ при об'єднанні нейтралей, утворених вторинними обмотками розподільних трансформаторів зі зхемами з'єднання Y_g/Y_n для першого та Y/Y_n для другого

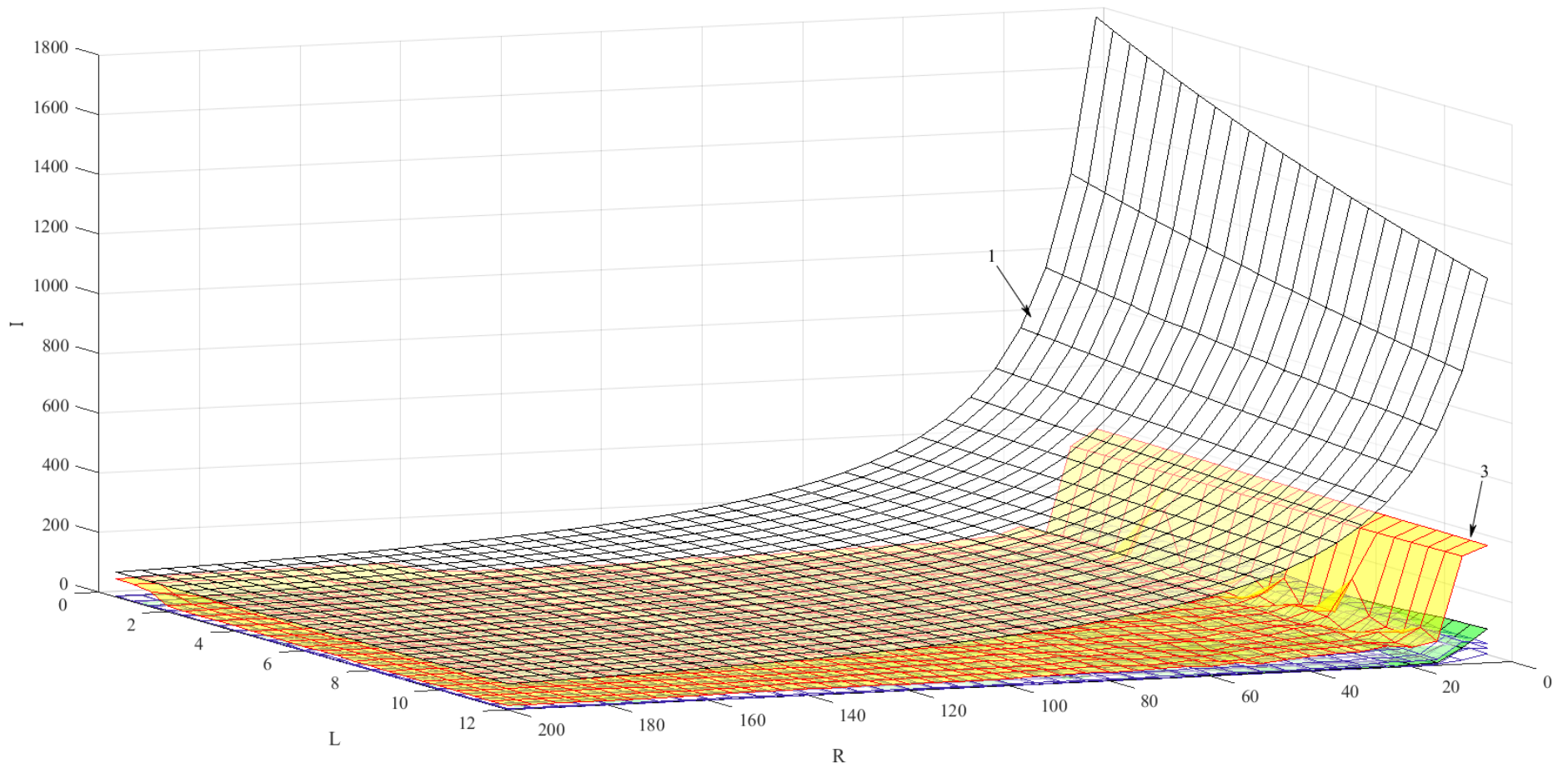


Рис.2.15 – Гармонічні складові струму на резисторі при об'єднанні нейтралей, утворених вторинними обмотками розподільних трансформаторів зі зхемами з'єднання Yg/Yn для першого та Y/Yn для другого

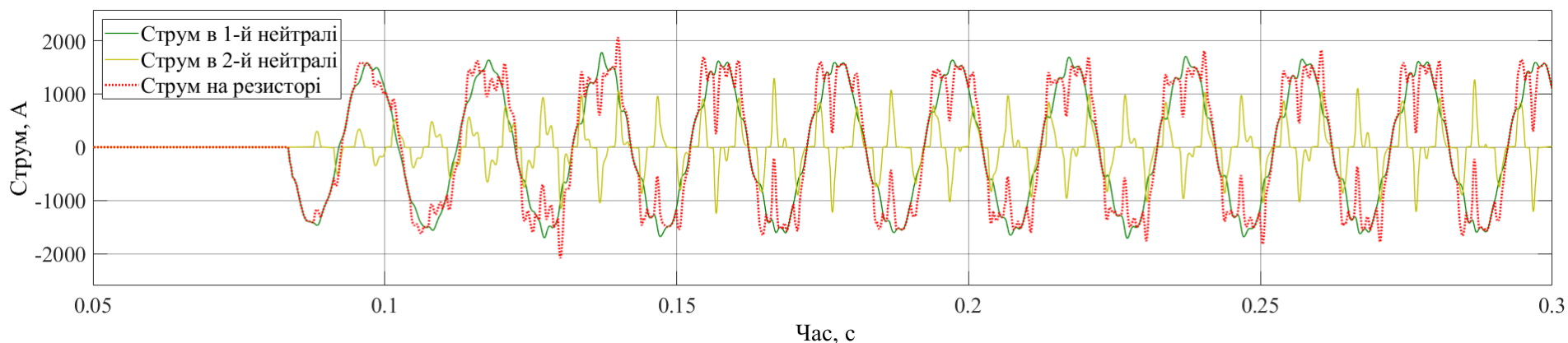


Рис. 2.16 – Струми в нейтралях мережі і на резисторі для випадку $L1=5$ км, $R=5$ Ом при об'єднанні нейтралей, утворених вторинними обмотками розподільних трансформаторів зі зхемами з'єднання Yg/Yn для першого та Y/Yn для другого

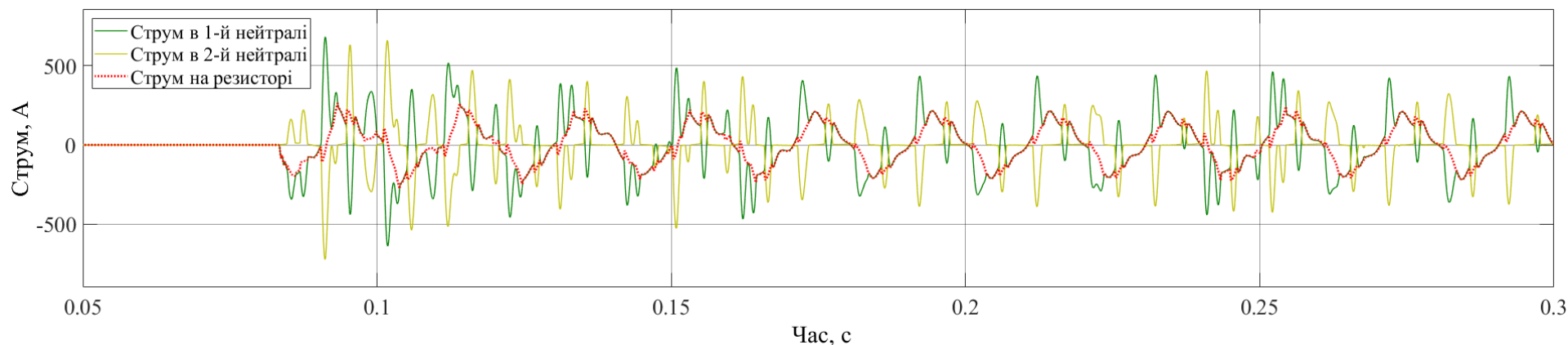


Рис. 2.17 – Струми в нейтралях мережі і на резисторі для випадку $L1=5$ км, $R=100$ Ом при об'єднанні нейтралей, утворених вторинними обмотками розподільних трансформаторів зі зхемами з'єднання Yg/Yn для першого та Y/Yn для другого

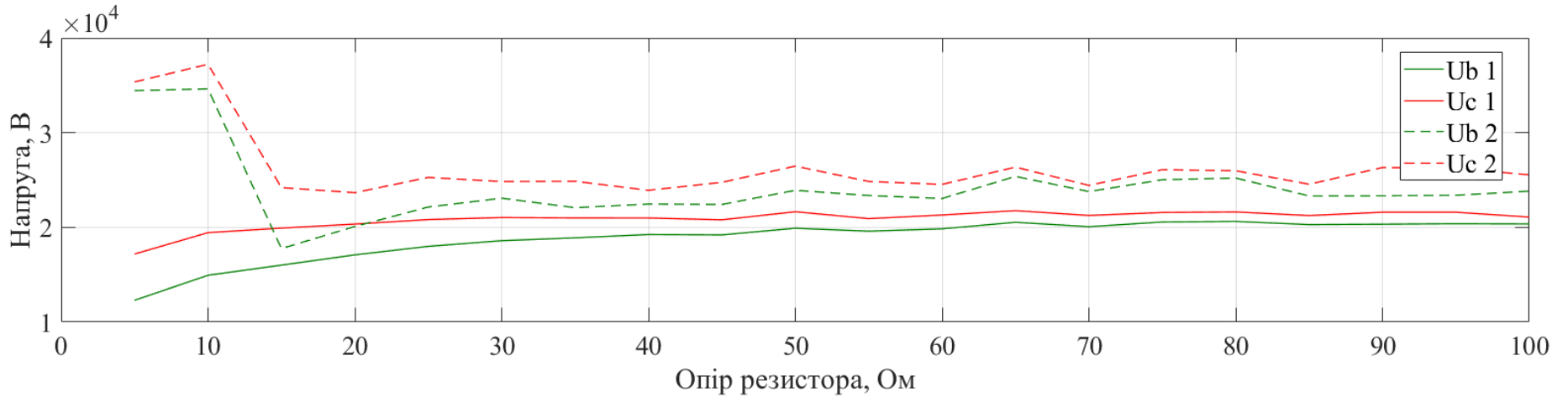


Рис. 2.18 – Середня квадратична величина напруги в мережі при КЗ при об'єднанні нейтралей, утворених вторинними обмотками розподільних трансформаторів зі зхемами з'єднання Yg/Yn для першого та Y/Yn для другого

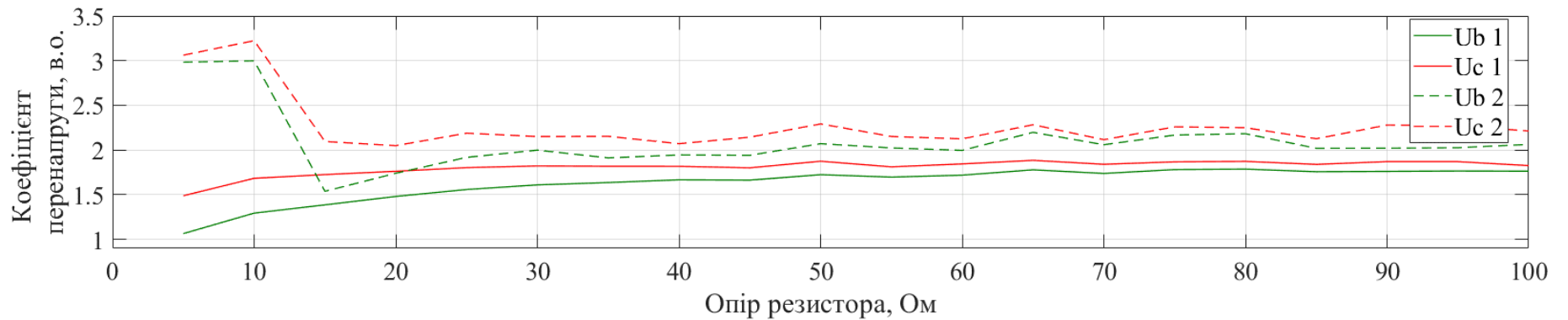


Рис. 2.19 – Коефіцієнт перенапруги в мережі при КЗ при об'єднанні нейтралей, утворених вторинними обмотками розподільних трансформаторів зі зхемами з'єднання Yg/Yn для першого та Y/Yn для другого

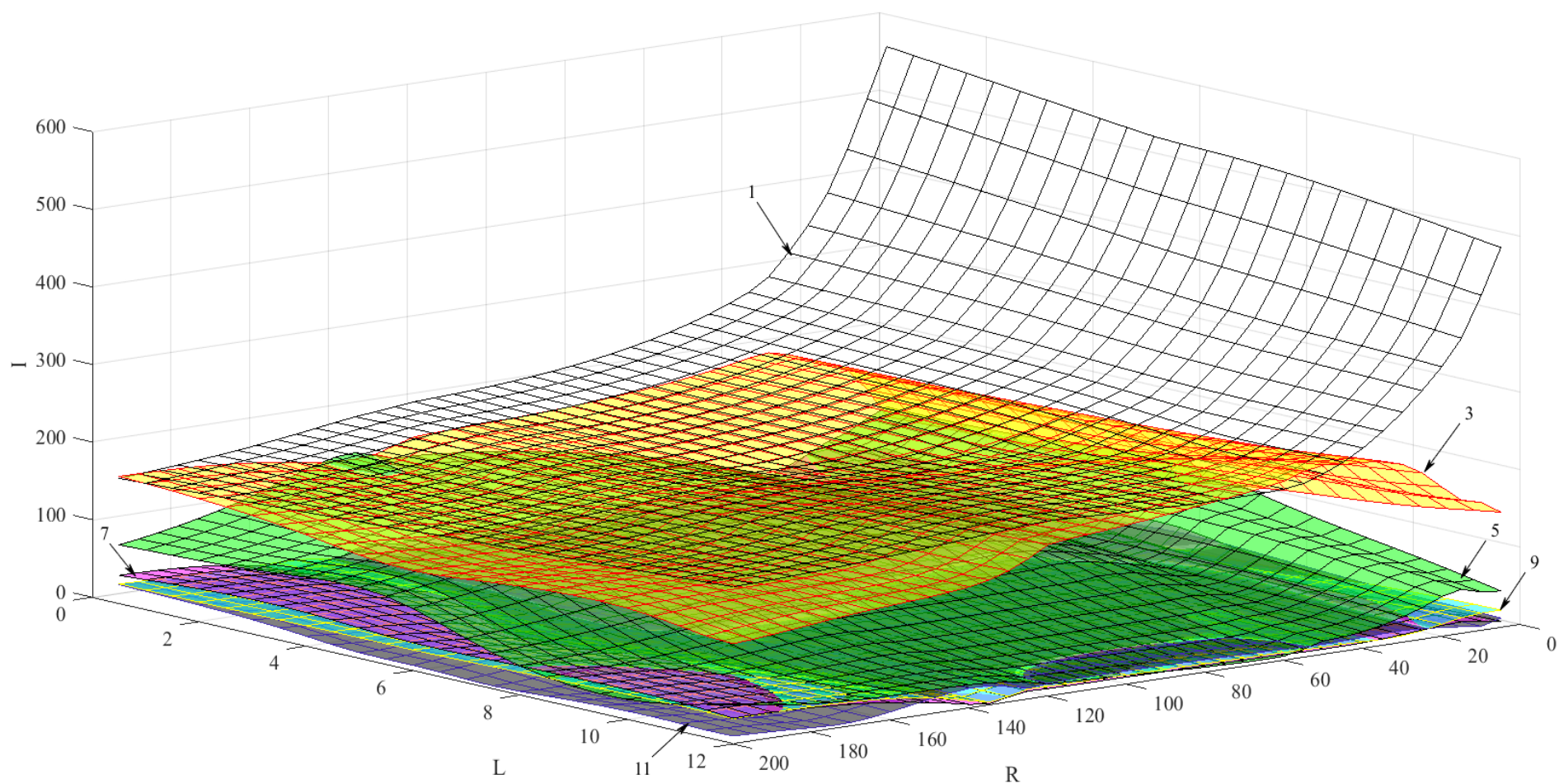


Рис. 2.20 – Гармонічні складові струму ОЗЗ при об'єднанні нейтралей, утворених вторинними обмотками розподільних трансформаторів зі зхемами з'єднання Y/Y_n для першого та Yg/Y_n для другого

