

Центральноукраїнський національний технічний університет
Центр заочної та дистанційної освіти
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
“ ____ ” _____2021р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему
“ Моніторинг несиметричних режимів роботи
електричних мереж та розробка методів і заходів
зниження несиметрії напруги ”

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-20МЗ
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Подвишецький А.І.
« ____ » _____2021р.
Керівник роботи
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
« ____ » _____2021р.
Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет ЦЗДО

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.

«_____» _____ 2021 р.

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

Подвишецького Андрія Ігоровича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Моніторинг несиметричних режимів роботи
електричних мереж та розробка методів і заходів зниження несиметрії
напруги.

Monitoring of asymmetric modes of operation of electrical networks and
development of methods and measures to reduce voltage asymmetry

2. Керівник роботи (проекту)

Плешков Петро Григорович, к.т.н., професор

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 3.12.2021 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Вступ; Загальні відомості про несиметричні режими; Вплив несиметрії на
роботу електрообладнання; Методи і засоби вимірювання несиметрії в СЕП.
Методи розрахунку несиметричних режимів; Методи і засоби зниження
несиметрії; Участь суб'єктів розподілу електричної енергії в порушенні
симетрії; Розрахунок економічної ефективності встановлення
симетрувальних пристроїв; Охорона праці; Висновки; Список використаних
джерел

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Економічна частина</i>	<i>к.е.н., доц. Журило І.В.</i>		
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	4.10.21	
2	<i>Загальні відомості про несиметричні режими</i>	9.11.21	
3	<i>Вплив несиметрії на роботу електрообладнання</i>	14.10.21	
4	<i>Методи і засоби вимірювання несиметрії в СЕП. Методи розрахунку несиметричних режимів</i>	21.10.21	
5	<i>Методи і засоби зниження несиметрії;</i>	28.10.21	
6	<i>Участь суб'єктів розподілу електричної енергії в порушенні симетрії</i>	5.11.21	
7	<i>Розрахунок економічної ефективності встановлення симетрувальних пристроїв;</i>	15.11.21	
8	<i>Охорона праці</i>	21.11.21	
9	<i>Висновки</i>		
10	<i>Оформлення пояснювальної записки ВКР</i>	25.11.21	
11	<i>Оформлення презентаційної частини ВКР</i>	29.11.21	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2021 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2021 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Подвишецький А.І. Моніторинг несиметричних режимів роботи електричних мереж та розробка методів і заходів зниження несиметрії напруги. *Monitoring of asymmetric modes of operation of electrical networks and development of methods and measures to reduce voltage asymmetry.*

Спеціальність 141 - «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». - ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». - Центральноукраїнський національний технічний університет. - м.Кропивницький, 2021р.

Мета роботи і задачі дослідження. Метою роботи є зниження впливу несиметрії на параметри режиму роботи електричних мереж. Вказана мета досягається встановленням новітніх симетрувальних пристроїв та аналізатора якості електричної енергії українського виробництва.

Досягнення вказаної мети відбулося за рахунок розв'язання наступних задач:

- обґрунтування можливості використання симетрувальних пристроїв в електричних мережах;
- пропозиції впровадження симетрувального пристрою з метою повноцінного моніторингу показників якості електроенергії;
- економічного розрахунку ефективності встановлення симетрувальних пристроїв;
- визначення участі суб'єктів розподілу електричної енергії в порушенні симетрії.

Ключові слова: НЕСИМЕТРІЯ, НЕСИМЕТРИЧНІ РЕЖИМИ, СИМЕТРУВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ, НЕСИМЕТРІЯ НАПРУГ, АНАЛІЗАТОР ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ, СИМЕТРУВАННЯ

ЗМІСТ

	ВСТУП.....	7
1	ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО НЕСИМЕТРИЧНІ РЕЖИМИ.....	8
2	ВПЛИВ НЕСИМЕТРІЇ НА РОБОТУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ.....	13
3	МЕТОДИ І ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ НЕСИМЕТРІЇ В СЕП. МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМІВ.....	16
3.1	Методи вимірювання несиметрії в системах електропостачання....	16
3.2	Методи розрахунку несиметричних режимів.....	22
3.3	Структура і опис роботи аналізатора якості електричної енергії АНТЕС АК-ЗФ, як пристрою для оцінки несиметрії системи	34
4	МЕТОДИ І ЗАСОБИ ЗНИЖЕННЯ НЕСИМЕТРІЇ.....	38
4.1	Симетрування трифазної мережі з нульовим проводом.....	39
4.2	Симетрування трифазних трьохпровідних мереж.....	47
4.3	Методи симетрування трифазних мереж по потужності.....	62
4.4	Симетрування і компенсація реактивної потужності в трифазних мережах.....	66
4.5	Похибка і стійкість процесу симетрування трифазних мереж.....	70
4.6	Схеми симетрувальних пристроїв в системах електропостачання...	75
5	УЧАСТЬ СУБ'ЄКТІВ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ПОРУШЕННІ СИМЕТРІЇ.....	87
5.1	Вплив фазового зсуву на оцінку участі суб'єктів.....	88
5.2	Вплив похибки опору зв'язку з системою на оцінку участі суб'єктів.	93
5.3	Компенсації похибки визначення участі суб'єктів, викликаной помилкою опору зв'язку.....	101
6	РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВСТАНОВЛЕННЯ СИМЕТРУВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ.....	105

ВИСНОВКИ.....	110
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	111
ДОДАТКИ.....	113
ДОДАТОК А. Охорона праці	113
ДОДАТОК Б. Розрахунки електричної мережі.....	119
ДОДАТОК В. Звіт подібності.....	130

ВСТУП

Найбільш часто несиметрія напруг створюється із-за нерівності навантажень по фазах. У мережах високої напруги несиметрія виникає, як правило, із-за наявності однофазних електроприймачів великої потужності, а іноді і трифазних електроприймачів з нестабільним споживанням по фазах.

Несиметричні режими роботи електричних мереж сприяють виникненню ряду проблем: перегрів ізоляції двигунів та генераторів, зменшення крутного моменту і додаткові втрати потужності в асинхронних машинах, виникнення небезпечних вібрацій в синхронних машинах, погіршення умов генерації реактивної потужності, яка генерується синхронними генераторами, компенсаторами, та батареями статичних конденсаторів, в свою чергу це може призвести до створення лавини напруги в системі. Крім того, при несиметричних режимах можуть різко ускладнюватися умови роботи систем релейного захисту і автоматики.

У несиметричних режимах роботи електроустановок підвищується небезпека враження людини електричним струмом через недопустиме підвищення крокової і дотичної напруг. Таким чином, в умовах експлуатації необхідно контролювати і обмежувати несиметрію, яка виникає в режимах експлуатації електричної системи, зокрема в електропередачах.

РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО НЕСИМЕТРИЧНІ РЕЖИМИ

Майже всі працюючі режими електричних систем несиметричні. Несиметрія режимів полягає в неоднаковості векторів напруги (струму) окремих фаз електропередачі за своїм абсолютним значенням зміщенням фазних векторів напруги (струму) відносно один одного на значення, яке змінюється від $\pm 120^\circ$. У більшості практичних випадків не-симетрія є незначною і не призводить до відчутних похибок у разі нехтування нею в розрахунках. Однак можливі ситуації, коли несиметрія виявляється значущою і її обов'язково треба враховувати під час аналізу робочих режимів функціонування електричних систем. Розрізняють три основні причини створення несиметричних режимів в електропередачах.

1. Несиметричне навантаження фаз, яке створюється пофазною розбіжністю величин електрорушійної сили (ЕРС) генераторів, коефіцієнтів трансформації трансформатора та автотрансформатора, нерівномірним розподіленням однофазних навантажень по фазам та ін. Подібна несиметрія має більш стохастичний характер і в більшості практичних випадків сприяє незначному відхиленню від нормального режиму функціонування системи електропередачі. Тому несиметричне навантаження фаз істотно не впливає на режимні характеристики електропередачі.

2. Розбіжність параметрів по окремим фазам електропередачі, зумовлена в основному геометричною несиметрією розташування фазних проводів у просторі. Так, при розміщенні проводів лінії електропередачі на опорах в вершинах рівнобічного трикутника, їх взаємне розташування буде симетричним, але відносно землі проводи виявляться закріпленими на різній висоті. Цей фактор спричинить несиметрію ємнісних поперечних провідностей лінії. За горизонтального розміщення проводів вони перебувають на однаковій висоті відносно землі, але їх взаємне

розташування є несиметричним, а саме відстань між проводами крайніх фаз буде вдвічі більшою, ніж між центральною і крайньою фазами. Це викличе появу розбіжності поміж взаємними індуктивностями та ємністю між проводами різних фаз системи електропередачі. Пофазний розбіг електричних параметрів лінії електропередачі неминуче призведе до виникнення несиметрії струмів і напруг.