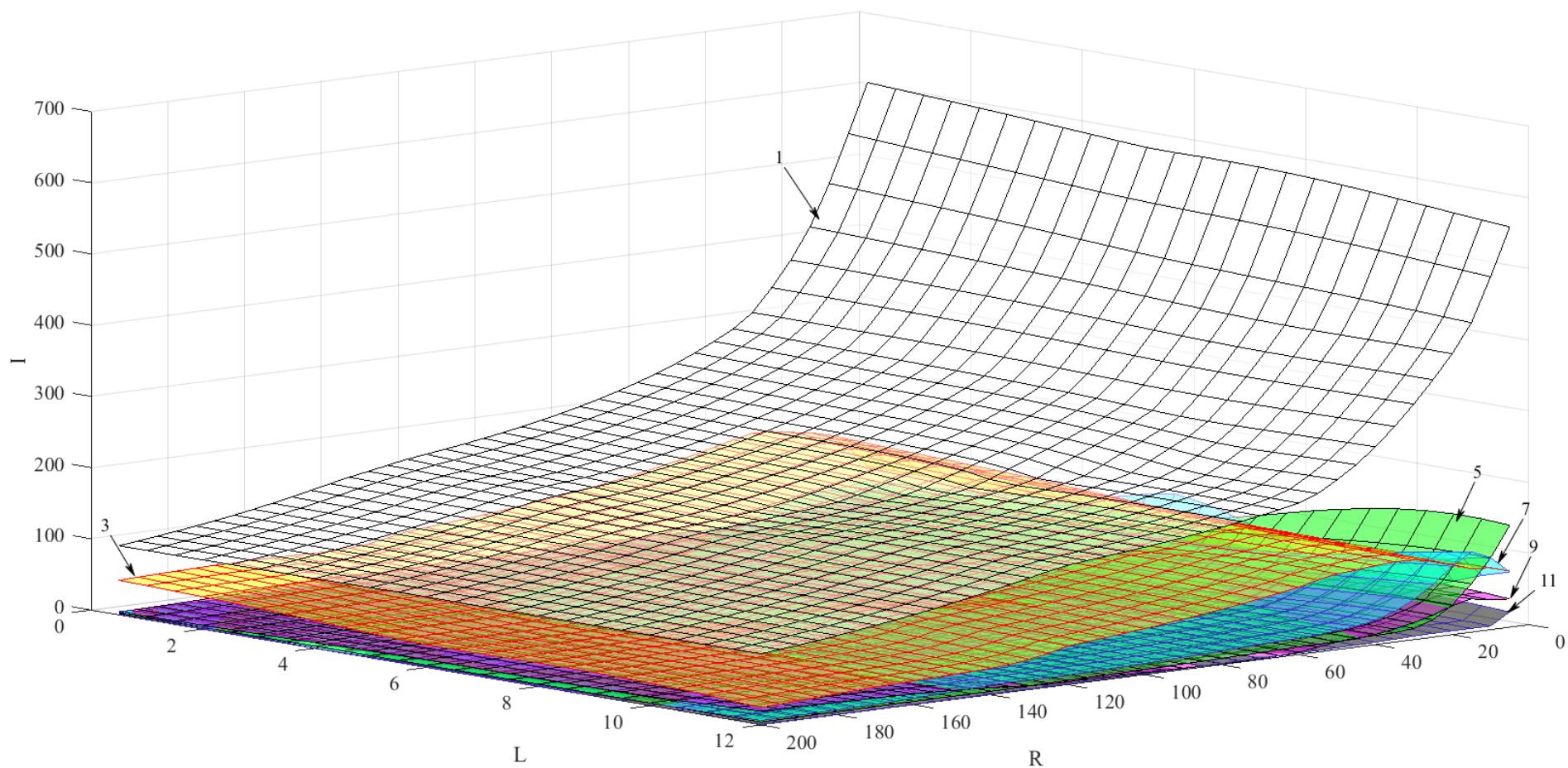


Рис. 2.21 – Гармонічні складові струму на резисторі при об'єднанні нейтралей, утворених вторинними обмотками розподільних трансформаторів зі зхемами з'єднання Y/Y_n для першого та Yg/Y_n для другого

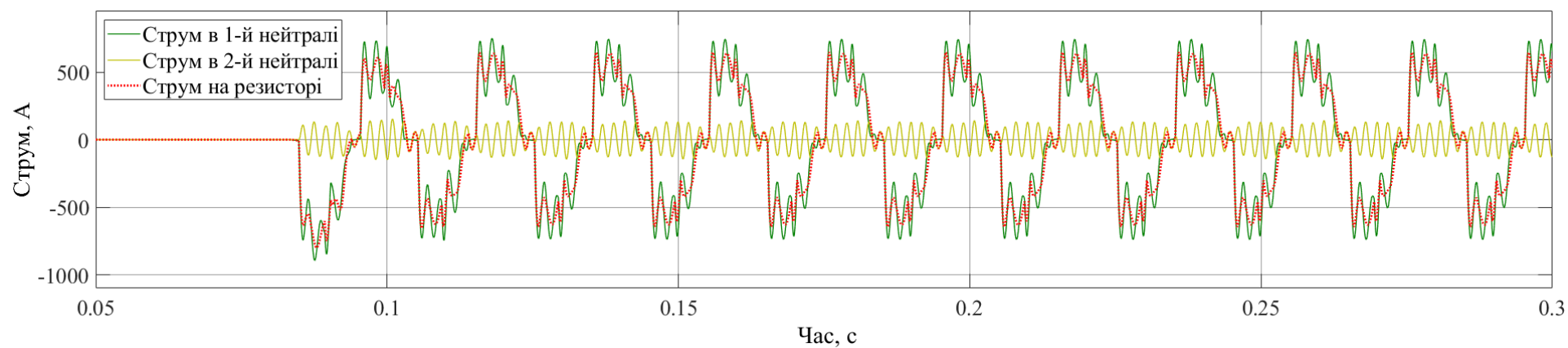


Рис. 2.22 – Струми в нейтралях мережі і на резисторі для випадку $L1=5$ км, $R=5$ Ом при об'єднанні нейтралей, утворених вторинними обмотками розподільних трансформаторів зі зхемами з'єднання Y/Y_n для першого та Y_g/Y_n для другого

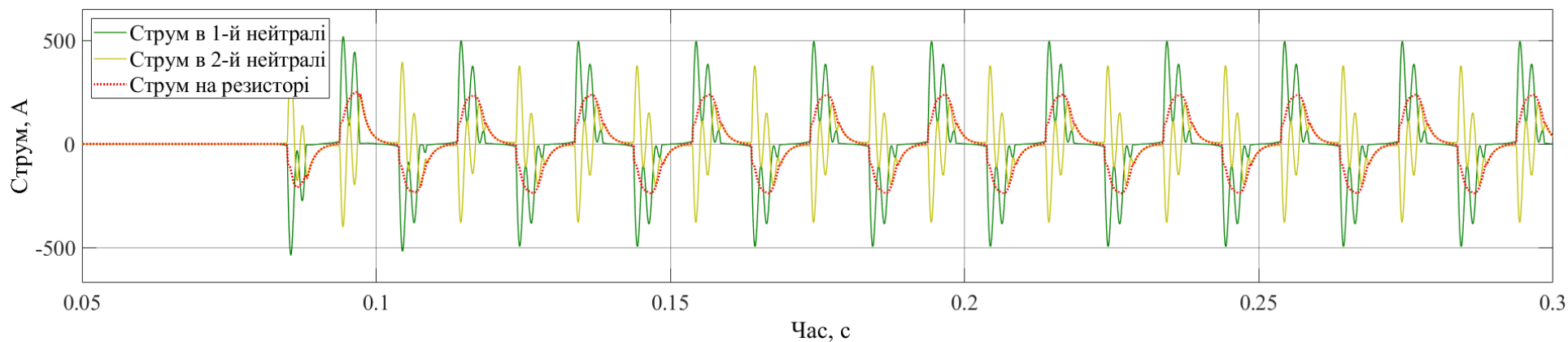


Рис. 2.22 – Струми в нейтралях мережі і на резисторі для випадку $L1=5$ км, $R=100$ Ом при об'єднанні нейтралей, утворених вторинними обмотками розподільних трансформаторів зі зхемами з'єднання Y/Y_n для першого та Y_g/Y_n для другого

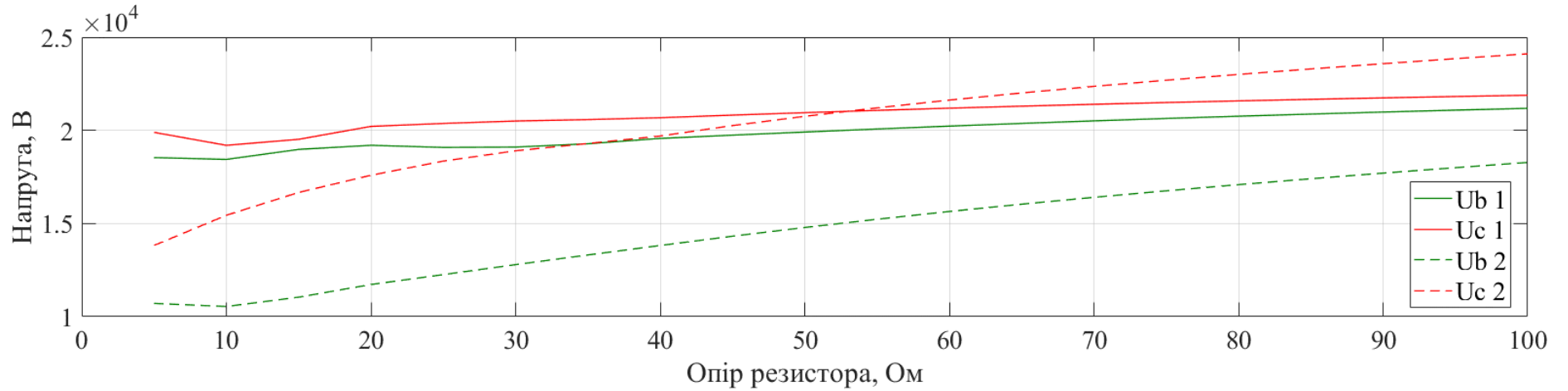


Рис. 2.23 – Середня квадратична величина напруги в мережі при КЗ при об'єднанні нейтралей, утворених вторинними обмотками розподільних трансформаторів зі зхемами з'єднання Y/Y_n для першого та Y_g/Y_n для другого

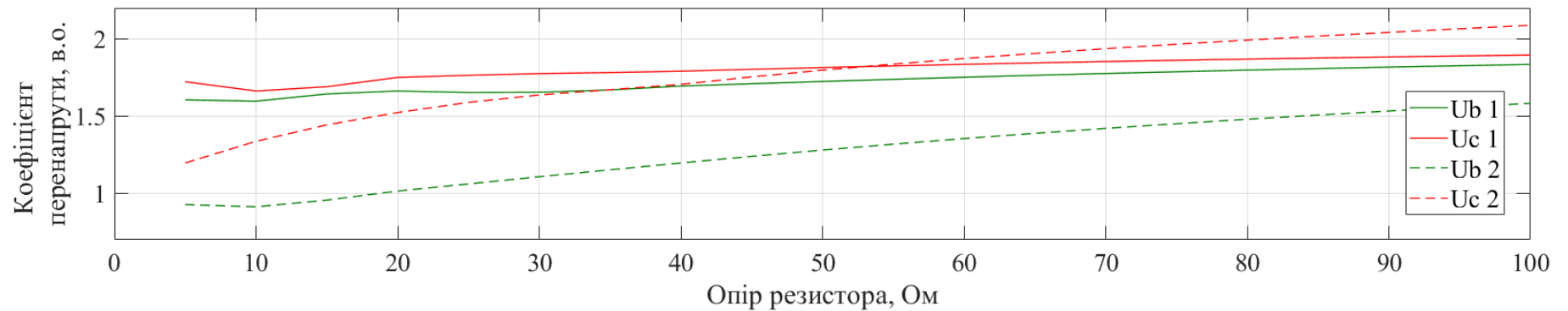


Рис. 2.24 – Коефіцієнт перенапруги в мережі при КЗ при об'єднанні нейтралей, утворених вторинними обмотками розподільних трансформаторів зі зхемами з'єднання Y/Y_n для першого та Y_g/Y_n для другого

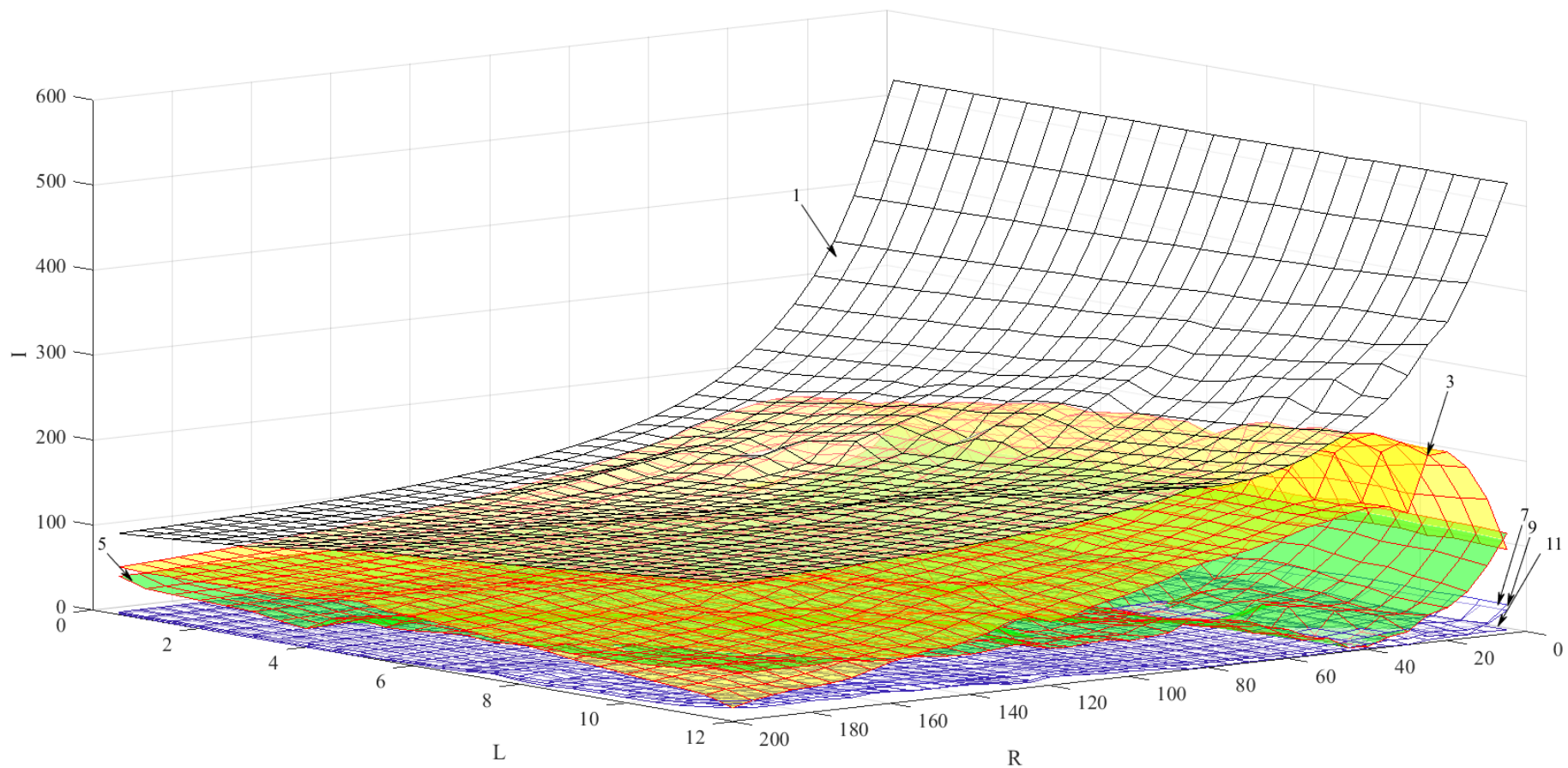


Рис. 2.25 – Гармонічні складові струму O33 в досліді 4

З проведених дослідів слідує, що наявність або відсутність заземлення нейтралі по стороні 110 кВ у випадку сумісного заземлення нейтралі в мережі 20 кВ, впливає на значення струмів ОЗЗ. Цей вплив є суттєвим, оскільки розбіжність становить понад 1 кА, що призводить до необхідності збільшення наборів уставок для різних схем живлення мережі, наприклад, із введеним СВ та виведеним трансформатором 110/20 кВ.

При об'єднанні нейтралі по стороні НН розподільних трансформаторів 110/20 кВ виникає електричний зв'язок між частинами мережі, що спричиняє перенапруги при ОЗЗ в обох мережах, при чому в непошкодженій мережі коефіцієнт перенапруг перевищує 2.

2.4 Встановлення заземлюючого резистора в окремо створено спільну нейтраль

Розглянуто варіанти встановлення резистора в об'єднану нейтраль, утворену через ТЗН або ФМЗО. Для цього змінено групи з'єднань розподільних трансформаторів на Y/D_{11} та під'єднано резистор як показано на рис. 2.26 та 2.27. Параметри ФМЗО наведено на рис. 2.28.

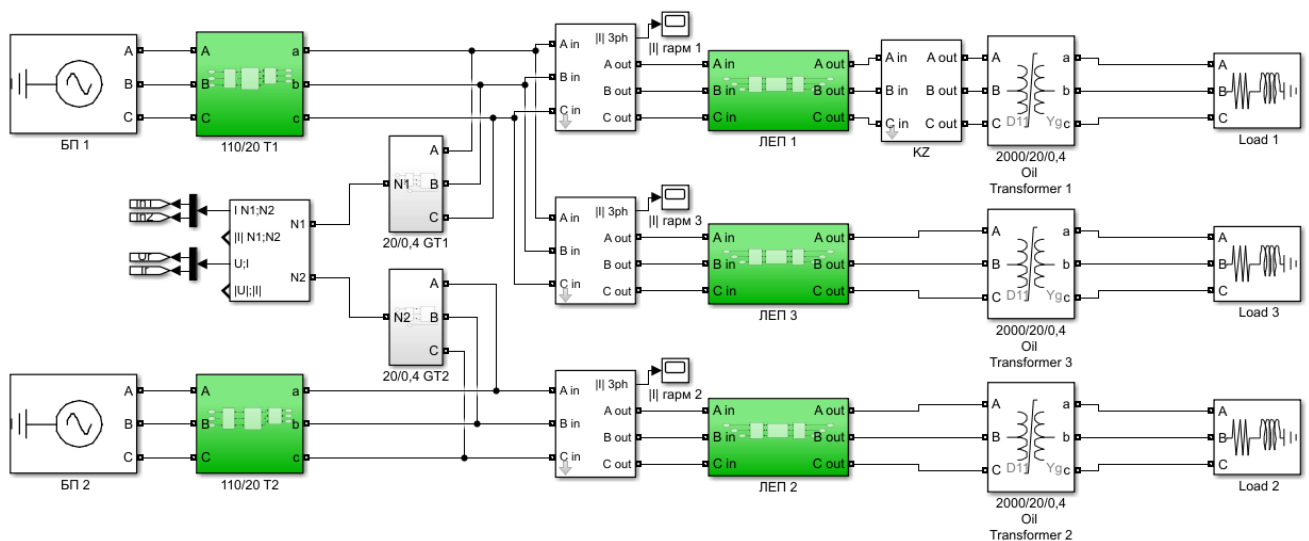


Рис. 2.26 – Схема мережі з об'єднанням нейтралі через ТЗН або ФМЗО

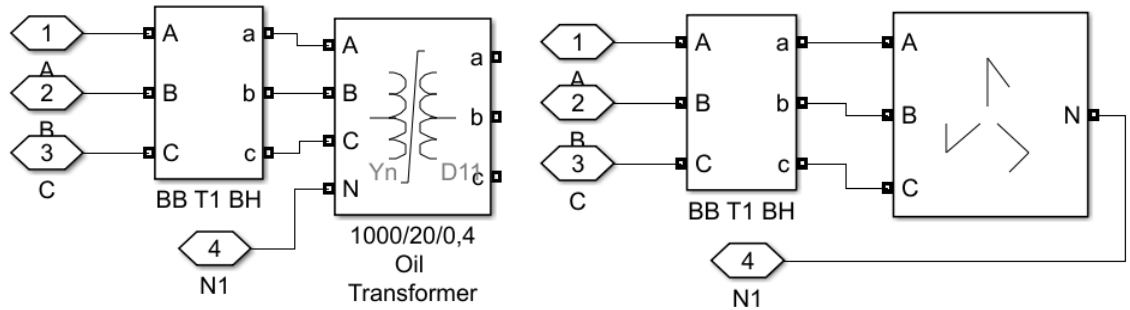


Рис. 2.27 – Створення нейтралі через ТЗН або ФМЗО

З аналогічними параметрами до досліду 1 виконано розрахунок струму в мережі за різного значення опору резистора та довжини лінії 1.

Parameters	
Units	pu
Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)]	
[2e6 50]	
Nominal voltage Vn Ph-Ph(Vrms)	
21000	
Zero-sequence resistance and reactance [Ro(pu) Xo(pu)]	
[0.0025 0.075]	
Magnetization branch [Rm(pu) Xm(pu)]	
[1031 169]	
Measurements	None

Рис. 2.28 – Параметри ФМЗО

Використання окремого трансформатора заземлення нейтралі має усунути можливість живлення мережі від суміжної системи зі сторони мережі напругою 110 кВ. Це означає, що напруга на фазі, на якій відбулося КЗ, в обох мережах матиме однакове значення. Також, струми зазнають меншого спотворення за рахунок зростання опору між двома мережами.

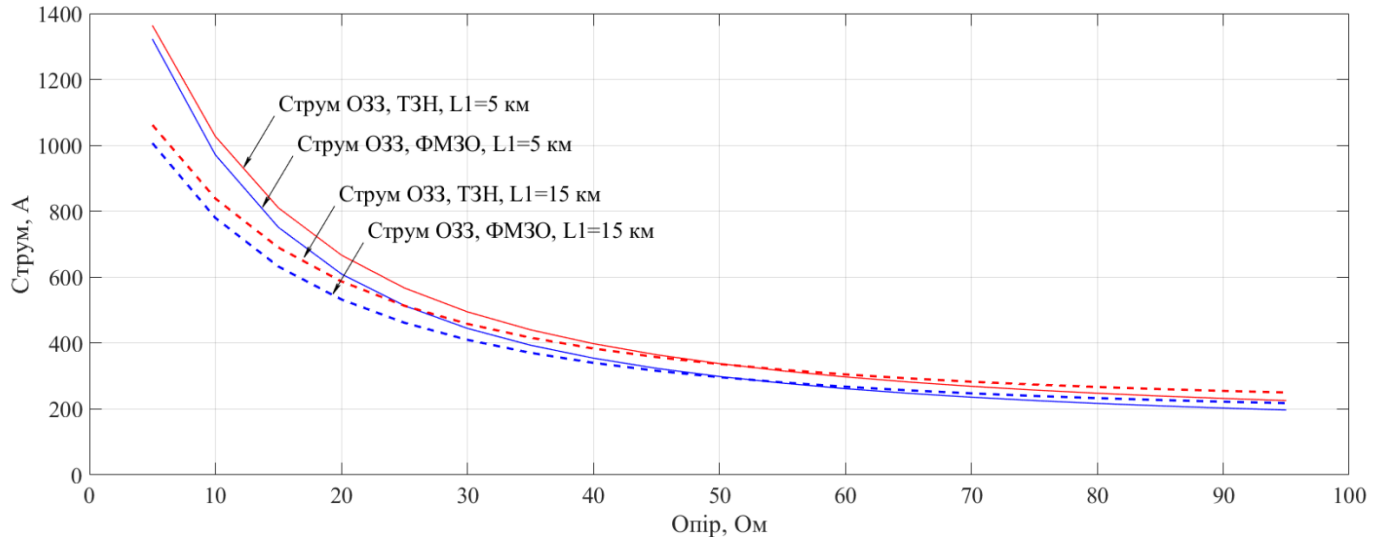


Рис. 2.29 – Струм 1-ї гармоніки при заземненні через ФМЗО або ТЗН

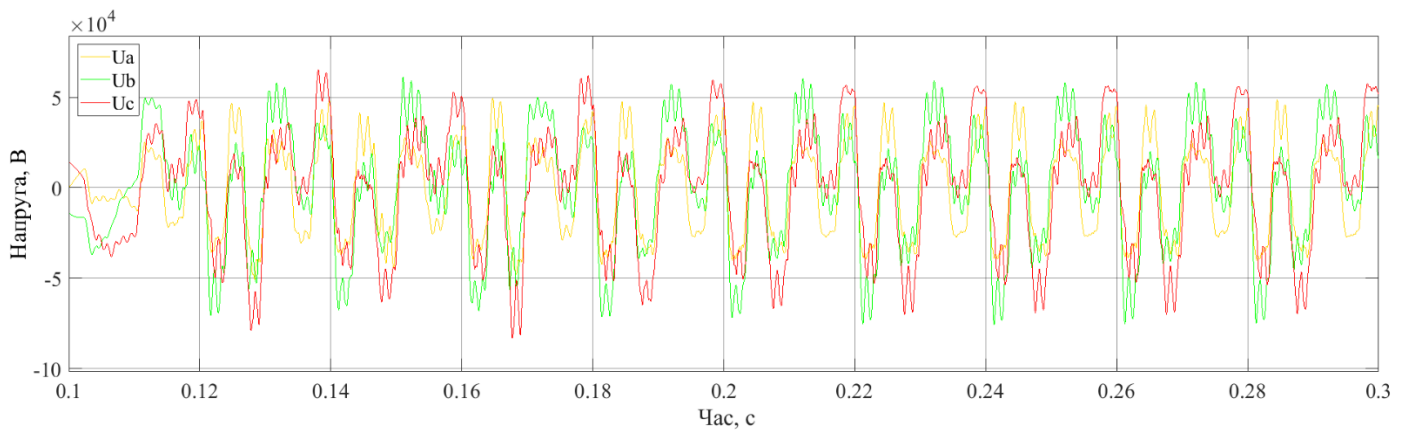


Рис. 2.30 – Напруга в суміжній мережі при КЗ в першій зі спільною резистивно заземленою нейтраллю, $R=100 \text{ Ом}$

Створення нейтралі через ТЗН або ФМЗО має значно зменшити вплив мережі на суміжну із нею за рахунок збільшення індуктивного опору між нейтралями частин мережі. Середньо квадратичні значення напруг, при утворенні нейтралі через ТЗН, наведено на рис. 2.30.

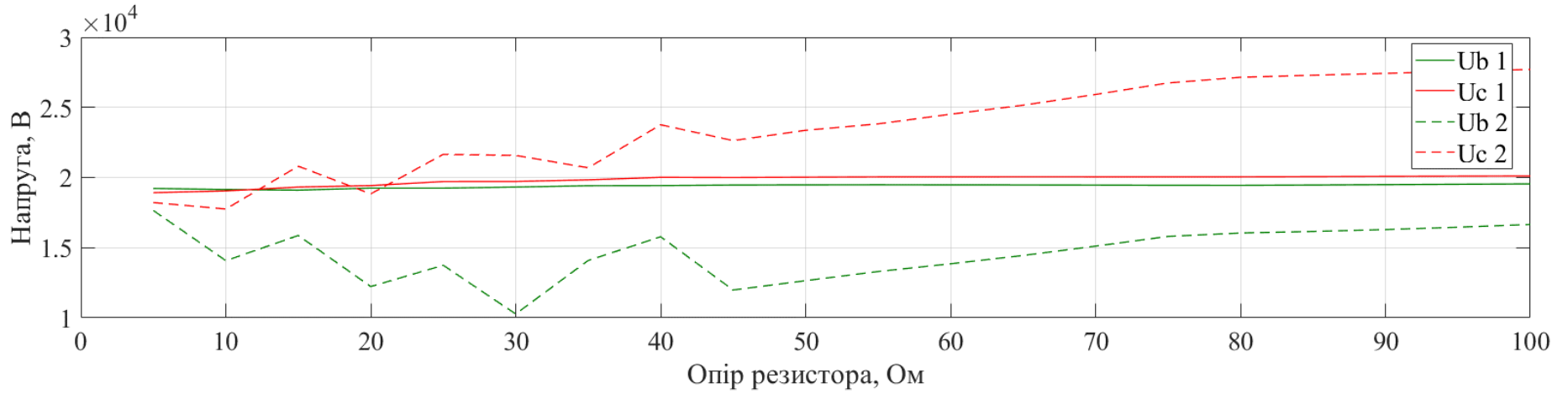


Рисунок 2.31 – Середня квадратична величина напруги в мережі при КЗ зі спільною резистивно заземленою нейтраллю через ТЗН

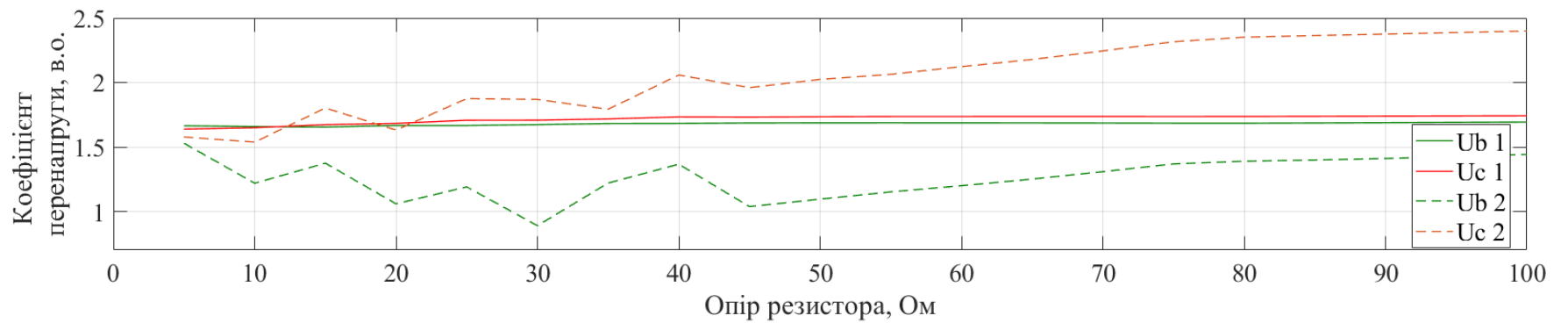


Рис. 2.32 – Коефіцієнт перенапруги в мережі при КЗ зі спільною резистивно заземленою нейтраллю через ТЗН

2.5 Встановлення заземлюючого резистора в окрему нейтраль мережі

2.5.1 Моделювання мережі

Таке заземлення вважається найбільш імовірним, оскільки зникає необхідність використовувати резистор підвищеного опору, зникає негативний вплив на суміжну мережу, а також відсутнє підживлення від "сусідніх" ємностей.