Самим ефективним методом обмеження несиметрії напруги (струму) після пофазної розбіжності параметрів системи електропередачі є проведення транспозиції фазних проводів електричної лінії, яка полягає в періодичному змінюванні послідовності чергування фазних проводів у середовищі на спеціальних транспозиційних опорах. Для ліній електропередачі завдовжки понад 100 км рекомендовано здійснювати повний цикл транспозиції на всіх ділянках між електричними станціями, підстанціями та перемикальними пунктами. Використання цього заходу дозволяє вирівняти пофазну розбіжність параметрів лінії і зменшити несиметрію фазних параметрів до припустимого рівня.

Можливе також застосування інших заходів, спрямованих на симетрування фазних параметрів лінії за рахунок зміни відносної висоти підвісу фаз або зменшення кроку розщеплення середньої фази. Проте такі заходи зазвичай виявляються недостатньо ефективними (наприклад, зменшення несиметрії у зворотній послідовності супроводжується збільшенням несиметрії за нульовою послідовністю) і вимагають більших капітальних витрат.

3. Неповнофазні режими роботи лінії, які зумовлені або короткочасним вимкненням однієї або двох фаз лінії у разі коротких замикань та інших аварійних вимкнень, або тривалим вимкненням протягом пофазного ремонту лінії чи іншого її устаткування. Застосування довготривалих неповнофазних режимів роботи електропередачі дає змогу істотно покращити надійність електропостачання споживачів, тому що,

навіть внаслідок аварійних чи планових вимкнень однієї або двох фаз лінії, електроспоживач буде отримувати електроенергію хоча і в обмеженому обсязі. Варто враховувати також, що тривала експлуатація електропередачі при неповнофазних режимах роботи обмежується різким зменшенням якості електричної енергії і економічності функціонування електричної системи.

Розрізняють два види несиметрії електропередачі: систематичну і ймовірнісну, іншими словами - випадкову. Тривала систематична несиметрія зумовлена нерівномірним постійним перевантаження однієї фази, ймовірнісна несиметрія відповідає тимчасовим навантаженням, при яких в різні періоди часу перевантажуються різні фази в залежності від випадкових факторів (переміжна несиметрія).

Утворення зворотної і нульової послідовностей в системі струмів і напруг в несиметричних режимах роботи електросистеми веде до додаткових втрат потужності поздовжніх і поперечних елементів схеми електропередачі і зниження техніко-економічних показників режиму роботи лінії.

Несиметричні режими мають властивість здійснювати зсув нейтралі трифазної системи напруг (створюється напруга зсуву), це викликає підвищення напруги в одних фазах та зменшення в інших фазах. Це може спричиняти виникнення неприпустимих перенапруг, які дуже обмежені в умовах роботи лінійної ізоляції електричних ліній надвисокої напруги. Природно, зсув нейтралі негативно впливає на режими роботи електричних приймачів, на затискачах яких напруга виявляється значно вищою або значно нижчою від свого номінального значення. Підвищення струмів в окремо взятих фазах лінії при несиметричних режимах може призводити до неприпустимого перегрівання струмопровідних частин, перш за все обмоток трансформаторів, електрогенераторів і двигунів. Майже завжди при несиметричних режимах роботи електропередачі істотно зменшується її

пропускна здатність унаслідок погіршення стійкості паралельної роботи об'єднувальних енергосистем.

Несиметрія негативно впливає на робочі та техніко-економічні характеристики електричних машин. Струми зворотної послідовності утворюють у статорах електричних машин магнітне поле, що обертається у зворотному напрямку з подвоєною синхронною швидкістю відносно ротора. Таке поле породжує пульсуючий гальмівний електромагнітний момент, а, отже, і додаткове нагрівання роторів машин. У такій ситуації в асинхронних двигунах відбуваються додаткові втрати потужності в статорах, різко зменшується момент обертання. В синхронних електричних машинах можуть розвиватися небезпечні вібрації, які призводять до руйнування машин.

При несиметричних режимах функціонування електричних систем стрімко погіршується генерація реактивної потужності синхронними генераторами, компенсаторами, а також батареями статичних конденсаторів, а це може приводити до створення лавини напруги в системі. Стрімко ускладнюються функції релейного захисту і автоматики, справність яких перевіряють з урахуванням можливих несиметричних режимів роботи електросистеми. Найбільш важливе значення має професійне налагодження засобів релейного захисту і автоматики, які встановлюються на дальніх лініях надвисокої напруги з обов'язковим врахуванням пофазної несиметрії параметрів лінії.

Незбалансовані електромагнітні поля навколо ліній електропередач надвисокої напруги, яка працює в несиметричному режимі, значно погіршують роботу ліній зв'язку та ліній електропередачі самих найбільш низьких класів номінальної напруги, розташованих поблизу лінії, за рахунок того, що в них індуктуються великі, часто неприпустимі ЕРС. У несиметричних режимах роботи електроустановок підвищується небезпека враження людини електричним струмом через недопустиме підвищення

крокової і дотичної напруг. Таким чином, в умовах експлуатації необхідно контролювати і обмежувати несиметрію, яка виникає в режимах функціонування електричної системи, зокрема в електропередачах. Згідно чинним нормативним документам України граничнодопустимі значення коефіцієнтів зворотної і нульової послідовностей обмежені 2 і 4% відповідно.

РОЗДІЛ 2 ВПЛИВ НЕСИМЕТРІЇ НА РОБОТУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

Несиметрія напруг, як вже було зазначено раніше, викликається частіше за все наявністю несиметричного навантаження в мережі. Несиметричні струми навантаження, що протікають в струмоведучих елементах системи електропостачання, утворюють в них несиметричні падіння напруги. З цієї причини на виводах електроприймача з'являється несиметрична система напруг. Істотні відхилення напруги в електроприймачах перевантаженої фази можуть перебільшити нормально допустимі їх значення, при цьому значення відхилення напруги в ЕП інших фаз будуть знаходитися в нормованих границях. Крім погіршення режиму напруги в ЕП, несиметричний режим роботи суттєво погіршуються умови роботи як самих ЕП, так і усіх елементів електричної мережі, погіршується надійність роботи електрообладнання та системи енергопостачання в цілому [1].

Суттєво відрізняється вплив несиметричного режиму в порівнянні з симетричним режимом для поширених трифазних ЕП, таких як асинхронні двигуни. Важливе значення для таких електродвигунів має напруга зворотної послідовності. Опір зворотної послідовності асинхронних двигунів приблизно дорівнює опору загальмованого двигуна і, як наслідок, в 5-8 разів менший ніж опір прямої послідовності. Тому навіть при невеликому значенні несиметрії напруг виникають істотно значні струми зворотної послідовності. Вони накладаються на струми прямої послідовності і створюють додатковий нагрів статора і ротора (переважно масивних частин ротора), в свою чергу це призводить до швидкого старіння ізоляції і зменшує корисну потужність двигуна (зменшення ККД двигуна). Таким чином, строк служби цілком завантаженого асинхронного двигуна, який працює при несиметрії напруги 4%, зменшується в 2 рази. При несиметричному режимі напруги 5%, дійсна потужність двигуна зменшується на 5-10%.

Зміна напруги в мережі впливає і на зміну реактивної потужності, яку споживає двигун. При зміні напругим на виводах двигуна змінюється і його ковзання і, як наслідок, – швидкість обертання. Останнє є важливим для підприємств, в технологічних процесах яких частота обертання двигуна є головним критерієм продуктивності машин (ЖКГ, виробничі лінії, бурові установки і т.п.). Відхилення напруги викликають збитки через додаткові втрати активної потужності в АД, додаткового споживання ними реактивної потужності, скорочення терміну служби ізоляції, зниження продуктивності механізмів і додатковим часом роботи асинхронних двигунів в зв'язку зі зміною продуктивності механізмів. Строк служби ізоляції скорочується, в основному, в результаті додаткового нагріву збільшеними струмами. В загальному випадку, зміни частоти обертання АД при відхиленнях напруги порівняно невеликі. Проте, для потокового виробництва навіть невеликі відхилення частоти обертання суттєво впливають на продуктивність механізмів.

При несиметрії напруг мережі в синхронних машинах разом з виникненням додаткових втрат реактивної потужності та нагріванням статора і ротора, можуть утворитися небезпечні вібрації, як наслідок появи знакозмінних обертових моментів і тангенціальних сил, які пульсують з подвоєною частотою мережі. При істотній несиметрії вібрація може стати небезпечною, а особливо за наявності дефектів зварних з'єднань та недостатній міцності. При несиметрії електричних струмів, які не перевищують 30%, небезпечні перенапруги в струмоведучих елементах конструкцій, як правило, не з'являються.