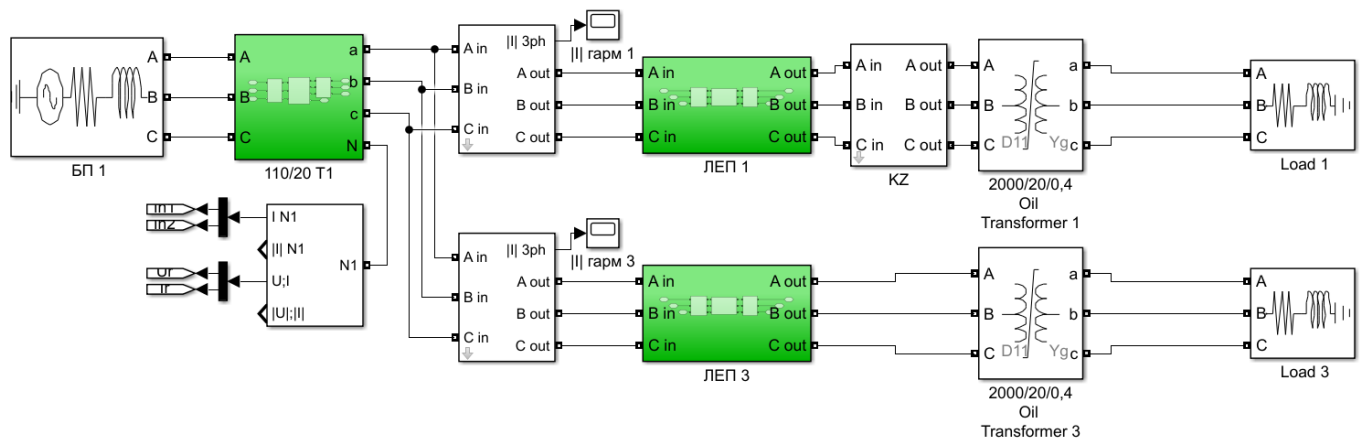


Рис. 2.33 – Мережа при заземненні нейтралі розподільного трансформатора 110/20 кВ зі сторони 20 кВ

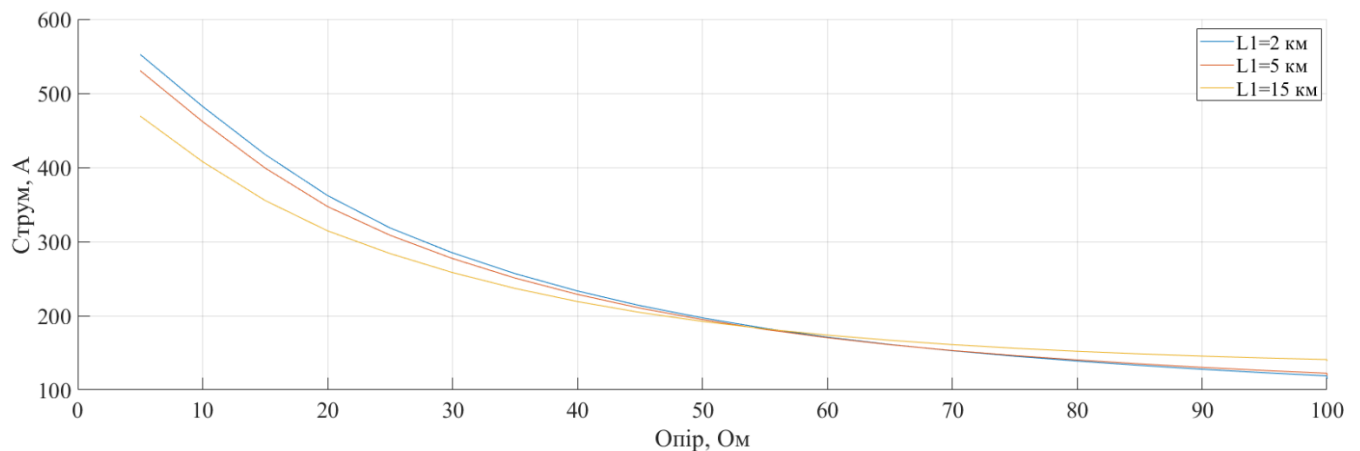


Рис. 2.34 – Струм 1-ї гармоніки ОЗЗ при заземненні нейтралі розподільного трансформатора 110/20 кВ зі сторони 20 кВ

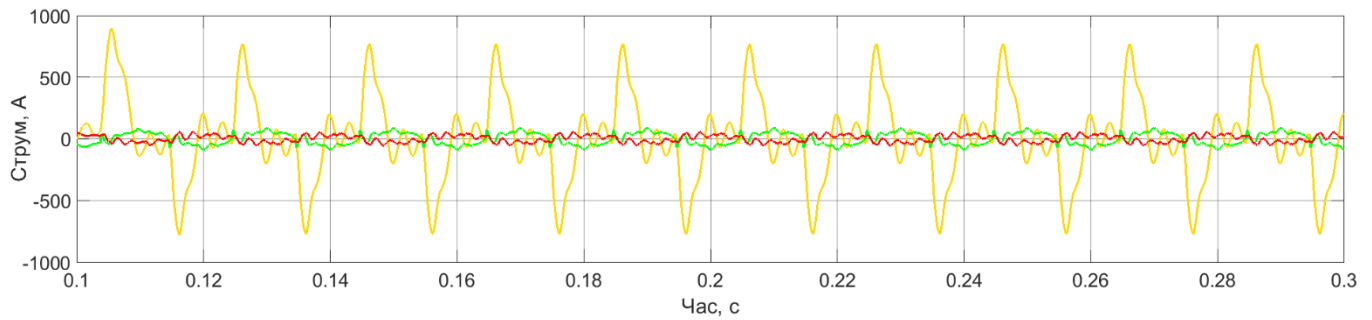


Рис.2.35 – Струм в місці КЗ, $L_1=5$ км, $R=25$ Ом

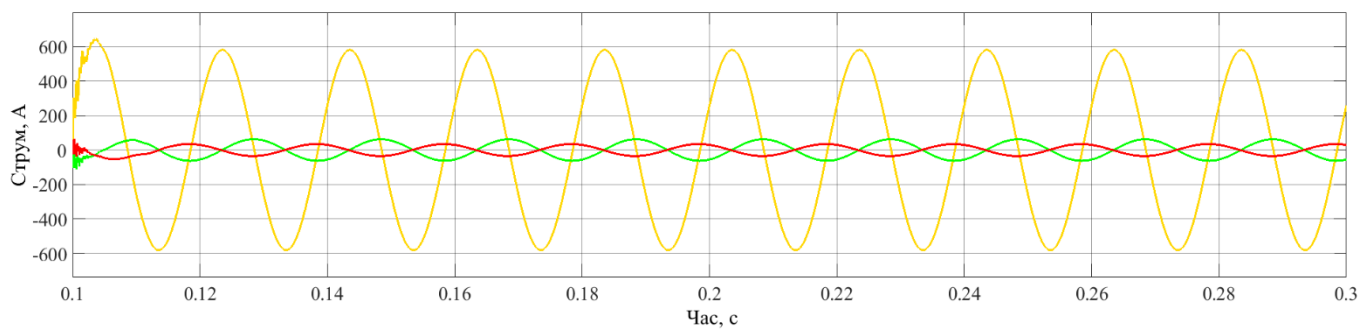


Рис. 2.36 – Струм в місці КЗ при заземленні через ТЗН, $L_1=5$ км, $R=25$ Ом

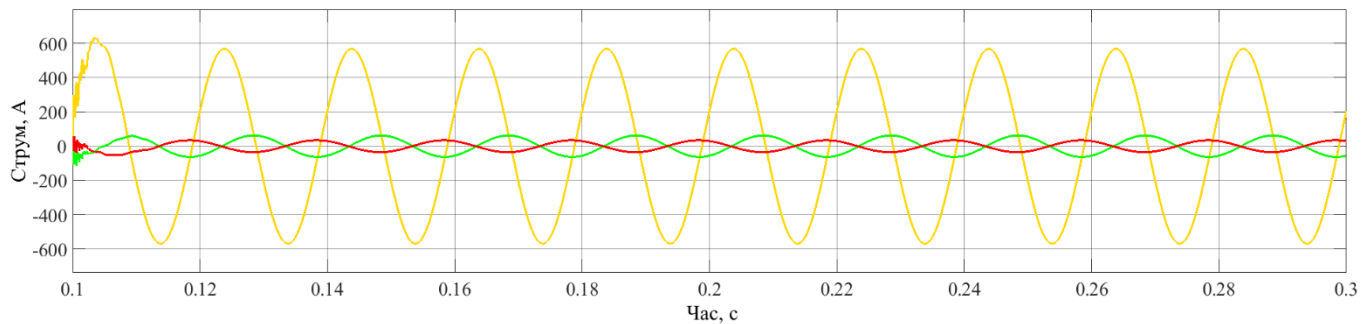


Рис. 2.37 – Струм в місці КЗ при заземленні через ФМЗО, $L_1=5$ км, $R=25$ Ом

Як видно з рис 2.35 – 2.37 при встановленні резистора безпосередньо в нейтраль мережі значно спотворюється форма струму, що може ускладнити дію РЗА, а при використанні окремих нейтрале утворюючих пристроїв, таких як ТЗН або ФМЗО струм КЗ має синусоїдальну форму.

2.5.2 Ручний розрахунок струму однофазного замикання на землю

На відміну від мережі зі спільною нейтраллю, у випадку окремо заземленої нейтралі, можливо орієнтовно розрахувати струм ОЗЗ в залежності від значення опору резистора та ємностей мережі. Для цього слід звернутися до схем протікання ємнісного струму по мережі при ізолюваній та глухозаземленій нейтралі.

Для мережі із глухозаземленою нейтраллю струм однофазного КЗ визначається за формулою[9]:

$$I_K^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{с ном}}}{\sqrt{\left(2 \cdot r_{\text{зОВ}} + r_{\text{зОВ}0} + r_{\text{КЗ}}\right)^2 + \left(2 \cdot x_{\text{зОВ}} + x_{\text{зОВ}0}\right)^2}}, \quad (2.9)$$

де $U_{\text{с ном}}$ – номінальна напруга в мережі, В; $r_{\text{зОВ}}$ – активний опір від точки живлення до місці КЗ; $r_{\text{зОВ}0}$ – активний опір нульової послідовності від точки живлення до місці КЗ; $r_{\text{КЗ}}$ – активний опір дуги в місці КЗ; $x_{\text{зОВ}}$ – реактивний опір від точки живлення до місці КЗ; $x_{\text{зОВ}0}$ – реактивний опір нульової послідовності від точки живлення до місці КЗ.

В формулі 2.9 не враховуються ємнісні струми мережі, адже вони замикаються безпосередньо на нейтраль, опір якої є значно меншим за опір від точки живлення до місця КЗ. При встановленні резистора в нейтраль мережі його опір слід врахувати при визначенні опору нульової послідовності, відповідно до схеми заміщення мережі. Виходячи з того, що ємнісні струми виникають в мережі при протіканні струму КЗ через відповідні ємності ліній, рис. 2.38 [11], а також те, що опір резистора в нейтралі мережі суттєво менший за опор ізоляції фаз (ємнісний опір), то складовою ємнісного струму можна нехтувати і визначати струм ОЗЗ відповідно до формули 2.8 врахувавши опір резистора.

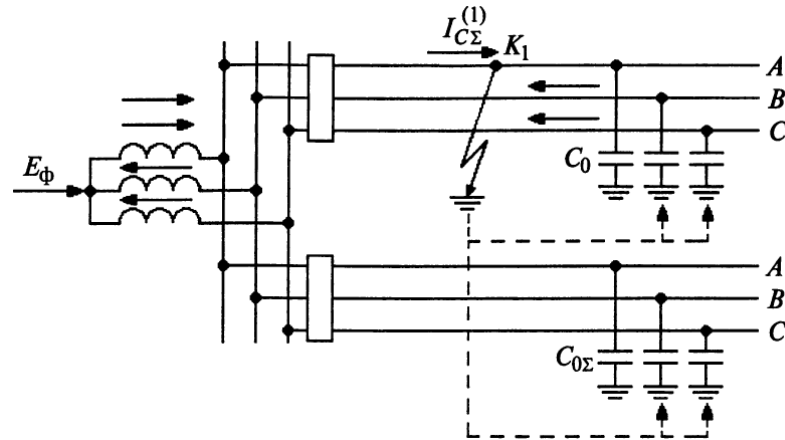


Рис. 2.38 – Розподіл струмів при ОЗЗ в мережі з ізолюваною нейтраллю

Таким чином маємо формулу вигляду:

$$I_{\kappa}^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{с ном}}}{\sqrt{\left(2 \cdot r_{\text{зОВ}} + r_{\text{зОВ}0} + r_{\text{кЗ}} + 3 \cdot (r_{\text{рез}} + r_{\text{г}})\right)^2 + \left(2 \cdot x_{\text{зОВ}} + x_{\text{зОВ}0}\right)^2}} \quad (2.10)$$

де $r_{\text{рез}}$ – опір заземлюючого резистора; $r_{\text{г}}$ – опір землі.

Формула 2.10 при визначенні струму в мережі, наведеному на рис. 2.33 Матиме вигляд:

$$I_{\kappa}^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{с ном}}}{\sqrt{\left(2 \cdot (r_{\text{Тр}} + r_{150} \cdot L_1) + 0,9 \cdot r_{\text{Тр}} + r_{0150} \cdot L_1 + 3 \cdot (r_{\text{рез}} + r_{\text{г}})\right)^2 + \left(2 \cdot (x_{\text{Тр}} + x_{150} \cdot L_1) + 0,9 \cdot x_{\text{Тр}} + x_{0150} \cdot L_1\right)^2}}$$

Таблиця 2.4 – Параметри обладнання мережі

Позначення од. обладнання	Назва од. обладнання	Параметр
110/20 Т1	31500/110/20 OLTC Transformer	Див. дод. А
ЛЕП 1	XRУНАКXS-20 3x(1x150/50)	L=5 км
ЛЕП 2, 3	XRУНАКXS-20 3x(1x150/50)	L=10 км
Навантаження 1, 2, 3	Load 1, 2, 3	1,4+j0,3 МВА

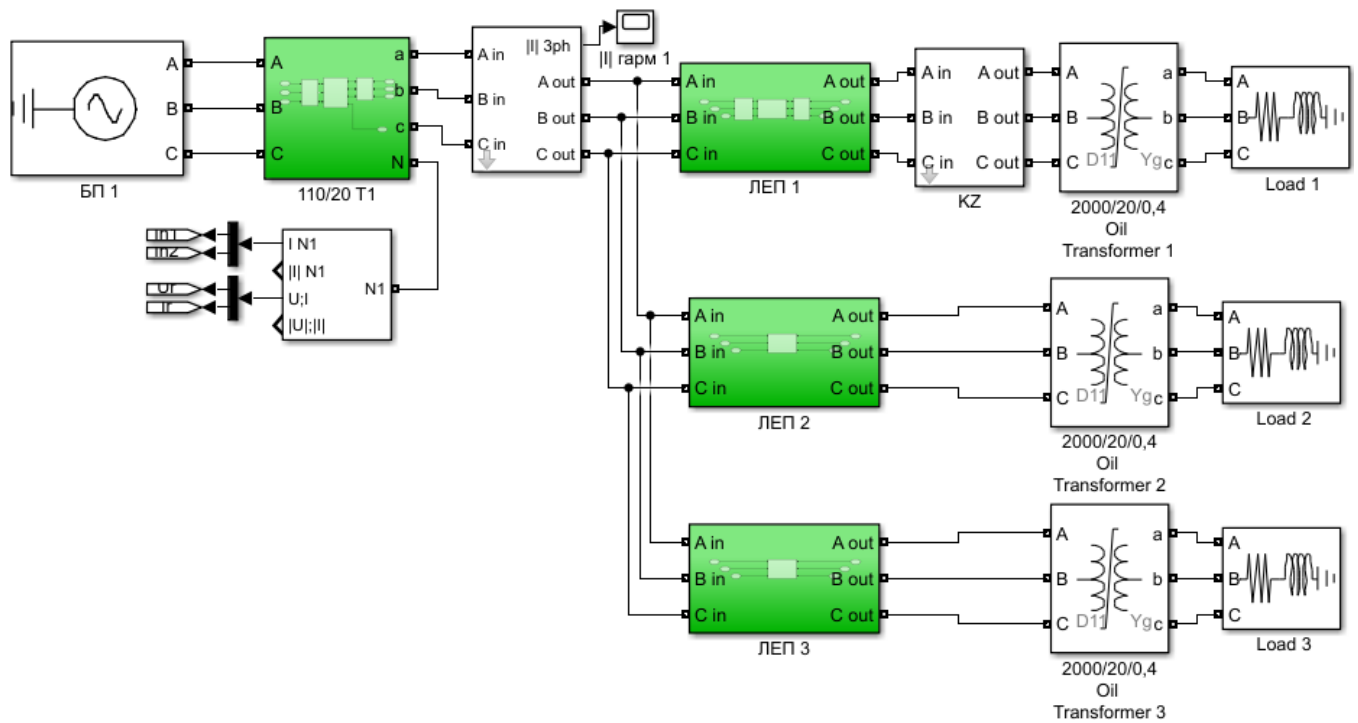


Рис. 2.39 – Модель мережі 20 кВ з резистивно заземленою нейтраллю

Струм КЗ при заземленні нейтралі розподільного трансформатора:

$$I_{K 60 \text{ Ом}}^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 20}{\sqrt{\left(2 \cdot (0,032 + 0,163 \cdot 5) + 0,9 \cdot 0,032 + 0,7 \cdot 5 + 3 \cdot (60 + 0,5)\right)^2 + \left(2 \cdot (0,84 + 0,37 \cdot 5) + 0,9 \cdot 0,84 + 0,061 \cdot 5\right)^2}} = 185,481 \text{ A.}$$

Струм КЗ при заземленні нейтралі через ТЗН

$$I_{K 60 \text{ Ом}}^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{c \text{ ном}}}{\sqrt{\left(2 \cdot (r_{Tp} + r_{150} \cdot L_1) + 3 \cdot r_{ТЗН} + r_{0150} \cdot L_1 + 3 \cdot (r_{рез} + r_g)\right)^2 + \left(2 \cdot (x_{Tp} + x_{150} \cdot L_1) + 2 \cdot x_{ТЗН} + x_{0150} \cdot L_1\right)^2}} =$$

$$= \frac{\sqrt{3} \cdot 20}{\sqrt{\left(2 \cdot (0,032 + 0,163 \cdot 5) + 3 \cdot 2,08 + 0,7 \cdot 5 + 3 \cdot (60 + 0,5)\right)^2 + \left(2 \cdot (0,84 + 0,37 \cdot 5) + 2 \cdot 8,76 + 0,061 \cdot 5\right)^2}} = 178,527 \text{ A.}$$

Виконаємо розрахунок моделі мережі (рис. 2.39) за різних значень опору заземлюючого резистора та способу встановлення резистора, а також наведемо ручний розрахунок для випадку $R_{рез}=60$ Ом. Відповідно до прийнятих спрощень, що струм КЗ протікає від джерела живлення до місця КЗ, навантаження ЛЕП 2 та 3 не враховуються.