Правила та рекомендації технічної експлуатації електричних мереж та станцій вказують, що «довготривала робота електричних генераторів та синхронних компенсаторів при нерівномірних струмах фаз припускається, якщо різниця струмів менша 10% від номінального струму статора турбогенераторів та 20% гідрогенераторів. При цих факторах струми в фазах

не повинні перевищувати значення номінальних величин. Якщо ці умови не виконуються, то необхідно дотримуватися спеціальних мір по зменшенню несиметрії».

У випадку присутності струмів зворотної і нульової послідовності зростають сумарні струми в окремих фазах електричних елементів мережі, і це призводить до зростання втрат активної потужності і може бути недопустимим з умов нагріву. Електричні струми нульової послідовності проходять постійно через заземлювачі. Та при цьому додатково збільшується опір налаштованих заземлюючих пристроїв. Це може бути недопустимо з точки зору роботи релейного захисту, а також – через підсилення дії на низькочастотні установки зв'язку і пристрої залізничного блокування.

Виникнення несиметрії напруги значною мірою знижує режими роботи багатofазних вентильних випрямлячів, а саме - істотно збільшується пульсація випрямленої напруги, утруднюються умови роботи системи імпульсно-фазного управління тиристорних перетворювачів.

Конденсаторні установки при несиметрії напруг завантажуються реактивною потужністю нерівномірно по фазах, що призводить до неможливості повного використання встановленої реактивної потужності. Крім того, КУ в цьому випадку посилюють вже існуючу несиметрію, так як видача РП в мережу у фазі з найменшою напругою буде менша, ніж в інших фазах (пропорційно квадрату напруги на КУ).

Несиметрія напруги істотно впливає і на однофазні електроприймачі, якщо фазні напруги різні то, наприклад, лампи накаливання, підключені до фази з вищою напругою, мають більший світловий потік ніж лампи, підключені на фази з нижчою напругою. Несиметрія напруг ускладнює роботу РЗА, призводить до помилок в роботі електrolічильників і т.п.

РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ І ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ НЕСИМЕТРІЇ В СЕП. МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМІВ

3.1 Методи вимірювання несиметрії в системах електропостачання

Вимірювання симетричних складових напруг і струмів в електричних мережах повинно здійснюватися як при синусоїдальній напрузі, так і за наявності вищих гармонік. Високу перешкодозахищеність мають кореляційні методи обробки сигналів, засновані на дискретному перетворенні Фур'є і дозволяють вимірювати симетричні складові в реальному або квазіреальному масштабі часу. У цьому випадку вимірювання ґрунтуються на обчисленні квадратурних складових прямої, зворотної та нульової послідовностей по квадратурних складовим фазних напруг. Вимірювання симетричних складових напруг і струмів може вирішуватися різними методами, заснованими на кореляційній обробці сигналів [2].

До них відносяться:

- метод, заснований на зміні інтегральних значень кусково-гармонійних напруг;
- пошуковий метод вимірювання амплітуд і фаз;
- метод, заснований на обчисленні ортогональних складових напруг;
- метод, заснований на попередньому перетворенні трифазної напруги у двофазну з подальшим обчисленням ортогональних складових двофазної напруги [3].

Ці методи можуть бути реалізовані схемами різної складності та володіють різними рівнями швидкодії. У той же час, кожен метод має високу перешкодозахищеність при наявності вищих гармонік в мережі і адаптацію до коливань основної частоти [4]. Залежно від вимог, що висуваються до системи контролю несиметрії реальної мережі, здійснюється вибір методу, в якому перевага віддається критерієм швидкодії або складності схемної реалізації.

Останній метод реалізується більш простою схемою в порівнянні з попередніми методами, тому що він заснований на кореляційній обробці сигналів з попереднім перетворенням вихідної системи трифазних величин. Перетворенню у двофазну піддається трифазна напруга; вимірюються діючі значення напруг з подальшим обчисленням по них симетричних складових.

Розглянемо принцип вимірювання, на якому ґрунтується даний метод. Комплекси діючих значень симетричних складових напруг визначаються виразом:

$$\underline{U}_n = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + \alpha^n \underline{U}_B + \alpha^{2n} \underline{U}_C) \quad (3.1)$$

де α - оператор повороту на 120° ;

n - вимірювана послідовність напруг і струмів.

У виразі (3.1) напруги прямої і зворотної послідовностей визначаються як сума фазних напруг, де напруги фаз В і С через оператор повороту α зсуваються на $\pm 120^\circ$. Перетворивши в вираженні $\alpha = e^{j120^\circ}$, за формулою Ейлера отримаємо:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \frac{1}{3}(\underline{U}_A + \underline{U}_B \cdot \cos 120^\circ + j \underline{U}_B \cdot \sin 120^\circ + \underline{U}_C \cdot \cos 120^\circ - j \underline{U}_C \cdot \sin 120^\circ) = \\ &= \frac{1}{3}[\underline{U}_A + \cos 120^\circ(\underline{U}_B + \underline{U}_C) + j \sin 120^\circ(\underline{U}_B - \underline{U}_C)]; \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_2 &= \frac{1}{3}(\underline{U}_A + \underline{U}_B \cdot \cos 120^\circ - j \underline{U}_B \cdot \sin 120^\circ + \underline{U}_C \cdot \cos 120^\circ + j \underline{U}_C \cdot \sin 120^\circ) = \\ &= \frac{1}{3}[\underline{U}_A + \cos 120^\circ(\underline{U}_B + \underline{U}_C) + j \sin 120^\circ(\underline{U}_B - \underline{U}_C)]; \end{aligned} \quad (3.3)$$

Для визначення прямої і зворотної послідовностей напруг трифазну напругу, використану в формулах (3.2), (3.3), перетворимо у двофазну:

$$\underline{V} = \underline{U}_A + \cos 120^\circ (\underline{U}_B + \underline{U}_C); \quad (3.4)$$

$$\underline{W} = \sin 120^\circ (\underline{U}_B - \underline{U}_C); \quad (3.5)$$

Підставивши вирази (3.4) і (3.5) у формули (3.2) і (3.3), отримаємо:

$$\underline{U}_1 = \frac{1}{3}(\underline{V} + j\underline{W}); \quad (3.6)$$

$$\underline{U}_2 = \frac{1}{3}(\underline{V} - j\underline{W}); \quad (3.7)$$

Для миттєвих значень:

$$v(t) = \frac{1}{3} \{ \underline{U}_A(t) + \cos 120^\circ [\underline{U}_B(t) + \underline{U}_C(t)] \}; \quad (3.8)$$

$$w(t) = \frac{1}{3} \{ \sin 120^\circ [\underline{U}_B(t) - \underline{U}_C(t)] \}; \quad (3.9)$$

Потім визначаються ортогональні складові двофазної напруги:

$$\left. \begin{aligned} V_x &= V \cos \psi_V; V_y = V \sin \psi_V; \\ W_x &= W \cos \psi_W; W_y = W \sin \psi_W; \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

де ψ_V, ψ_W - початкові фази напруг $V(t)$ і $W(t)$.

Ортогональні складові напруг V_x, V_y, W_x, W_y можуть бути виміряні будь-яким методом, зокрема кореляційним. Так, використовуючи дискретне перетворення Фур'є, для складових можна записати наступні вирази:

$$\left. \begin{aligned} V_x &= \frac{2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} v(t_i) \cos \omega t_i; V_y = \frac{2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} v(t_i) \sin \omega t_i; \\ W_x &= \frac{2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} w(t_i) \cos \omega t_i; W_y = \frac{2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} w(t_i) \sin \omega t_i. \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

Обчислення прямої та зворотної послідовностей напруг виконується за виразами:

$$U_1^2 = \frac{1}{9}(V_x^2 + V_y^2 + W_x^2 + W_y^2 + 2V_yW_x - 2V_xW_y); \quad (3.12)$$

$$U_2^2 = \frac{1}{9}(V_x^2 + V_y^2 + W_x^2 + W_y^2 - 2V_yW_x - 2V_xW_y); \quad (3.13)$$

або в більш простому вигляді:

$$U_1 = \frac{1}{3}\sqrt{[(V_x - W_y)^2 + (V_y + W_x)^2]}; \quad (3.14)$$

$$U_2 = \frac{1}{3}\sqrt{[(V_x + W_y)^2 + (V_y - W_x)^2]} \quad (3.15)$$

На рис. 3.1. наведена структурна схема, яка реалізує даний метод. Схема цифрового вимірювача прямої та зворотної послідовностей напруги містить: блок вхідних пристроїв БВП; блок аналого-цифрових перетворювачів АЦП; подільники частоти ПЧ1, ПЧ2, ПЧ3, ПЧ4; реверсивні суматори СР1, СР2; блоки перенесення БП1, БП2; регістри пам'яті РП1, РП2; блок управління БУ; блоки множення БМ1, БМ2, БМ3, БМ4; датчик кодів гармонік ДКГ; реверсивні лічильники РЛ1, РЛ2, РЛ3, РЛ4; мікропроцесор МП, оперативно-запам'ятовуючий пристрій ОЗП, реєструючий пристрій РП.

Принцип дії цифрового пристрою, що реалізує даний метод, полягає в наступному. Напруги U_A , U_B , U_C надходять через блок вхідних пристроїв БВП на аналого-цифрові перетворювачі АЦП. З виходів перетворювачів АЦП числові коди, пропорційні миттєвим значенням напруг $U_A(t)$, $U_B(t)$, $U_C(t)$, надходять на вхід реверсивного суматора СР1, причому з перетворювача АЦП фази А - на підсумовування, а з перетворювачів АЦП фаз В і С через подільники частоти ПЧ1 і ПЧ2 з коефіцієнтом ділення 0,87 - на віднімання. У результаті в реверсивному суматорі СР1 записується код, пропорційний напрузі $v(t)$ згідно виразу (3.8). З виходів перетворювачів АЦП фаз В і С через подільник частоти ПЧ3 і коефіцієнтом ділення 0,5 коди, пропорційні $U_B(t)$ та $U_C(t)$, надходять на вхід реверсивного суматора СР2. В

результаті цього в суматорі СР2 записується код напруги $w(t)$ відповідно до виразу (3.9). Коди $v(t)$ та $w(t)$ напруг з реверсивних суматорів СР1 і СР2 по команді з блоку управління БУ через блоки перенесення БП1 і БП2, вводяться в регістри пам'яті РП1 і РП2. Після перенесення кодів напруг $v(t_i)$ та $w(t_i)$ в регістри пам'яті РП1 і РП2, реверсивні суматори СР1 та СР2 встановлюються в нульовий стан, і тим самим готуються для запису наступних миттєвих значень $v(t_{i+1})$ та $w(t_{i+1})$.

По команді з блоку управління БУ код напруги $v(t_i)$ надходить на перший і другий блоки множення БМ1 і БМ2, де перемножуються з кодами $\cos \omega t_i$ і $\sin \omega t_i$, що задаються датчиком кодів гармонік ДКГ. Добуток $v(t_i) \sin \omega t_i$ з виходу блоку множення БМ1 надходить на реверсивний лічильник РЛ1, а добуток $v(t_i) \cos \omega t_i$ коду блоку множення БМ2 - на реверсивний лічильник РЛ2. У наступний момент часу код напруги $w(t_i)$ перемножується в блоках множення БМ1 і БМ2 з кодами тих же значень ортогональних функцій $\cos \omega t_i$ і $\sin \omega t_i$. Добуток $w(t_i) \sin \omega t_i$ з виходу блоку множення БМ1 надходить на реверсивний лічильник РЛ3, а добуток $w(t_i) \cos \omega t_i$ блоку множення БМ2 - на реверсивний лічильник РЛ4.

За період досліджуваного сигналу (після обробки кодів миттєвих значень) в реверсивних лічильниках РЛ1 ÷ РЛ4 будуть отримані коди V_x , V_y , і W_x , W_y ортогональних складових основної гармоніки напруги. З реверсивних лічильників коди ортогональних складових надходять на мікропроцесор МП, а з виходу останнього квадрати цих кодів вводяться в оперативний пристрій ОЗП. Коди ортогональних складових з виходів реверсивних лічильників надходять на входи блоків множення БМ3 і БМ4. Введення кодів в блоки множення проводиться так, щоб на виході були отримані коди подвоєних добутків квадратурних складових $2V_y W_x$ та $2V_x W_y$. Ці коди з виходів блоків БМ3 і БМ4 надходять на входи оперативної пам'яті

ОЗП з відповідним знаком. Мікропроцесор МП за алгоритмами (3.12) та (3.13) знаходить симетричні складові.

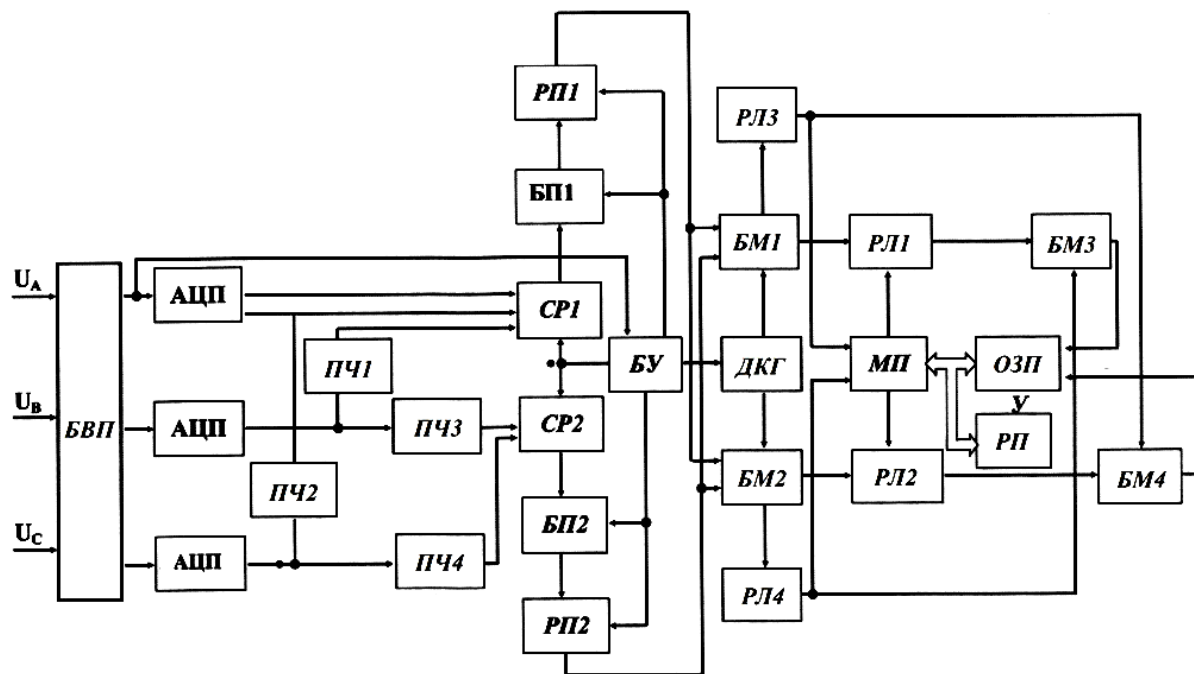


Рис. 3.1 – Структурна схема вимірювача симетричних складових на базі мікропроцесора

Запропонований вимірювач дозволяє істотно скоротити час вимірювань і виключити похибку, яка обумовлена вимірюванням симетричних складових за різними реалізаціями досліджуваної напруги.

Метод може бути реалізований також за допомогою аналого-цифрового і аналогового вимірювачів несиметрії. Перевагою даних рішень є більш проста схема в порівнянні з цифровим пристроєм, а недоліком - низька перешкодозахищеність. Так, аналоговий вимірювач рекомендується до застосування в мережах з низьким рівнем вищих гармонік.

Прості схеми реалізації можливі і в цифрових приладах, якщо до них пред'явлені занижені вимоги. Вимірювання симетричних складових

методом опорних точок призначене для використання тільки при синусоїдальній напрузі.

3.2 Методи розрахунку несиметричних режимів

Дослідження характеристик несиметричних робочих режимів електричних систем зазвичай проводять за методом симетричних складових.

Цей метод полягає в поданні несиметричної трифазної системи напруг (струмів) у вигляді результату накладення трьох незалежних симетричних режимів прямої, зворотної і нульової послідовностей[5].

Розглянемо ділянку трифазної лінії електропередачі довжиною dx (рис. 3.2). Із курсу загальної електротехніки відомо, що режимні параметри ділянки лінії електропередачі можна записати у вигляді системи матричних рівнянь у частинних похідних:

$$\left\{ \begin{aligned} -\frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \\ -\frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} G_{a0} & G_{ab} & G_{ac} \\ G_{ba} & G_{b0} & G_{bc} \\ G_{ca} & G_{cb} & G_{c0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{a0} & C_{ab} & C_{ac} \\ C_{ba} & C_{b0} & C_{bc} \\ C_{ca} & C_{bc} & C_{c0} \end{bmatrix} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \end{aligned} \right. \quad (3.16)$$

струму відповідних фаз лінії; R_a, R_b, R_c та L_a, L_b, L_c — значення активних опорів і коефіцієнтів самоіндукції фазних проводів лінії; M_{ab}, M_{ac}, M_{bc} — коефіцієнти взаємоіндукції між фазними проводами; G_{a0}, G_{b0}, G_{c0} та C_{a0}, C_{b0}, C_{c0} — активна провідність і ємність між фазними проводами і землею; G_{ab}, G_{bc}, G_{ac} та C_{ab}, C_{bc}, C_{ac} — активна провідність і ємність між відповідними фазними проводами електропередачі.