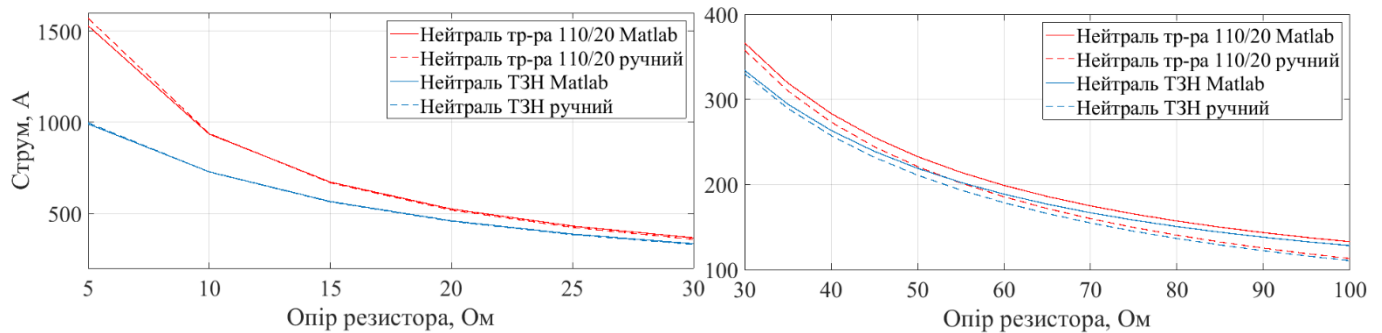


Рис. 2.40 – Середньоквадратичне значення струму КЗ в мережі

Відповідно до рис. 2.40 відхилення розрахованого значення струму КЗ за формулою 2.10 від отриманих значень з моделі мережі є несуттєвим, але помітно що при зростанні опору резистора похибка теж збільшується. Це означає, що починаючи з певної величини опору резистора слід враховувати ємнісні струми мережі. В даному випадку ця величина становить 40-50 Ом.

2.6 Використання низьковольтного заземлюючого резистора

2.6.1 Встановлення у вторинну обмотку однофазного трансформатора

Розглянемо використання низьковольтного резистора встановленого за рис. 1.3.а, г, оскільки використання окремого ТЗН або ФМЗО із додатковим встановленням понижуючого трансформатора в створену нейтраль є недоцільним, як через значне зростання необхідного місця під обладнання, так і витрат на монтаж та експлуатацію.

Чим більше коефіцієнт трансформації однофазного трансформатора встановленого в нейтраль мережі, тим менше значення опору резистора повинно бути. Не складно показати, що опір резистора 10 Ом, встановленого безпосередньо в нейтраль мережі, еквівалентний резистору з опором 0,004 Ом, встановленого на стороні НН однофазного трансформатора 20/0,4:

$$R_{\text{НН}} = R_{\text{ВН}} \cdot \left(\frac{U_{\text{НН}}}{U_{\text{ВН}}} \right)^2 = 10 \cdot \left(\frac{0,4}{20} \right)^2 = 0,004 \text{ Ом} \quad (2.11)$$

При над малих значеннях опору резистора через однофазний трансформатор протікатиме струм порядку декількох кА, що призведе до швидкого старіння та виходу з роботи такого трансформатора, або необхідності виготовляти спеціальний трансформатор із вдосконаленим охолодженням та ізоляцією. Виходячи з цього економічно вигідним є використання трансформаторів з малими коефіцієнтами трансформації, за умови відповідності напруги на нейтралі до паспортних даних такого трансформатора.

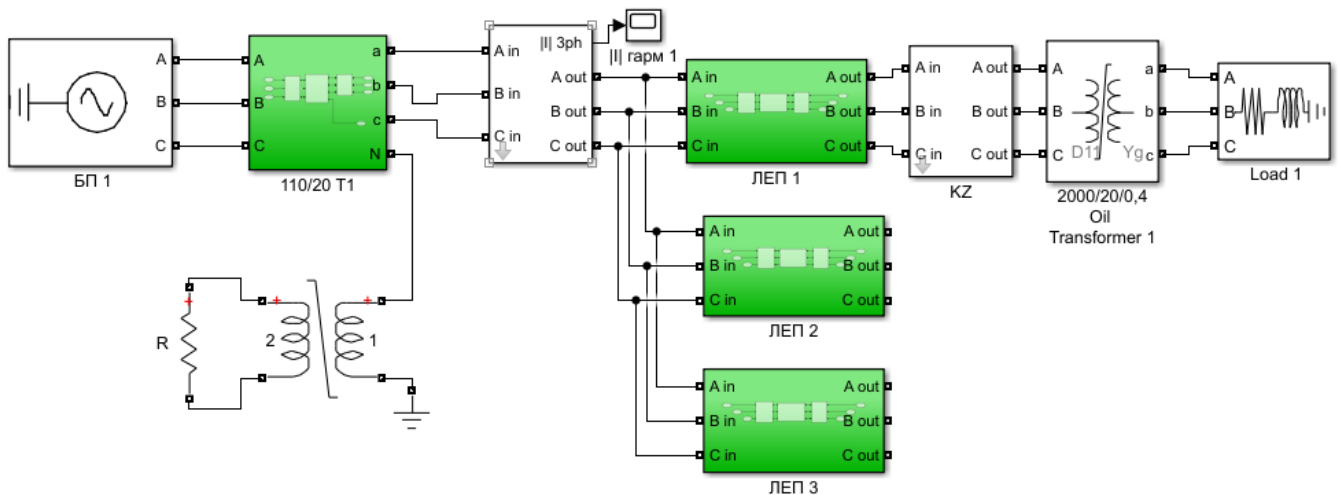


Рис. 2.41 – Модель мережі 20 кВ з низькоомним резистором в нейтралі, приєднаного через однофазний трансформатор

Для довгострокової експлуатації мережі з низькоомним резистором необхідно дві основні вимоги:

- короткотривалий струм через трансформатор не більше за допустимий за умовою термічної стійкості;
- напруга на нейтралі не перевищує величину робочої напруги трансформатора.

Units

Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)]:

Winding 1 parameters [V1(Vrms) R1(pu) L1(pu)]

Winding 2 parameters [V2(Vrms) R2(pu) L2(pu)]

Winding 3 parameters [V3(Vrms) R3(pu) L3(pu)]

Saturation characteristic [i1 phi1; i2 phi2; ...] (pu)

Core loss resistance and initial flux [Rm phi0] or [Rm] (pu)

Рис. 2.42 – Параметри однофазного трансформатора 20/10 кВ

Units

Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)]:

Winding 1 parameters [V1(Vrms) R1(pu) L1(pu)]

Winding 2 parameters [V2(Vrms) R2(pu) L2(pu)]

Winding 3 parameters [V3(Vrms) R3(pu) L3(pu)]

Saturation characteristic [i1 phi1; i2 phi2; ...] (pu)

Core loss resistance and initial flux [Rm phi0] or [Rm] (pu)

Рис. 2.43 – Параметри однофазного трансформатора 20/6 кВ

Виконаємо моделювання мережі наведеної на рис. 2.41 із встановленням в нейтраль однофазних трансформаторів потужністю 2МВА номіналами 20/10 кВ, 20/6 та 10/1 кВ, та номінальною потужністю 2 МВА. Параметри трансформаторів наведено на рис 2.42 – 2.44.

Units	<input type="text" value="pu"/>
Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)]:	<input type="text" value="[2e6 , 50]"/>
Winding 1 parameters [V1(Vrms) R1(pu) L1(pu)]	<input type="text" value="[10000 0.0005 0.03]"/>
Winding 2 parameters [V2(Vrms) R2(pu) L2(pu)]	<input type="text" value="[1000 0.0005 0.03]"/>
Winding 3 parameters [V3(Vrms) R3(pu) L3(pu)]	<input type="text" value="[315e3 0.002 0.08]"/>
Saturation characteristic [i1 phi1; i2 phi2; ...] (pu)	<input type="text" value="[0 0;0.0126 1.15;1 1.24]"/>
Core loss resistance and initial flux [Rm phi0] or [Rm] (pu)	<input type="text" value="800"/>

Рис. 2.44 – Параметри однофазного трансформатора 10/1 кВ

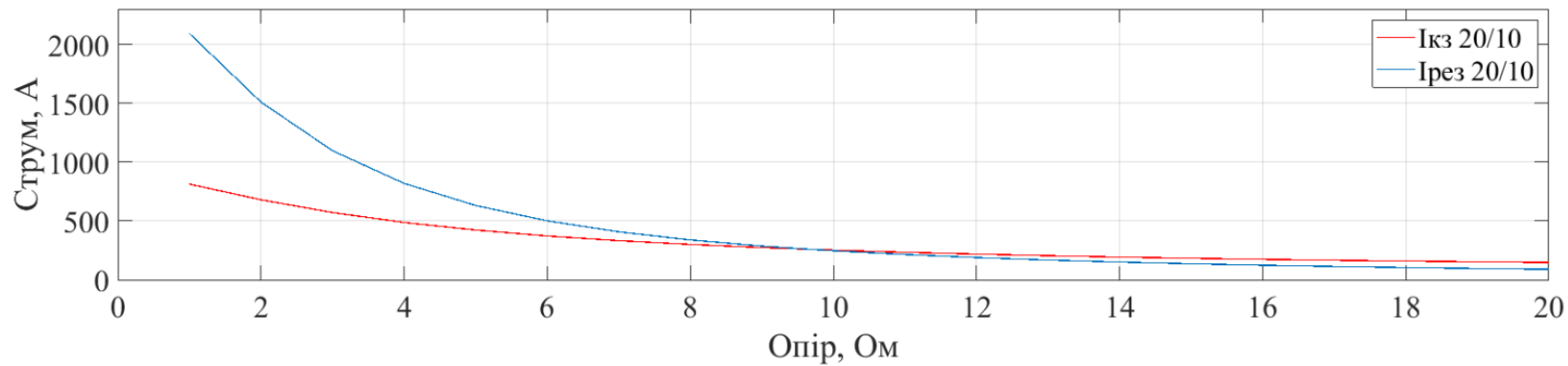


Рис. 2.45 – Струми КЗ та на резисторі при використанні трансформатора 20/10 кВ

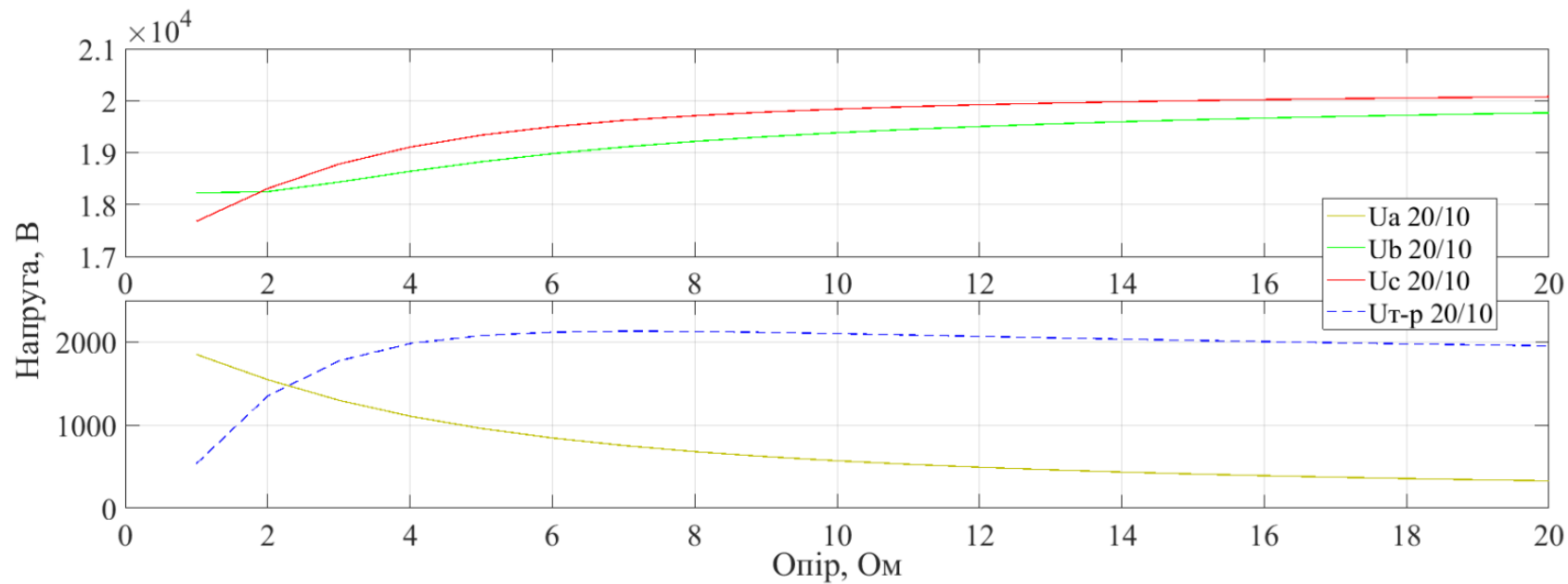


Рис. 2.46 – Напряга в мережі та на стороні ВН трансформатора 20/10 кВ

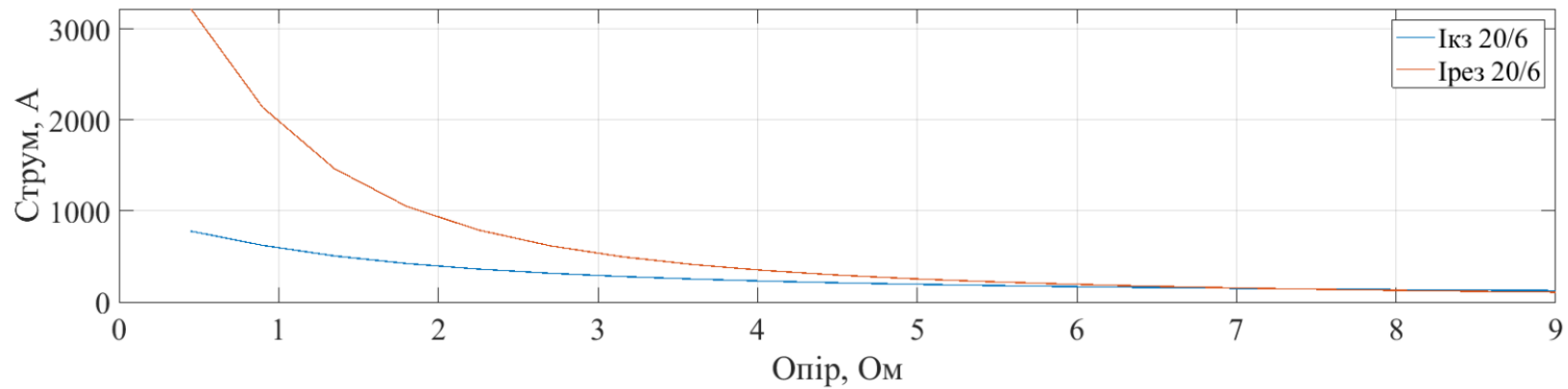


Рис. 2.47 – Струми КЗ та на резисторі при використанні трансформатора 20/6 кВ

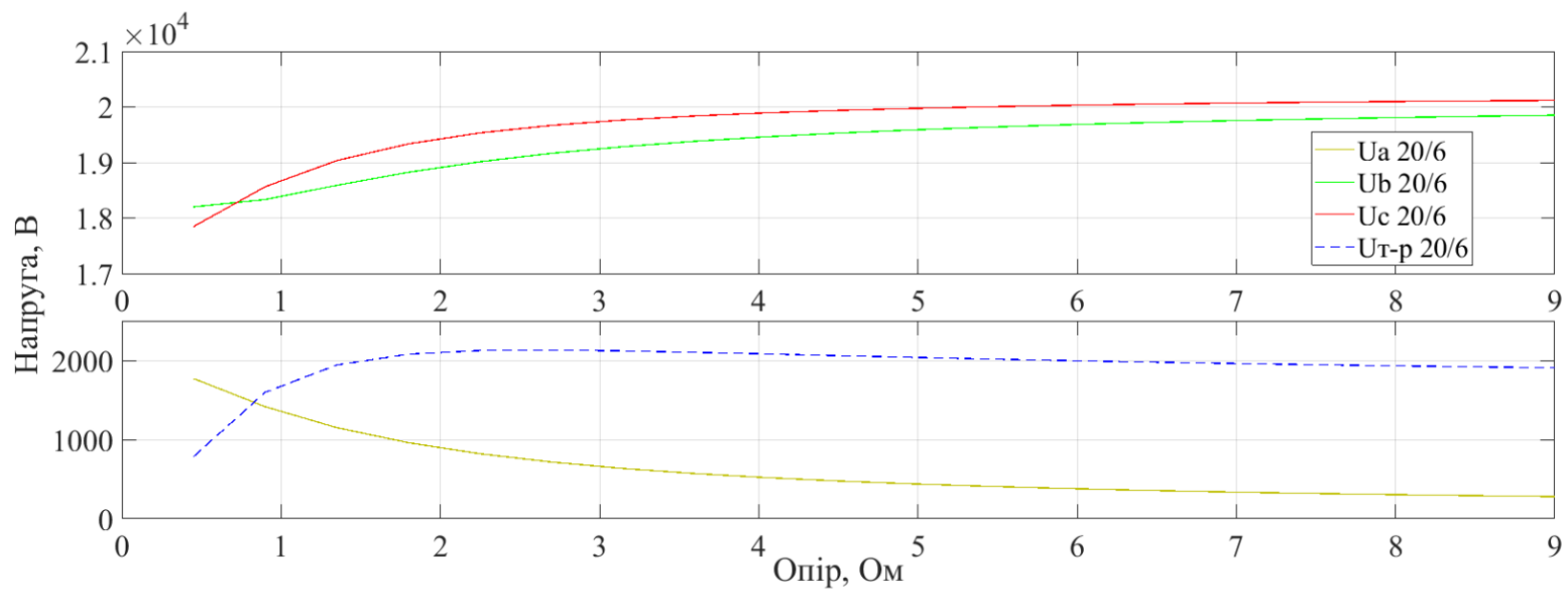


Рис. 2.48 – Напряга в мережі та на стороні ВН трансформатора 20/6 кВ

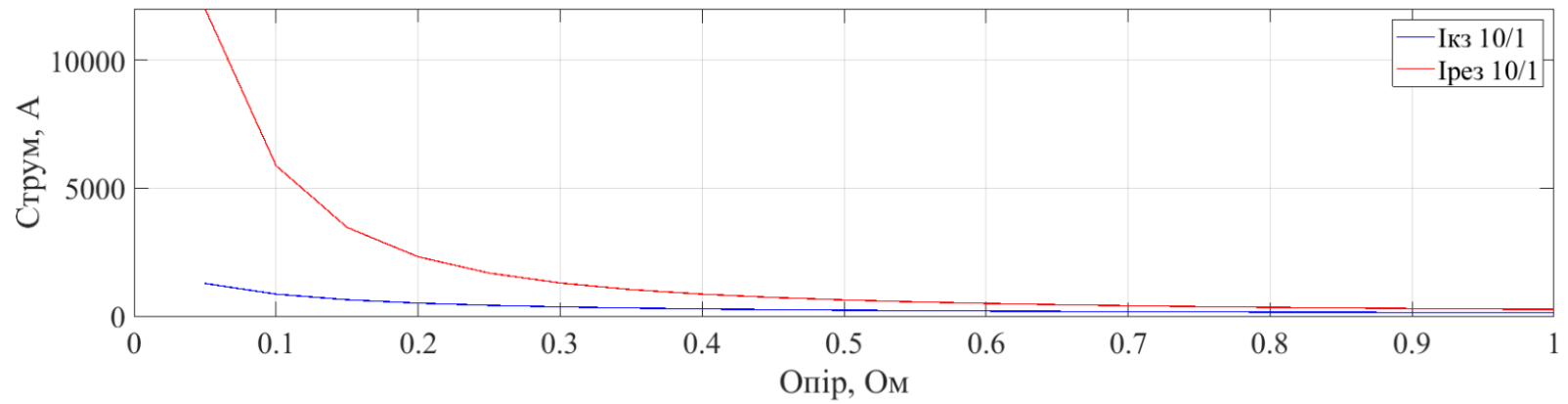


Рис. 2.49 – Струми КЗ та на резисторі при використанні трансформатора 10/1 кВ

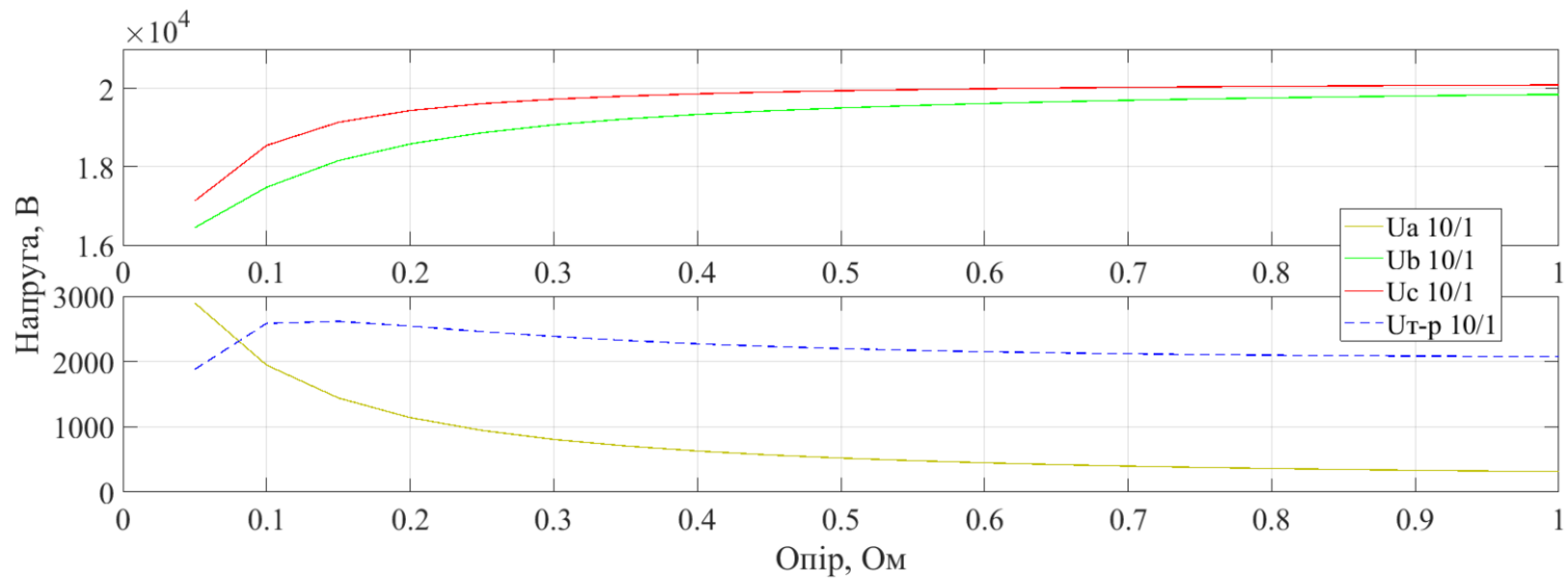


Рис. 2.50 – Напряга в мережі та на стороні ВН трансформатора 10/1 кВ

Виходячи з наведених даних (рис. 2.45 – 2.50) струм по стороні НН однофазного трансформатора перевищує допустимі межі в декілька разів, а струм ОЗЗ складає менш ніж 1кА, що є значно менше ніж при використанні еквівалентного високовольтного резистора опором 5 Ом.

Напряга на нейтралі не більше ніж 3 кВ дозволяє припустити можливість використання однофазних трансформаторів із напругою ВН 6 кВ та менше, але при цьому найбільша можлива напруга вторинної обмотки складає 1 кВ, тобто постає необхідність використовувати резистор номіналом від 0,14 Ом до 3 Ом, що, очевидно призведе до виникнення неприпустимих струмів при КЗ.

Таким чином, використовувати однофазні трансформатори встановлені в нейтраль в мережі 20 кВ є недоцільним, адже струм ОЗЗ може виявитися недостатнім, а в той же час, струм що протікатиме по обмоткам трансформатора в нейтралі є значно вищим за допустимий.

2.6.2 Утворення нейтралі трьома однофазними трансформаторами

Перевіримо можливість використання трьох однофазних трансформаторів для утворення нейтральної точки в мережі (рис. 1.3.г). Використаємо три однофазних трансформатори потужністю 2 МВА кожен.

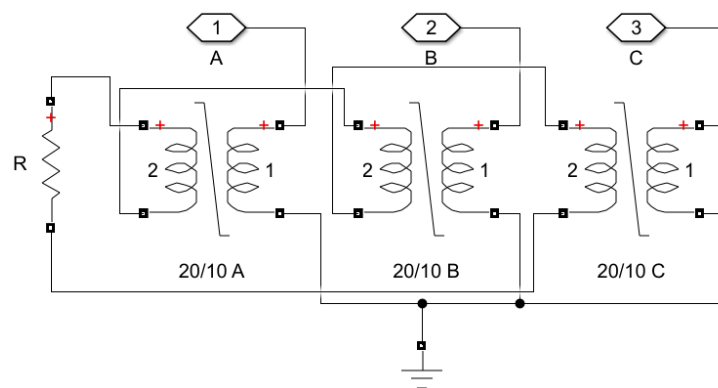


Рис. 2.51 – Утворення нейтралі в мережі за допомогою 3-х однофазних трансформаторів

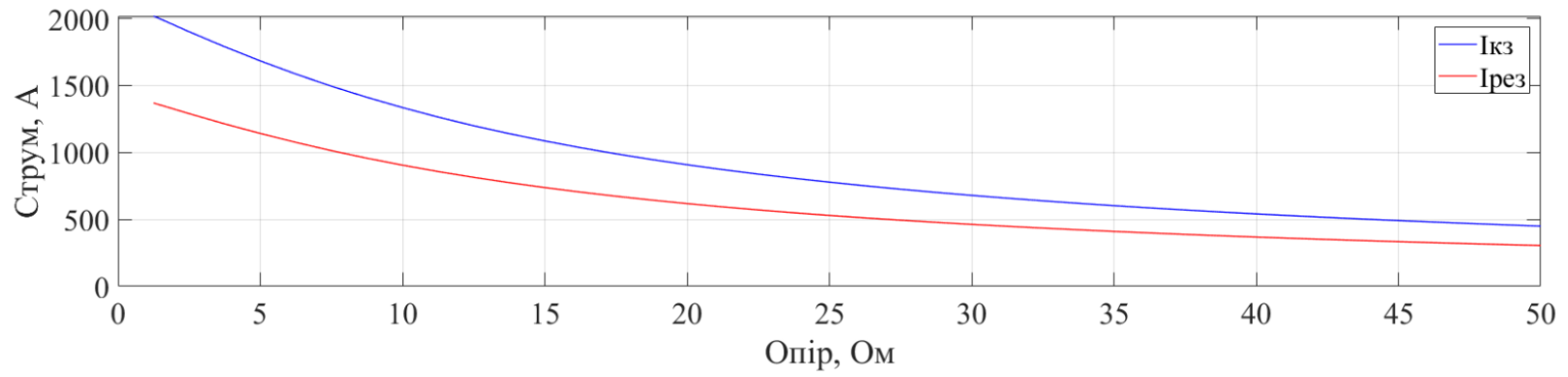


Рис. 2.52 – Струми КЗ та на резисторі при створенні нейтралі через три однофазних трансформатори 20/10 кВ

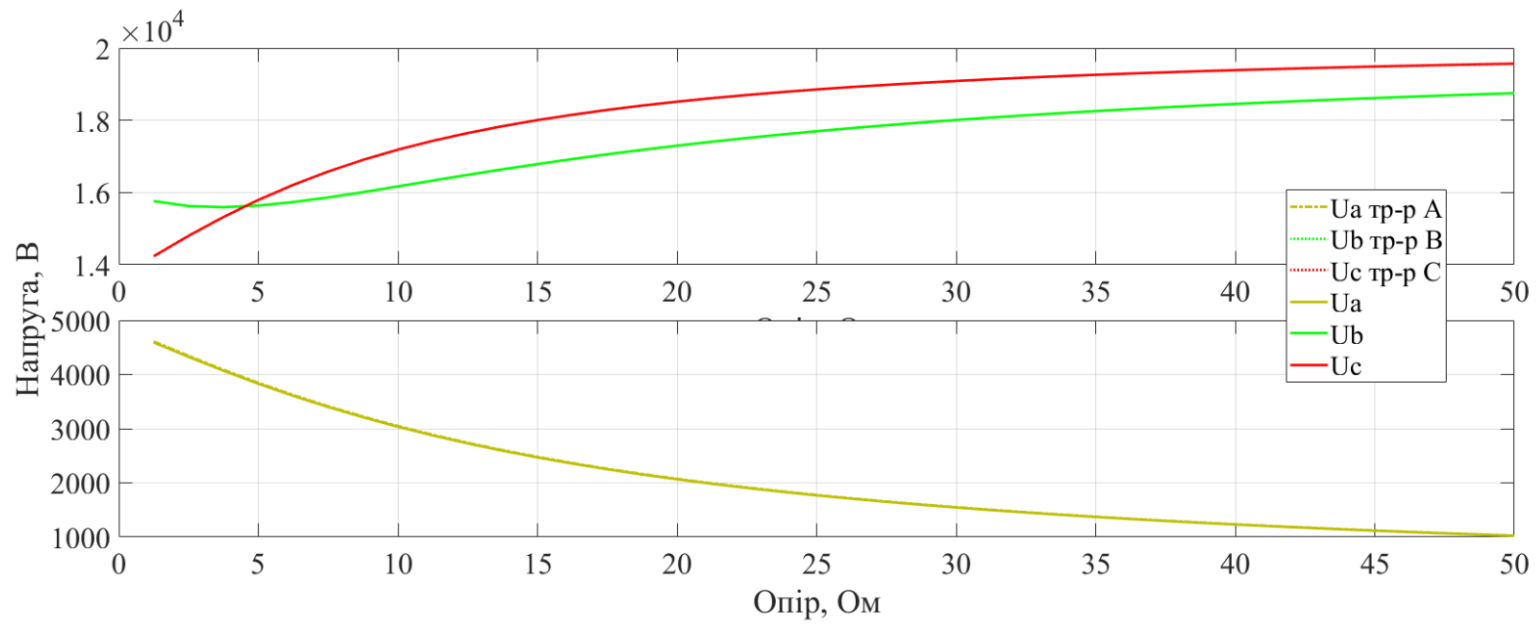


Рис. 2.53 – Напряга в мережі та на стороні ВН однофазних трансформаторів 20/10 кВ

Висновок до розділу 2

Об'єднання нейтралей, які утворені вторинними обмотками розподільних трансформаторів 110/20 кВ – призводить до виникнення електричного зв'язку між окремими частинами мережі. При короткому замиканні в першій мережі – напруга в другій зростає на всіх трьох фазах, що пояснюється розрядом фазних ємностей через спільну нейтраль. Кратність перенапруги становить 1,7, що відповідає режиму роботи мережі з ізолюваною нейтраллю. Струм однофазного короткого замикання та його гармонійні складові суттєво залежать від схеми з'єднання обмоток напругою 110 кВ, через що виникає необхідність ускладнення захистів. Починаючи зі значення опору резистора в 40 Ом гармонійні складові однофазного струму короткого замикання набувають неприйнятних значень. В такому випадку третя та п'ята гармоніки струму вносять суттєві викривлення, що також ускладнює роботу захистів.