У загальному вигляді матричні рівняння (3.16) можна подати у вигляді

$$\begin{cases} -\frac{\partial}{\partial x} U_\phi = R_\phi I_\phi + L_\phi \frac{\partial}{\partial x} I_\phi; \\ -\frac{\partial}{\partial x} I_\phi = G_\phi U_\phi + C_\phi \frac{\partial}{\partial x} U_\phi. \end{cases} \quad (3.16.a)$$

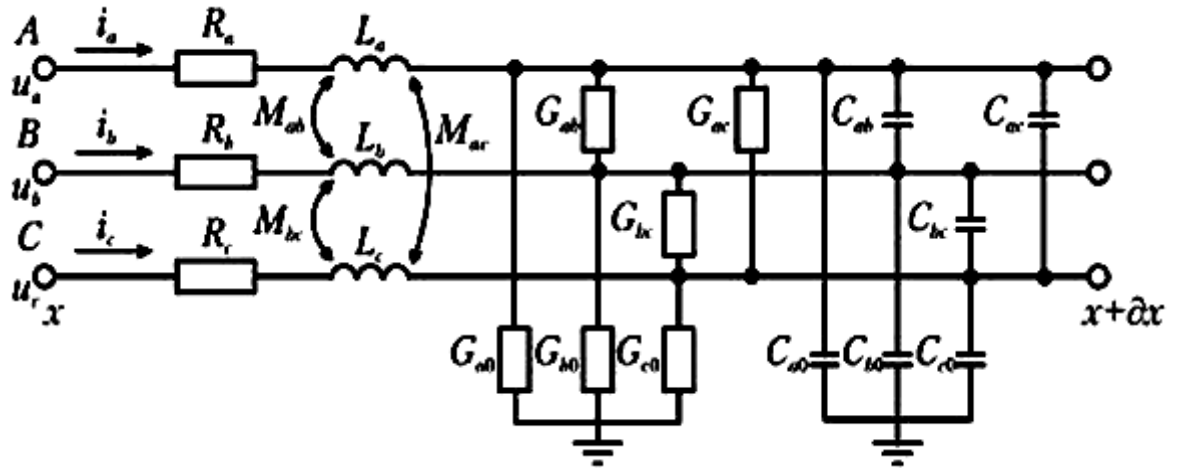


Рис. 3.2 – Схема заміщення частини лінії у фазних координатах

Для дальніх ліній електропередачі, для яких передбачено заходи щодо симетрування, фазні параметри, окремих фаз лінії умовно можна вважати однаковими. За цих умов матриці фазних параметрів є симетричними:

$$\begin{aligned} R_\phi &= \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix}; & L_\phi &= \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix}; \\ G_\phi &= \begin{bmatrix} G_0 & G & G \\ G & G_0 & G \\ G & G & G_0 \end{bmatrix}; & C_\phi &= \begin{bmatrix} C_0 & C & C \\ C & C_0 & C \\ C & C & C_0 \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad (3.17)$$

Аналіз виразів (3.16) з урахуванням рівнянь (3.17) свідчить, що у фазних координатах режим роботи частини трифазної лінії електропередачі визначають системою із шести рівнянь. Усі матриці параметрів ділянки лінії, крім матриці активних опорів, мають недіагональні елементи, що свідчить про наявність взаємного впливу режимних параметрів окремих фаз. Дійсно, явище взаємоіндукції між проводами сусідніх фаз визначає вплив струму однієї фази на струми сусідніх фаз. Такий самий вплив на режимні характеристики сусідніх фаз справляють активні взаємні провідності і ємності між фазними проводами лінії. Отже, математична модель частини лінії електропередачі в фазних координатах містить дві сильно зв'язані підсистеми, кожна з яких має по три рівняння.

Безпосереднє розв'язання системи рівнянь (3.16) дозволяє однозначно визначити всі режимні параметри електропередачі. Однак це пов'язано з певними труднощами, зумовленими складністю системи взаємозалежних рівнянь у фазних координатах. З цієї причини на практиці здійснюють перетворення системи рівнянь, представлених у фазних координатах на систему незалежних один від одного рівнянь. Подібне перетворення можна виконати множенням векторів фазних напруг та струмів на матрицю відображення:

$$\begin{aligned} U_{\phi} &= SU \\ I_{\phi} &= SI \end{aligned} \tag{3.18}$$

Тут U , I — вектори-стовпчики напруг та струмів у перетвореній системі координат; S — матриця відображення.

Загалом можна запропонувати нескінченну кількість матриць відображення S . Але на практиці найчастіше використовують матрицю вигляду

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\partial e \underline{a} = 1e^{-j120^\circ} = -0,5 + j\frac{\sqrt{3}}{2}; \underline{a}^2 = 1e^{j120^\circ} = -0,5 - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

Систему координат, що відповідає цій матриці, називають системою симетричних складових.

З урахуванням значень матриці відображення S рівняння (3.18) для напруг набувають вигляду:

$$\begin{bmatrix} \underline{\square} U_a \\ \underline{\square} U_b \\ \underline{\square} U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{\square} U_1 \\ \underline{\square} U_2 \\ \underline{\square} U_0 \end{bmatrix},$$

тобто

$$\begin{cases} \underline{\square} U_a = \underline{\square} U_1 + \underline{\square} U_2 + \underline{\square} U_0; \\ \underline{\square} U_b = \underline{a}^2 \underline{\square} U_1 + \underline{a} \underline{\square} U_2 + \underline{\square} U_0; \\ \underline{\square} U_c = \underline{a} \underline{\square} U_1 + \underline{a}^2 \underline{\square} U_2 + \underline{\square} U_0; \end{cases} \quad (3.19)$$

Тут індексами 1, 2 і 0 позначено параметри прямої, зворотної та нульової послідовностей відповідно. Такі та аналогічні рівняння можна записати і для системи струмів.

Аналіз виразів (3.19) свідчить, що трифазну систему напруг у загальному випадку можна подати як результат накладання трьох симетричних систем напруг, які характеризуються прямим та зворотним чергуванням фаз (пряма послідовність і зворотна послідовність) та збігом напруг за фазою (нульова послідовність), показаних відповідно на рис. 3.3.

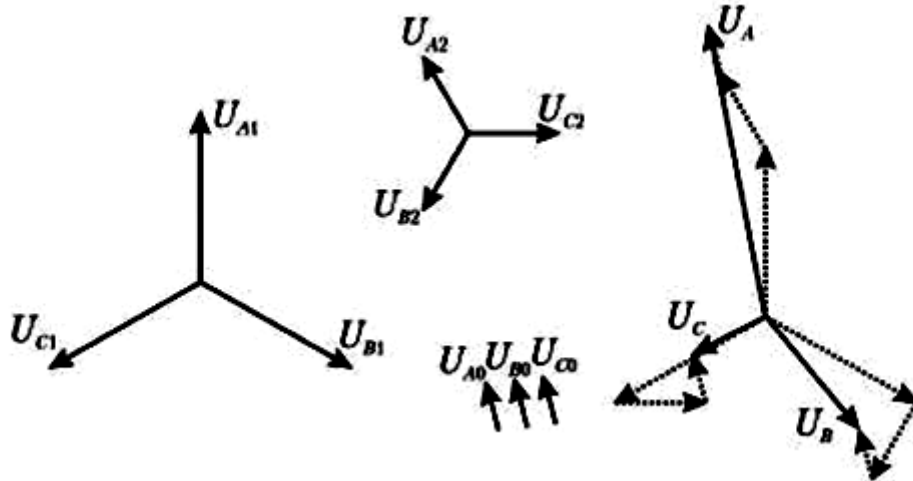


Рис. 3.3 – Графічна ілюстрація методу симетричних складових

Обернене перетворення системи фазних координат в систему симетричних складових виконують за допомогою оберненої матриці відображення:

$$S^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Тоді:

$$\begin{bmatrix} \square \\ U_1 \\ \square \\ U_2 \\ \square \\ U_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \square \\ U_a \\ \square \\ U_b \\ \square \\ U_c \end{bmatrix},$$

або

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \frac{1}{3} \left(\underline{U}_a + \underline{a} \underline{U}_b + \underline{a}^2 \underline{U}_c \right); \\ \underline{U}_2 = \frac{1}{3} \left(\underline{U}_a + \underline{a}^2 \underline{U}_b + \underline{a} \underline{U}_c \right); \\ \underline{U}_0 = \frac{1}{3} \left(\underline{U}_a + \underline{U}_b + \underline{U}_c \right); \end{cases} \quad (3.20)$$

Аналогічні рівняння можна скласти і для системи струмів.