Об'єднання заземленої нейтралі через окремий трансформатор також забезпечує утворення електричного зв'язку між суміжними мережами, але кратність перенапруг не перевищує 1,2-1,3. При такому режимі заземлення нейтралі струм однофазного короткого замикання становить 1,5 кА при опорі резистора 5 Ом, як і в випадку утворення нейтралі вторинною обмоткою розподільного трансформатора. Основним питанням є доцільність використання такого рішення, адже вартість окремого трансформатора заземлення суттєво перевищує вартість резистора (приблизно в 3 рази), а можливі збитки від погіршення якості електричної енергії нівелюють економію.

Експлуатація мережі з роздільною резистивно заземленою нейтраллю, що утворена вторинною обмоткою розподільного трансформатора або окремим трансформатором заземлення нейтралі, характеризується відсутністю електричного зв'язку між частинами мережі. Так відбувається, бо опір заземлюючого контуру підстанції суттєво менше за опір резистора та реактивний опір обмоток трансформаторів в нейтраль котрих він встановлюється.

Роздільна резистивно заземлена нейтраль забезпечує значення однофазного струму короткого замикання на рівні 1,5 кА при опорі резистора 5 Ом та 1 кА при опорі резистора 10 Ом, за відсутності перенапруги в мережі.

Використання одного однофазного трансформатора для встановлення низьковольтного резистора є не ефективним. Таке рішення не забезпечує необхідний рівень струму КЗ в мережі, а в той же час призводить до протікання значних струмів через сам трансформатор та резистор. Очевидно, що забезпечення необхідної діелектричної міцності резистора економічно вигідніше, ніж забезпечення його термічної стійкості.

Створення нейтралі через три однофазні трансформатори забезпечує прийнятний струм КЗ, але залишається питання термічної стійкості резистора та трансформаторів в момент короткого замикання.

Окремо питання використання однофазних трансформаторів необхідно розглядати з економічної точки зору, адже вартість трьох однофазних трансформаторів вище в 1,5 рази за вартість одного трьох фазного, без врахування вартості резистора.

3 ЧУТЛИВІСТЬ РОБОТИ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ОПОРУ РЕЗИСТОРА

Як було показано в попередньому розділі, від опору резистора залежить струм однофазного короткого замикання. Величина цього струму безпосередньо впливає на види релейних захистів, а також їх максимальну кількість. Чим більше значення струму протікатиме по лінії електропередавання – тим вища селективність пристроїв РЗА. З іншого боку, кількість енергії що виділяється на провіднику має квадратичну залежність від величини струму, що зумовлює необхідність максимального обмеження струмів КЗ. Оптимальним буде така величина опору резистора, за якої досягається достатня чутливість пристроїв РЗА за найменшого струму КЗ.

Мережі напругою 20 кВ проектується за зустрічною двопроменевою розімкнено-кільцевою схемою [11], рис. 3.1. В нормальному режимі роботи найбільш віддаленою точкою КЗ є лінія, що відходить від РП2 або РП5, тоді кількість пристроїв РЗА в каскаді складає три одиниці, не враховуючи захист трансформатора 20/0,4.

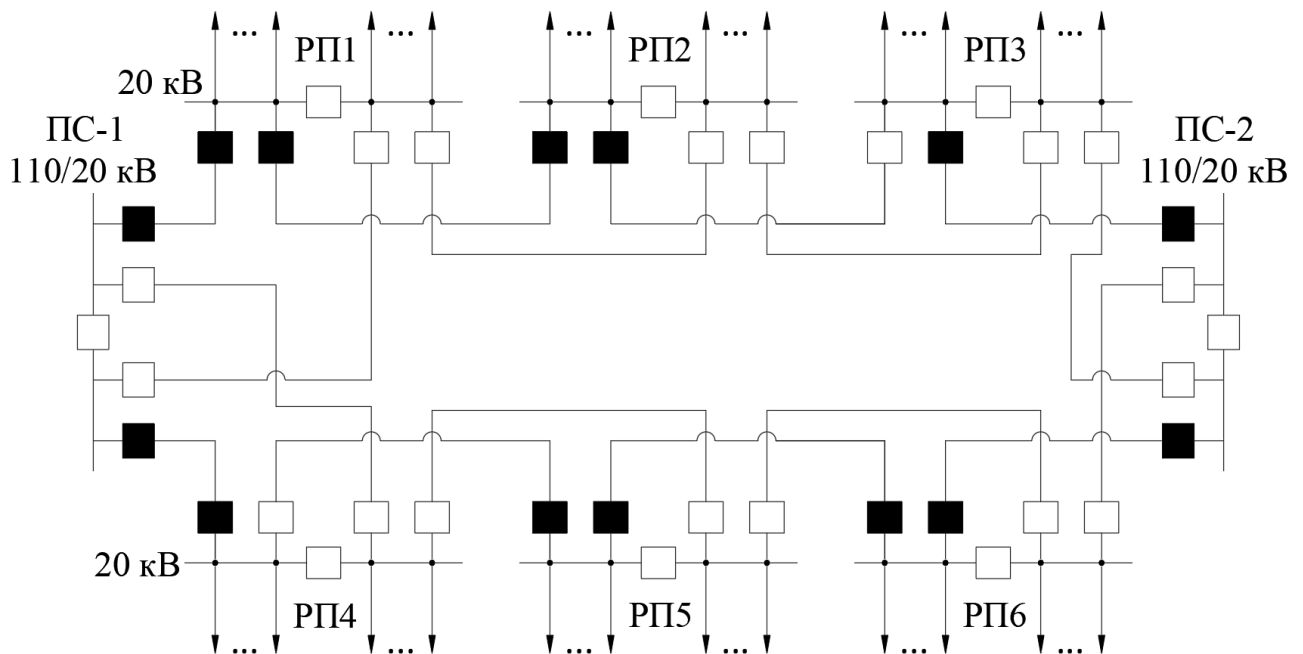


Рис. 3.1 – Зустрічна двопроменева розімкнено-кільцева
схема розподільної мережі 20 кВ

Найбільш віддаленою точкою КЗ за умови втрати живлення зі сторони однієї ПС, наприклад ПС-2, є кінець лінії, що виходить з РПЗ або РП6. В цьому випадку кількість пристроїв РЗА в каскаді складає чотири одиниці, не враховуючи захист трансформатора 20/0,4 кВ. Фрагмент мережі для розрахунку струму КЗ в найвіддаленішій точці наведено на рис. 3.2.

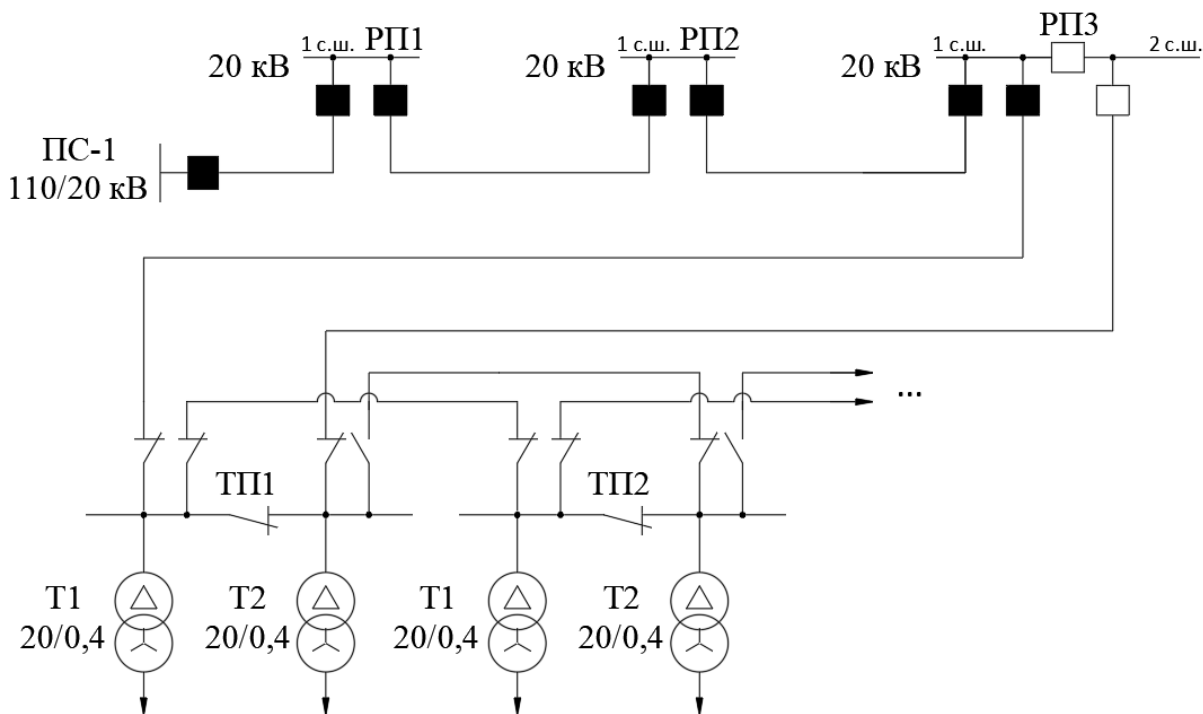


Рис. 3.2 – Фрагмент розподільної мережі 20 кВ

Кількість та потужність ТП може варіюватися у широких межах, як і спосіб захисту трансформаторів. Виконано розрахунок випадку для двох ТП, а потужність кожного трансформатора – 2 МВА. Тоді сумарне навантаження лінії, що відходить від РПЗ до ТП1 складе 8 МВА, лінії РП1 – РП2 – 16 МВА, а потужність, що видається в мережу складе 24 МВА. Обрано кабель перетином 1000 мм², максимальний струм навантаження якого, при прокладці в трикутнику, становить 820 А. Оскільки розрахунок носить теоретичний характер, то всі поправкові коефіцієнти прийнято рівними одиниці. Аналогічно обрано кабель від РПЗ до ТП1, його перетин складе 120 мм².

Максимальна допустима довжина кабельних ліній визначається за формулою 3.1, за умови, що падіння напруги не перевищує 5%.

$$\Delta U(l) = \frac{1}{U_{\text{НОМ}}} \cdot \sqrt{3} \cdot I_{\text{НАВ}} \cdot (r_{\text{ЛЕП}} \cdot \cos(\varphi) + x_{\text{ЛЕП}} \cdot \sin(\varphi)) \cdot l, \quad (3.1)$$

де $U_{\text{НОМ}}$ – номінальна напруга мережі, кВ; $I_{\text{НАВ}}$ – струм навантаження ЛЕП, А; $r_{\text{ЛЕП}}$, $x_{\text{ЛЕП}}$ – активний та реактивний погонний опір ЛЕП, Ом/км; φ – кут навантаження, град; l – довжина ЛЕП, км.

Для кабелів, параметри яких наведено в табл. 3.1, максимальні довжини складають 5,815 км для перерізу 120 мм² та 8,876 для перерізу 1000 мм², за умови передавання максимального допустимого струму. Прийнято відповідні довжини ліній: l_1 – 1 км, l_2 – 2 км, l_3 – 3 км, а ліній l_4 та l_5 – 1,5 км.

Таблиця 3.1 – Параметри силових кабелів 20 кВ

Назва кабелю	r_1 Ом/км	r_0 Ом/км	x_1 мГн/км	x_0 мГн/км	c_g мкФ/км	c_1 мкФ/км	c_0 мкФ/км
XRUNAКXS-20 (1x1000/50)	0,046	0,48	0,28	117,775	0,54	1,08	0,54
XRUNAКXS-20 (1x120/50)	0,328	0,76	0,39	213,268	0,23	0,46	0,23

Таблиця 3.2 – Параметри силових трансформаторів

Nominal power, VA	Frequency, Hz	Winding 1 parameters			Winding 2 parameters			Magnetization resistance, pu	Inductance L0 of zero-sequence flux path return, pu	Saturation characteristic, pu
		V1 Ph-Ph, Vrms	R1, pu	L1, pu	V2 Ph-Ph, Vrms	R2, pu	L2, pu			
25e6	50	1,1e5	0,0021	0,0525	2e4	0,0021	0,0525	1101,322	473,541	(0;0), (0,0073;1,15), (1;1,308)
2e6		2e4	0,0043	0,0221	400	0,0043	0,0221	1030,928	506,664	(0;0), (0,0068;1,15), (1;1,218)

Виконано моделювання мережі за умови ідеального джерела живлення при $\cos(\varphi)=0,9$ для навантаження, відповідно до рис. 3.5.

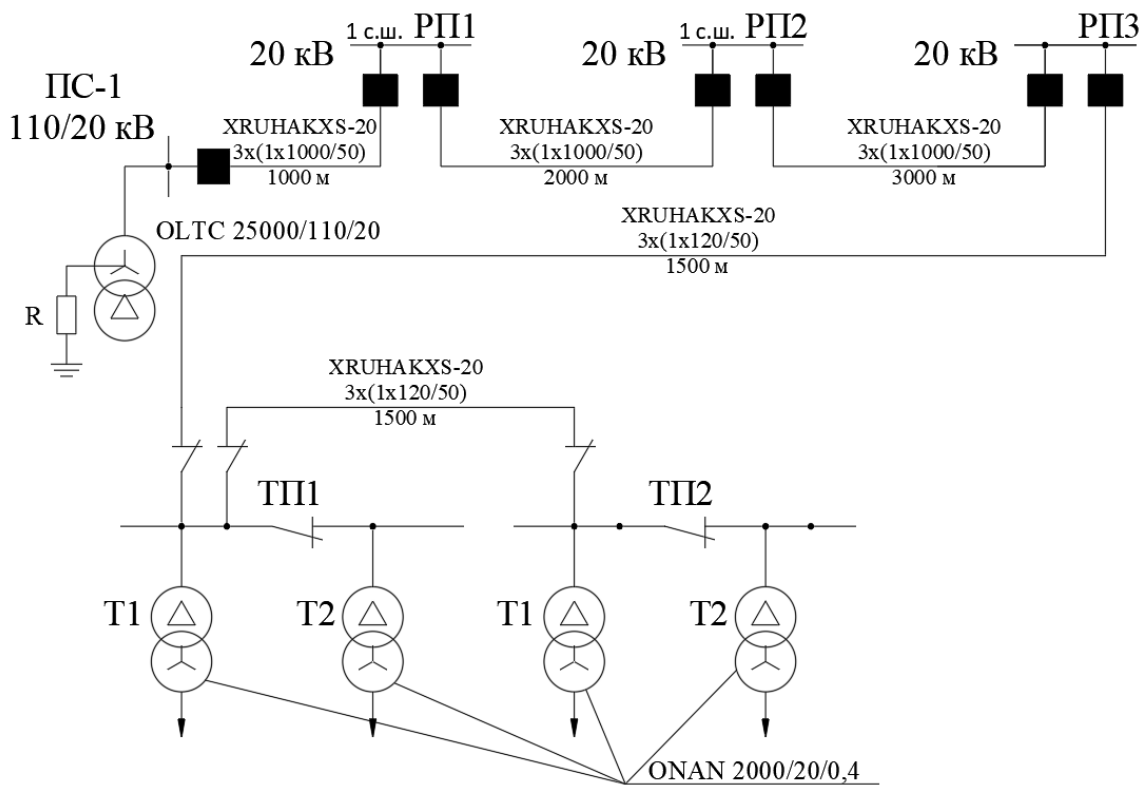


Рис. 3.3 – Фрагмент розподільної мережі 20 кВ

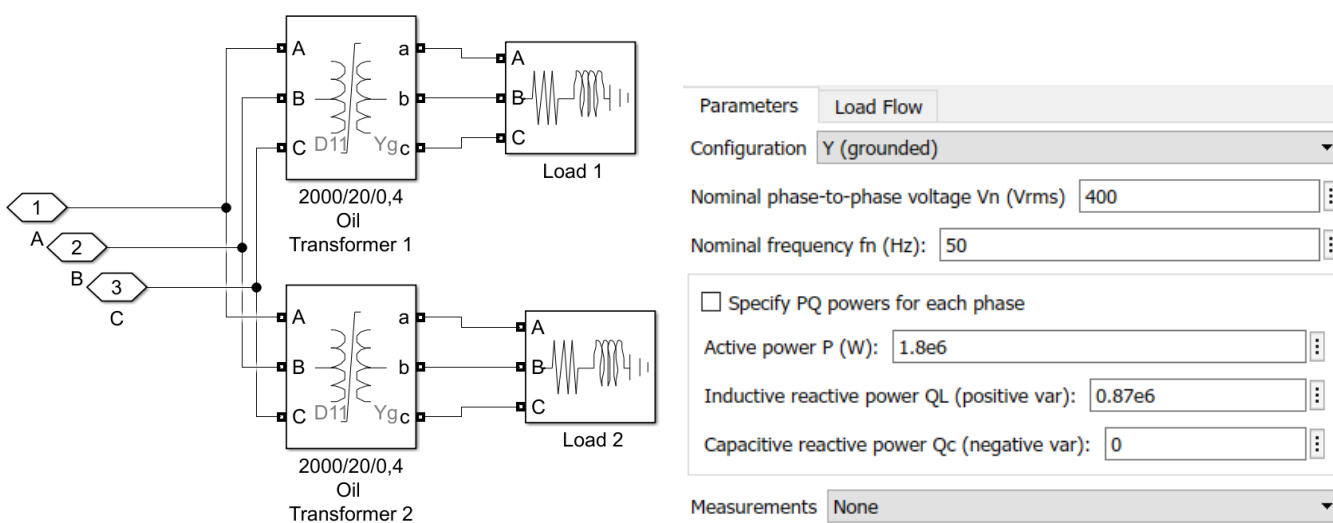


Рис. 3.4 – Моделювання навантаження по стороні 0,4 кВ

Визначено струми однофазного та трифазного КЗ для розрахунку уставок РЗА. Струм однофазного КЗ є мінімальним струмом, за яким перевіряється чутливість захисту, а трифазний використовується для перевірки обладнання на термічну стійкість, а також розрахунку СВ.

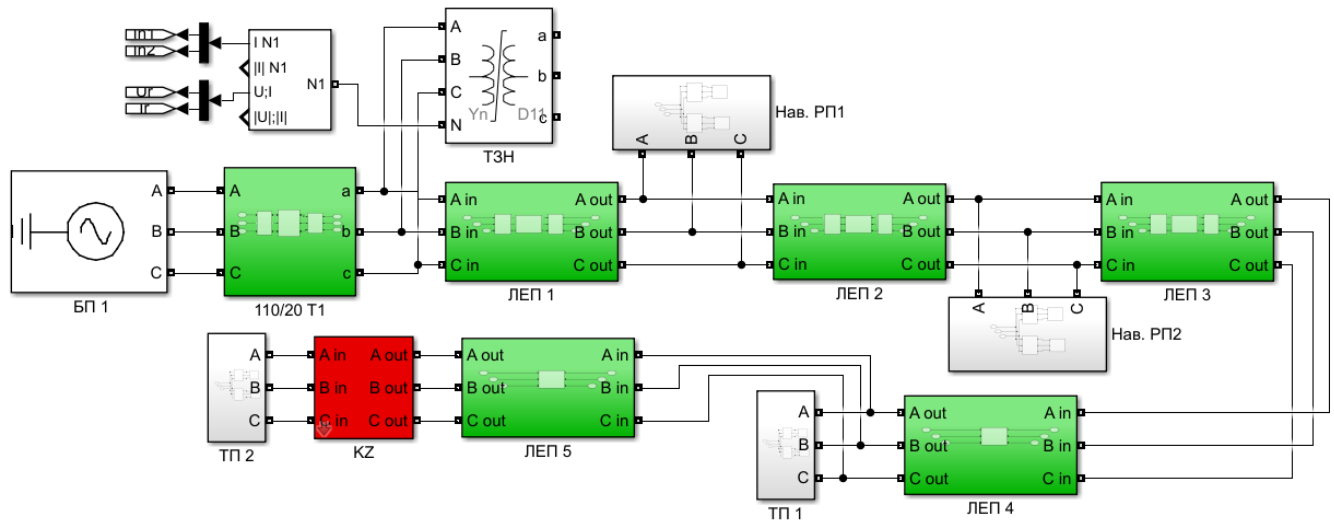


Рис. 3.5 – Модель розподільної мережі 20 кВ

Таблиця 3.3 – Результати розрахунку струму КЗ при опорі резистора – 5, 10 та 15 Ом

Місце КЗ	$I_{K^{(3)}}$, А	$I_{K^{(2)}}$, А	$I_{K^{(1)}}$ ($R=5$ Ом), А	$I_{K^{(1)}}$ ($R=10$ Ом), А	$I_{K^{(1)}}$ ($R=12$ Ом), А	$I_{K^{(1)}}$ ($R=15$ Ом), А
За трансформа- тором 110/20 кВ	6900	5950	1560,4	969,88	866,7	691,9
В кінці ЛЕП 1	6520	5647	1520,6	954	855,3	684
В кінці ЛЕП 2	5886,75	5098,8	1417,6	905,6	815,7	655,3
В кінці ЛЕП 3	5604	4854	1351,7	870,61	785	632,88
В кінці ЛЕП 4	4836	4188,6	1247,5	824	746,4	608
В кінці ЛЕП 5	4129	3576,5	1139	769,46	699,8	575
НН на ТП 2	17912,8	15513	17980	17980	17980	17980
	(0,4 кВ)	(0,4 кВ)	(0,4 кВ)	(0,4 кВ)	(0,4 кВ)	(0,4 кВ)
	358,3 (20 кВ)	310,3 (20 кВ)	359,6 (20 кВ)	359,6 (20 кВ)	359,6 (20 кВ)	359,6 (20 кВ)

Таблиця 3.4 – Струми навантаження в елементах мережі

Елемент мережі	ЛЕП 1	ЛЕП 2	ЛЕП 3(ЛЕП 4)	ЛЕП 5	Т 20/0,4 кВ
Струм, А	626, 3	414,4	205,5	103,3	52,2

Розрахунок струмової відсічки для захисту трансформатора 20/0,4 кВ:

$$I_{\text{СВ}} = k_{\text{відл}} \cdot I_{\text{КЗмакс}}^{(3)} = 1,3 \cdot 358,3 = 465,79 \text{ А.}$$

Прийнято трансформатори струму (ТС) номіналом 75/5 А, коефіцієнт трансформації яких становить 15. Тоді струм у вторинній обмотці ТС становитиме:

$$I_{\text{СВ нн}} = \frac{I_{\text{СВ}}}{15} = \frac{465,79}{15} = 31,05 \text{ А.}$$

Вторинний струм спрацювання захисту буде 31,1 А, а первинний – 466,5 А.

Коефіцієнт чутливості становитиме:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{КЗмин}}^{(2)}}{I_{\text{СВ}}} = \frac{3576,5}{466,6} = 7,6.$$

Для розрахунку уставок пристроїв РЗА створено програму мовою Matlab:

```
function [Output] = MCP(I_load,I_prot,t_prot,I_SC,K_reliability,K_SelfStart,K_re-
turn,K_sch,K_CT)
```

```
% Розрахунок максимального струмового захисту
% I_load - струм навантаження;
% I_prot - струм захистів, що розташовано "нижче";
% t_prot - час спрацювання захисту "нижче";
% I_SC - мінімальний струм КЗ в кінці захищ. ділянки;
% K_reliability - коеф. надійності;
```

```

% K_SelfStart - коеф. самозапуску навантаження (1,1 за відсутності ел.
двигунів);
% K_return - коеф повернення струмового органу захисту;
% K_sch - коеф. схеми з'єднання тр-рів струму (1 для зірки);
% K_CT - коефіцієнт тр-ції струму.
% Коефіцієнт відлаштування:
K_acc=K_reliability*K_SelfStart/K_return;
% Струм спрацювання за умов відлаштування від макс. режиму:
I_st_c_11 = K_acc*I_load;
% Струм спрацювання за умов відлаштування від захистів:
I_st_c_12 = K_acc*I_prot;
if I_st_c_11<I_st_c_12
    I_st_c_1=I_st_c_12;
else
    I_st_c_1=I_st_c_11;
end
% Струм, що протікатиме по вторинній обмотці тр-ра струму:
I_st_c_2 = I_st_c_1*K_sch/K_CT;
% Уставка реле струму (НН):
I_st_c=ceil(I_st_c_2);
% Первинний струм спрацювання захисту:
I_rel_st=I_st_c*K_CT/K_sch;
% Час спрацювання МСЗ:
t_mcp=t_prot+0.2;
% Коефіцієнт чутливості
K_sens=I_SC/I_rel_st;
if K_sens <=1.5
    disp('Недостатня чутливість, не використовувати');
end
[Output]=[K_acc,I_st_c_11,I_st_c_12,I_st_c_2,I_st_c,I_rel_st,t_mcp,K_sens];
End

```

Уставка струму максимального струмового захисту для трансформаторів 20/0,4 кВ буде однаковою. Використання програми потребує вводу наступних вхідних даних:

- $I_{load} = 52,2$ – струм навантаження по стороні ВН;
- $I_{prot} = 0$ – уставка нижче розміщених захистів (захисти ліній по стороні 0,4 кВ

не враховано);

- $t_{prot} = 0$;

- $I_{SC} = I_k^{(2)} = 310,3$ А;

- $K_{reliability} = 1,2$;
- $K_{SelfStart} = 1,1$;
- $K_{return} = 0,99$;
- $K_{sch} = 1$;
- $K_{CT} = 15$.

Таблиця 3.5 – Результати розрахунку максимальних струмових захистів

Ділянка, що захищається	Коефіцієнт відлаштування	Струм відлаштування від навантаження, А	Струм відлаштування від захистів, А	Струм у вторинній обмотці ТС, А	Уставка реле струму, А	Первинний струм спрацювання захистів	Час спрацювання МСЗ, с	Коефіцієнт чутливості
Т 20/0,4	1,33	69,69	0	4,64	5	75	0,2	4,137
Опір заземлюючого резистора 5 Ом								
ЛЕП 5	1,33	137,73	100	4,59	5	150	0,4	7,6
ЛЕП 4		274	200	4,57	5	300	0,6	4,16
ЛЕП 3		274	400	6,67	7	420	0,8	3,22
ЛЕП 2		552,53	560	5,5	6	600	1	2,36
ЛЕП 1		835,07	800	5,57	6	900	1,2	1,69
Опір заземлюючого резистора 10 Ом								
ЛЕП 5	1,33	137,73	100	4,59	5	150	0,4	6,466
ЛЕП 4		274	200	4,57	5	300	0,6	2,75
ЛЕП 3		274	400	6,67	7	420	0,8	2,08
ЛЕП 2		552,53	560	5,5	6	600	1	1,51
ЛЕП 1		835,07	800	5,57	6	900	1,2	1,1
Опір заземлюючого резистора 12 Ом								
ЛЕП 5	1,33	137,73	100	4,59	5	150	0,4	4,67
ЛЕП 4		274	200	4,57	5	300	0,6	2,45
ЛЕП 3		274	400	6,67	7	420	0,8	1,87
ЛЕП 2		552,53	560	5,5	6	600	1	1,36
ЛЕП 1		835,07	800	5,57	6	900	1,2	0,95
Опір заземлюючого резистора 15 Ом								
ЛЕП 5	1,33	137,73	100	4,59	5	150	0,4	3,8
ЛЕП 4		274	200	4,57	5	300	0,6	2,03
ЛЕП 3		274	400	6,67	7	420	0,8	1,51
ЛЕП 2		552,53	560	5,5	6	600	1	1,1
ЛЕП 1		835,07	800	5,57	6	900	1,2	0,76

Результати розрахунків МСЗ свідчать, що при опорі резистора 15 Ом коефіцієнт чутливості захистів, що знаходяться на початку 1-ї та 2-ї ЛЕП, не відповідає вимогам. Рішенням цього є використання захистів по струмах нульової послідовності з розташуванням ТСНП в нейтралі мережі 20 кВ або зменшення коефіцієнту надійності та застосування уставок з дробовими складовими (наприклад 5,5 А по вторинній обмотці).

Висновок до розділу 3

Для максимально тяжкого режиму електричної мережі при односторонньому живленні (лише одна підстанція 110/20 кВ) та потужності трансформаторів на підстанціях 20/0,4 кВ в 2 МВА при трьох розподільних пунктах на одну гілку та загальною потужністю навантаження в мережі в 24 МВА, оцінено вибір уставок максимального струмового захисту пристроїв релейного захисту.

Струми однофазного короткого замикання становлять:

- 1,5 кА при опорі резистора 5 Ом;
- 970 А при опорі резистора 10 Ом;
- 692 А при опорі резистора 15 Ом.

В прийнятій до розгляду мережі із суттєвим навантаженням довжиною ліній електропередавання, з огляду на ефективність роботи максимального струмового захисту, оптимальним є використання резистора номіналом в 10 Ом. В цьому разі струм однофазного короткого замикання не перевищує 1 кА.

В реальних електричних мережах намагаються уникати значних струмів навантаження по одній лінії, адже зазвичай це обумовлюється зростанням кількості споживачів, що погіршує загальну надійність електропостачання. Однак, навіть за розглянутого випадку резистор опором 10 Ом є достатнім для селективної роботи 4-х послідовно встановлених пристроїв захисту, тобто з використанням не більше трьох розподільчих пунктів на одну гілку мережі.

Для мереж, які мають невелику протяжність або малі струми навантаження, можливо використовувати резистивне заземлення нейтралі з опором резистора 15 Ом, оскільки в даному випадку забезпечується надійна робота принаймні трьох послідовних пристроїв захисту, тобто гілки з двома розподільними пунктами.

ВИСНОВКИ

Визначено оптимальний спосіб встановлення резистора в нейтраль розподільної мережі середньої напруги. Резистор необхідно встановлювати в окрему нейтраль мережі, утворену через трансформатор заземлення нейтралі або фільтр приєднання нульової послідовності. В цьому разі відсутній електричний зв'язок із суміжною розподільною мережею, забезпечується прийнятний рівень перенапруги, а також практично відсутні гармонійні складові в струмі однофазного короткого замикання.

Експериментально встановлено, що об'єднання нейтралей мережі призводить до виникнення електричного зв'язку між суміжними частинами мережі, що обумовлює виникнення перенапруги в цілій частині електричної мережі при однофазному короткому замиканні в суміжній частині. Також, на величину однофазного струму замикання на землю впливає схема з'єднання обмоток розподільного трансформатора, в нейтраль вторинної обмотки котрого встановлено резистор.

Встановлено, що величина опору резистора не має перевищувати 15 Ом за умовою забезпечення чутливості струмових захистів. При опорі резистора в 10 Ом гарантована селективна робота чотирьох пристроїв релейного захисту розміщених у каскаді, а при опорі в 15 Ом – трьох пристроїв.

Запропоновано підхід до розрахунку струмів однофазного короткого замикання, суть якого полягає у врахуванні опору резистора при розрахунку нульової послідовності несиметричного струму короткого замикання. Ємнісний струм мережі можна не враховувати при проведенні розрахунків для резистора з опором менше 50 Ом.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Шабад М.А. Обзор режимов заземления нейтрали и защиты от замыканий на землю в сетях 6 -35 кВ России. Москва : «Энергетик», 1998. №12, С. 11-13.
2. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Міненерговугілля України. Х. : Видавництво «Форт», 2017. 760 с.
3. Michael O'Brien. Neutral Earthing Resistors Or Reactors: application guide. Trentham, Upper Hutt: NZCCPTS, 2010. Issue 3, 98 p.
4. Short T. A. Electric power distribution handbook: the electric power engineering series. Washington, D.C.: CRC Press LLC, 2004. 762 p.
5. Walid N. Grounding systems. Grounding.Doc, 2009. 18 p.
6. Методичні рекомендації щодо заземлення нейтралі електричних мереж 6-35 кВ через резистор. Київ: Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2018. 87 с.
7. ГОСТ 27514-87. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. [Действующий с 1987-12-14]. Москва, 1989. 40 с.
8. Силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжения: 6/10; 8,7/15; 12/20 И 20/35 кВ. Київ: ЗАО «ТФ Кабель», 2005. 44 с.
9. Новаш И.В., Румянцев Ю.В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки matlab-simulink с учетом насыщения магнитопровода. Белорусский национальный технический университет, РУП «Белэнергосетьпроект», 2014. 13 с.
10. Расчет токов коротких замыканий и замыканий на землю в распределительных сетях: методические указания. Санкт-Петербург: ООО «НТЦ» «Механотроника», 2017. 40 с.
11. Шабад М. А. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ: приложение к журналу «Энергетик». Москва: НТФ «Энергопрогресс», 2007. 64 с.

12. В.В.Кирик, Б.В. Циганенко, О.С. Яндутьський. Розподільні електричні мережі напругою 20 кВ та ефективність їх роботи: монографія. Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2018. 233 с.

13. Релейная защита распределительных сетей 6-10 кВ. Расчет уставок: методические указания. Санкт-Петербург: ООО «НТЦ» «Механотроника», 2017. 68 с.