Згідно аналізу виразів (3.20) легко переконатися, що в результаті перетворення симетричної трифазної системи напруг та струмів в систему симетричних складових параметри зворотної і нульової послідовностей будуть дорівнювати нулю, а параметри прямої послідовності збігаються з параметрами фази А фазної системи координат.

Таким чином, матричні рівняння (3.16.а) можна записати у вигляді:

$$\begin{cases} -S \frac{\partial}{\partial x} U = R_\phi S I + L_\phi S \frac{\partial}{\partial t} I; \\ -S \frac{\partial}{\partial x} I = G_\phi S U + C_\phi S \frac{\partial}{\partial t} U; \end{cases} \quad (3.21)$$

Домножуючи всі складові рівнянь (3.6) ліворуч на матрицю S^{-1} , отримуємо:

$$\begin{cases} -\frac{\partial}{\partial x} U = R I + L \frac{\partial}{\partial t} I; \\ -\frac{\partial}{\partial x} I = G U + C \frac{\partial}{\partial t} U; \end{cases} \quad (3.22)$$

У виразах (3.22) U , I — вектори-стовпці напруг і струмів в координатній системі симетричних складових; R , L , G , C — матриці параметрів схеми заміщення частини лінії в системі симетричних складових:

$$\begin{aligned} R &= S^{-1}R_{\phi}S; & G &= S^{-1}G_{\phi}S; \\ L &= S^{-1}L_{\phi}S; & C &= S^{-1}C_{\phi}S; \end{aligned} \quad (3.23)$$

Неважко переконатися, що матриці параметрів ділянок лінії в симетричних складових діагональні:

$$\begin{aligned} R &= \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} & L &= \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L+2M \end{bmatrix} \\ G &= \begin{bmatrix} G_0-G & 0 & 0 \\ 0 & G_0-G & 0 \\ 0 & 0 & G_0+2G \end{bmatrix} & C &= \begin{bmatrix} C_0-C & 0 & 0 \\ 0 & C_0-C & 0 \\ 0 & 0 & C_0+2C \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.24)$$

Зі структури матриць (3.24) видно, що параметри режиму окремих симетричних складових не впливають один на одного. Інакше кажучи, система із шести взаємозалежних рівнянь математичної моделі ділянки лінії у фазних координатах перетвориться на три незалежних системи, які містять по два рівняння, записані для прямої, зворотної і нульової послідовностей відповідно.

Основна якість системи симетричних складових полягає в незалежності режимних параметрів кожної із симетричних складових. Цей фактор визначає широке застосування такого підходу для аналізу не тільки несиметричних, але й симетричних режимів роботи електричних систем, зокрема електропередач. Під час дослідження симетричних режимів математична модель електромережових елементів скорочується в три рази порівняно з моделлю у фазних координатах, що спрощує розрахунки для розв'язань електротехнічних задач.

Режимні параметри, визначені для прямої послідовності, повністю відповідають режимним параметрам фази А симетричного режиму в фазних координатах. Режимні параметри інших фаз можна легко знайти, змінивши фази режимних параметрів на $\pm 120^\circ$. Отже, розглянуті в першому розділі математичні моделі електропередачі відповідають прямій послідовності системи симетричних складових.

Як впливає із системи (3.7) і рівнянь (3.8), для аналізу несиметричних режимів роботи електропередачі потрібно додатково визначити параметри схем заміщення лінії для зворотної і нульової послідовностей.

Із виразів (3.24) видно, що параметри схем заміщення для зворотної послідовності цілком збігаються з параметрами прямої послідовності в системі симетричних складових. Нагадаймо, що напруги зворотної та нульової послідовностей зазвичай набагато менші за напругу прямої послідовності. Саме тому втрати на корону і відповідні поперечні активні провідності актуальні лише для схем заміщення прямої послідовності.

Параметри схем заміщення для системи нульової послідовності будуть інші, чим параметри прямої послідовності. Цей факт пояснюється тим, що в контурі нульової послідовності як зворотний провід використовується земля і грозозахисні троси, що призводить до зростання погонних поздовжніх опорів та поперечних провідностей лінії. Тут для визначення погонних параметрів електропередачі для нульової послідовності обов'язково потрібно враховувати вплив грозозахисних тросів, оскільки у протилежному разі електромагнітні поля, створені струмами нульової послідовності, не будуть збалансовані. У грозозахисних тросах наводяться ЕРС взаємоіндукції, які спричиняють додаткові втрати потужності і чинять негативний вплив на режимні параметри електропередачі.

У більшості випадків для обмеження додаткових втрат потужності в грозозахисних тросах електропередач надвисокої напруги останні зазвичай ізолюють від тіла опори і розрізають на відрізки, які заземлюють тільки в одному місці. Це запобігає дії грозозахисних тросів на параметри схеми заміщення нульової послідовності лінії.

Погонний активний опір нульової послідовності проводів електропередач, без впливу грозозахисного троса визначають за виразом

$$r_{0(0)} = \frac{r_0}{n} + 0,15 \quad (3.25)$$

Зростання погонного активного опору відносно аналогічних параметрів прямої послідовності на 0,15 Ом/км зумовлено тим, що контур нульової послідовності включає землю, в якій погонний опір орієнтовно становить 0,15 Ом/км.

Індуктивний погонний опір лінії нульової послідовності, без впливу грозозахисних тросів визначають за виразом:

$$x_{0(0)} = 0,435 \cdot \lg \frac{D_3}{R_{cz}}, \quad (3.26)$$

де $R_{cz} = \sqrt[3]{r_e D_{сер}^2}$ — середньгеометричний радіус фази;

D_3 — еквівалентна глибина зворотного струму, яку визначають за формулою Карсона [2]:

$$D_3 = \frac{2,1}{\sqrt{f \cdot \gamma \cdot 10^{-5}}}.$$

Тут f — частота змінного струму; γ — питома провідність землі. В оцінювальних розрахунках для рівнинних територій України беруть значення $D_3 = 1000$ м.

У двоколовій лінії для визначення параметрів нульової послідовності слід враховувати взаємодію між проводами паралельних кіл лінії. Повний погонний опір нульової послідовності, такої лінії без урахування впливу грозозахисних тросів визначають за виразом:

$$z_{0(0)} = \frac{r_0}{2n} + 0,15 + j0,435 \cdot \lg \frac{D_3}{\sqrt{r_e \cdot D_{I-II}}}, \quad (3.27)$$

де D_{I-II} — середньо геометрична відстань між паралельними колами, яку визначають за формулою:

$$D_{I-II} = \sqrt[9]{D_{AI-AII} \cdot D_{BI-AII} \cdot D_{CI-AII} \cdot D_{AI-BII} \cdot D_{BI-BII} \cdot D_{CI-BII} \cdot D_{AI-CII} \cdot D_{BI-CII} \cdot D_{CI-CII}}.$$

Грозозахисні троси, що використовують для створення високочастотних каналів зв'язку, природно, не розрізають на окремі відрізки. Тут обов'язково необхідно враховувати дію тросів на поздовжні параметри схеми заміщення лінії нульової послідовності.

У цьому разі повний погонний опір нульової послідовності можна визначити за виразом:

$$z_{0(0)} = z_{п(0)} + \frac{z_{m(0)}}{z_{т(0)}}, \quad (3.28)$$

де $z_{п(0)}$ — погонний опір нульової послідовності лінії без врахування контуру трос-земля, визначений за виразами (3.25) і (3.26); $z_{т(0)}$ — погонний опір нульової послідовності системи тросів; $z_{m(0)}$ — опір нульової послідовності взаємодії між проводом і тросом.

Опір нульової послідовності системи тросів може визначатися за співвідношенням:

$$z_{T(0)} = \frac{r_T}{n_T} + 0,15 + jx_{T(0)} \quad (3.29)$$

де r_T — активний опір троса; n_T — кількість тросів; $x_{T(0)}$ — індуктивний опір нульової послідовності системи тросів:

$$x_{T(0)} = 0,435 \cdot \lg \frac{D_3}{\sqrt{r_{T.e} \cdot D_T}} \quad (3.30)$$

де $r_{T.e}$ — еквівалентний радіус троса; D_T — відстань між тросами. Для визначення індуктивного опору сталевих тросів обов'язково слід враховувати нелінійність сталі:

$$x_{T(0)} = 0,435 \cdot \lg \frac{D_3}{\sqrt{r_{T.3B} \cdot D_T}} + x_{T.6u}, \quad (3.31)$$

де $r_{T.3B}$ — зовнішній радіус троса; $x_{T.6u}$ — внутрішній індуктивний опір сталевих тросів (визначають за спеціальними таблицями і номограмами відповідно до величини струму в тросі).

Опір нульової послідовності взаємоіндукції між тросом і проводом визначають за формулою:

$$x_{m(0)} = 0,435 \cdot \lg \frac{D_3}{D_{n.m}} \quad (3.32)$$

де $D_{n.T}$ — середньгеометрична відстань між проводами і тросами. Для лінії, виконаної з одним і двома тросами, величини $D_{n.T}$ визначають за такими виразами:

$$D_{n.m} = \sqrt[3]{D_{Am} D_{Bm} D_{Cm}} \quad \text{— якщо використано один}$$

трос;

$D_{n.m} = \sqrt[6]{D_{Am1} D_{Bm1} D_{Cm1} D_{Am2} D_{Bm2} D_{Cm2}}$ – якщо використано два троси.

Ємнісну провідність нульової послідовності визначають за співвідношенням:

$$b_{0(0)} = \zeta \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{2h_{сер}}{r_e \left(\frac{D'_{сер}}{D_{сер}} \right)^2}} \quad (3.33)$$

провідності нульової послідовності лінії (для електропередач надвисокої напруги $\zeta = 1,1$); $h_{сер}$ — середня висота підвісу проводу над землею; $D_{сер}$ — середньо геометричне значення відстані між фазними проводами і їхніми дзеркальними відображеннями (рис. 3.4):

$$D'_{сер} = \sqrt[3]{D'_{AB} D'_{BC} D'_{CA}}.$$

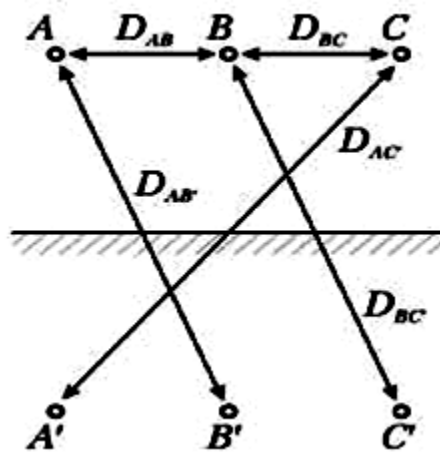


Рис. 3.4 – Дистанція між фазними проводами та їх дзеркальними відображеннями

Із виразів (3.24) видно, що поперечна активна провідність нульової послідовності лінії відрізняється від провідності прямої і зворотної послідовностей на потроєне значення провідності, зумовлене струмами витоку між фазними проводами лінії.

Згідно з виразами (3.24) система симетричних складових є незалежною, тобто режимні параметри однієї послідовності не впливають на параметри іншої. Така ситуація можлива лише в разі пофазної симетрії параметрів лінії електропередачі.

Приклад розрахунку несиметричного режиму в фазних координатах приведений у Додатку А.

3.3 Структура і опис роботи аналізатора якості електричної енергії АНТЕС АК-3Ф, як пристрою для оцінки несиметрії системи

В даній науковій праці з метою моніторингу ПЯЕ і, зокрема, несиметрії напруг в електричних мережах, пропонується впровадження аналізатора якості електроенергії «АНТЕС АК-3Ф» [6]. Даний аналізатор напруг і струмів – це автоматизований багатоцільовий пристрій, призначений для вимірювання і аналізу електроспоживання. Пристрій аналізує ПЯЕ згідно до ДЕСТу 13109-97 і визначає джерела погіршення якості електроенергії.

Загальну структурну схему аналізатора ЯЕ представлено на рис. 3.5.

Пристрій сполучення напруги підключає фазні напруги, що подаються з виходів на вимірювальних трансформаторах на вхід аналогового мультіплексора. Прилад сполучення напруги здійснює гальванічну розв'язку, нормування сигналів, відключає вхідні сигнали від вимірювального комплексу при вимиканні приладу (захист вхідних кіл).

Подібні функції виконує пристрій приєднання струмів. До складу пристрою входить додатково перетворювач струму в напругу. Перетворювач має елементи захисту, оскільки при аваріях вхідний струм може в 40 разів перевищувати номінальне значення.

Всі канали пристрою сполучення напруги і пристрій сполучення струмів для зниження рівня шуму включають фільтри низької частоти. Особливо важливим є зниження рівня шуму на вході компаратора (К), який керує роботою дискретизатор.

Для підвищення точності і стабільності вимірювального тракту на входи аналогового мультиплексора додатково подаються напруга з виходу джерела опорної напруги $U_{оп}$ (для корекції мультиплікативної складової похибки) і нульовий потенціал U_0 (для корекції адитивної складової похибки). Джерело еталонного напруги повинно бути стабільним і точно вимірним. Результат вимірювання знаходиться в пам'яті блоку цифрової обробки сигналу. Підключення вимірюваних і еталонних сигналів до входу аналого-цифрового перетворювача (АЦП) здійснюється схемою управління мультиплексора (СУМ), яка реалізує метод вимірювання еталонних напруг для виконання автоматичної корекції.

Буферний підсилювач, включений між мультиплексором і АЦП, вирішує два завдання:

- нормує величину вхідного сигналу;
- високоомний вхід підсилювача зменшує похибку, обумовлену опором відкритих каналів мультиплексора.

Друге не суттєво, оскільки мультиплексор охоплено ланцюгом калібрування і похибка, викликана опором відкритих каналів, компенсується. Істотно більше значення має ідентичність каналів. Зсув і дрейф буферного підсилювача також враховується в циклі калібрування.

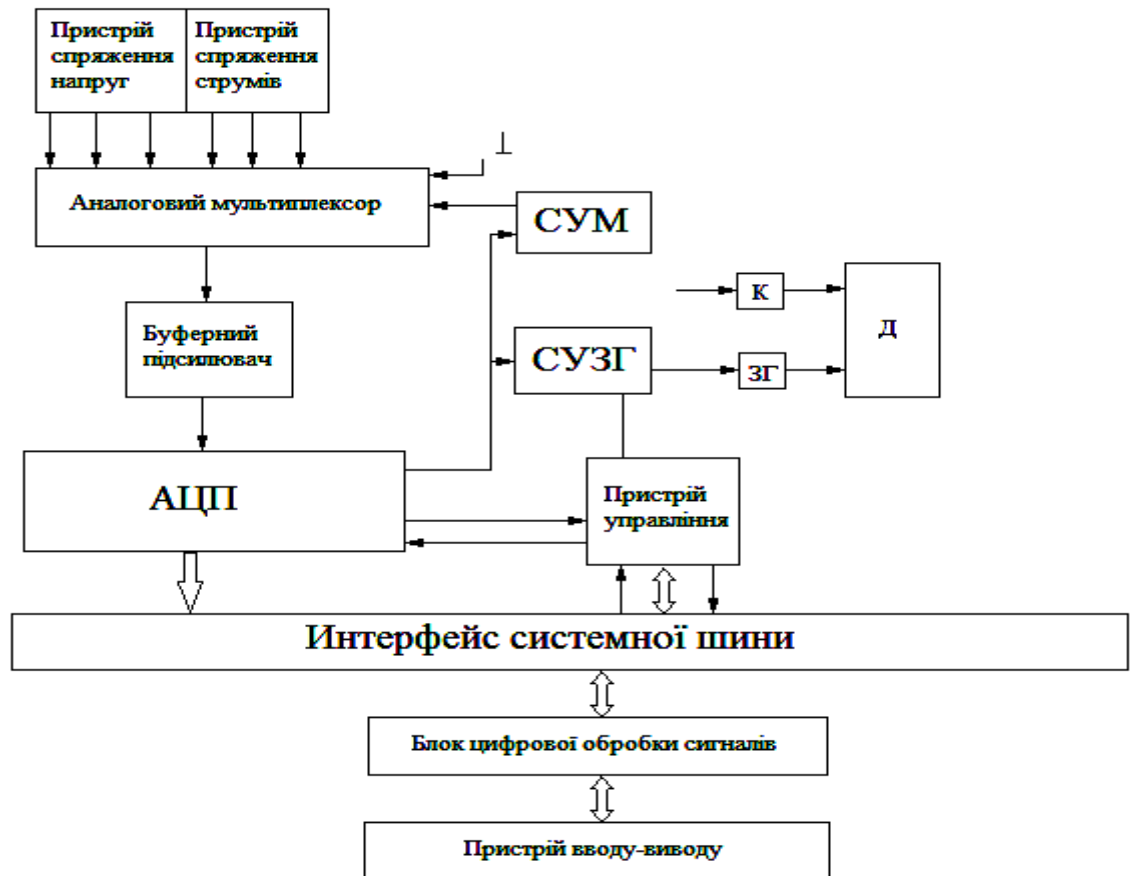


Рис. 3.5 – Структурна схема аналізатора ЯЕ

Модуль дискретизатор (Д) визначає і задає моменти вимірювання вхідних сигналів. Для роботи дискретизатор необхідний опорний сигнал, який простежує період вхідного сигналу. Цей сигнал формується компаратором, на вхід якого подається напруга фази А. Пристрій управління за сигналами з виходу дискретизатор запускає наступний цикл вимірювання. Схема управління задаючим генератором (СУЗГ) забезпечує зниження шуму в колах живлення в процесі аналого-цифрового перетворення.

Інтерфейс системної шини забезпечує взаємодію вимірювального модуля з блоком цифрової обробки сигналів.

Використовуючи в розробленому вимірнику параметрів електричних мереж різні блоки цифрової обробки сигналів, можна отримати декілька модифікацій пристрою. Поточні та кінцеві значення вимірюваних величин виводяться на засоби відображення. За допомогою інтерфейсу типу 118-232 здійснюється передача результатів вимірювання на зовнішній ПК.

Зазначена структурна схема реалізує ряд алгоритмів для розрахунку ПЯЕ за ДЕСТ 13109-97, які реалізуються на базі дискретного перетворення Фур'є.

Повний перелік параметрів та технічних характеристик приладу «АНТЭС АК-3Ф» див. в табл. 2.1 [7].

РОЗДІЛ 4 МЕТОДИ І ЗАСОБИ ЗНИЖЕННЯ НЕСИМЕТРІЇ

Одним з найбільш простих методів зменшення несиметрії напруг (струмів) в ході експлуатації СЕП є вирівнювання струмів фаз природним шляхом, а саме рівномірним розподілом однофазних навантажень по фазах. Але в реальності досягти цього практично не вдається. З цієї причини приходится застосовувати спеціальні методи і засоби симетрування трифазних систем. Одним із шляхів зниження несиметрії напруг є використання більшого перерізу проводів та потужності живлячих трансформаторів. В чотирьохпровідних мережах використовують різні методи зменшення опору нульового проводу. Ці методи неефективні, оскільки вимагають істотної перевитрати дорогих матеріалів. Окрім того, повністю уникнути несиметрії напруги не вдається. Треба також враховувати, що останнім часом електротехнологія зазнала явних змін. Підвищилася кількість однофазних навантажень і зросла потужність одиничних трифазних навантажень.

Більш ефективними є методи усунення несиметрії, основані на застосуванні спеціальних симетрувальних пристроїв (СП), які дозволяють усунути струми нульової і зворотної послідовності.

Методи симетрування можна класифікувати наступним чином:

- перетворювальний метод, заснований на перетворенні видів енергії;
- комутаційний метод, заснований на циклічній комутації однофазного навантаження до фаз мережі;
- фільтровий спосіб, заснований на неоднаковості параметрів по відношенню до електричних складових різних фазових послідовностей;
- компенсаційний метод, заснований на компенсації нульовий і зворотної послідовностей струму (напруги), за допомогою спеціального СП.

У системах електропостачання найбільше використання знайшов компенсаційний метод, що має більш високі технічні показники в порівнянні з іншими: використання уніфікованих засобів, що дозволяють знизити

одночасно з несиметрією струмів (напруг) також рівні вищих гармонік, провести компенсацію реактивної потужності; високі енергетичні показники; можливість симетрування з заданою точністю. Синтез параметрів СП здійснюється виходячи з умов підтримки в допустимих межах несиметрії напруг і струмів при високому коефіцієнті потужності і мінімальній потужності елементів СП.

Симетрувальні пристрої, що використовують компенсаційний метод, можуть бути регульованими і нерегульованими. Протягом побудови цих пристроїв використовуються електричні або електромагнітні зв'язки. При незмінній величині симетруючих елементів може бути забезпечене симетрування лише при одному значенні потужності навантаження. У СЕП зміна параметрів навантаження відбувається постійно, що може призвести до перевищення допустимої несиметрії напруги, тому виникає необхідність застосування СП зі змінними параметрами.

Вирішуючи завдання симетрування, необхідно разом з цим вирішувати питання компенсації реактивної потужності. Враховуючи сказане, можна зробити висновок, що для сучасних СЕП оптимальним є використання уніфікованих симетро-компенсуючих пристроїв, що дозволяють усунути несиметрію напруг (струмів) і компенсувати реактивну потужність в трьох- та чотирьохпровідних мережах при наявності в них нелінійних спотворень і зміни навантаження за випадковим законом.

4.1 Симетрування трифазної мережі з нульовим проводом

Розглянемо трифазну чотирьохпровідну мережу, представлену на рис. 3.1, де система фазних напруг джерела симетрична, а навантаження – несиметричне. У цьому випадку справедливі наступні співвідношення:

$$\underline{U}_A = U; \quad \underline{U}_B = a^2 \cdot U; \quad \underline{U}_C = a \cdot U \quad (4.1)$$

При несиметричному приймачі лінійні струми $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ утворюють несиметричну систему. Нехай вони містять всі три симетричні складові, основні вектори яких визначаються з наступного виразу:

$$\underline{I}_n = \frac{1}{3} (\underline{I}_A + a^n \underline{I}_B + a^{2n} \underline{I}_C) \quad (4.1, a)$$

де a - оператор повороту на 120° ; n - вимірювана послідовність напруг і струмів.

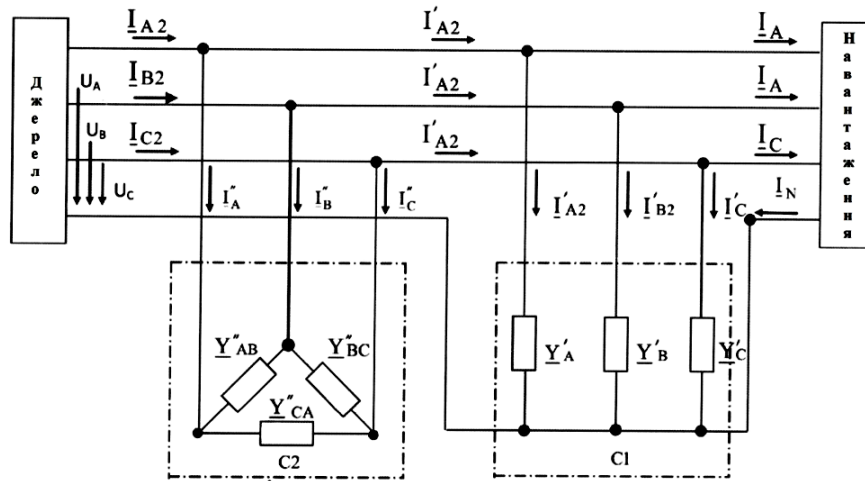


Рис 4.1 – Чотирьохпровідна трифазна мережа з несиметричним навантаженням

Виразимо струми симетрувального пристрою $C1$ через провідності симетрувального пристрою і фазні напруги генератора:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}'_A &= \underline{U}_A \underline{Y}'_A = \underline{U} \underline{Y}'_A; \\ \underline{I}'_B &= \underline{U}_B \underline{Y}'_B = a^2 \underline{U} \underline{Y}'_B; \\ \underline{I}'_C &= \underline{U}_C \underline{Y}'_C = a \underline{U} \underline{Y}'_C; \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

Тоді симетричні складові фазного струму С1 рівні:

$$\left. \begin{aligned} I'_1 &= \frac{1}{3}(I'_A + aI'_B + a^2I'_C) = \frac{1}{3}U(Y'_A + Y'_B + Y'_C); \\ I'_2 &= \frac{1}{3}(I'_A + a^2I'_B + aI'_C) = \frac{1}{3}U(Y'_A + aY'_B + a^2Y'_C); \\ I'_0 &= \frac{1}{3}(I'_A + I'_B + I'_C) = \frac{1}{3}U(Y'_A + a^2Y'_B + aY'_C); \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

У цих виразах введемо такі позначення провідностей:

$$\left. \begin{aligned} Y'_1 &= \frac{1}{3}(Y'_A + aY'_B + a^2Y'_C); \\ Y'_2 &= \frac{1}{3}(Y'_A + a^2Y'_B + aY'_C); \\ Y'_0 &= \frac{1}{3}(Y'_A + Y'_B + Y'_C); \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

З урахуванням введених позначень маємо:

$$I'_1 = UY'_0; \quad I'_2 = UY'_1; \quad I'_0 = UY'_2 \quad (4.5)$$

Для компенсації струму нульової послідовності приймача необхідно створити в симетрувальному пристрої С1 струм, який протилежний за знаком току нульової послідовності навантаження:

$$I'_0 = -I'_0 = -UY'_2 \quad (4.6)$$

Звідки:

$$Y'_2 = -\frac{1}{U}I'_0$$

Ця рівність визначає склад і параметри симетруючого пристрою для компенсації струмів нульової послідовності. Симетруючі елементи, що входять в схему будь-якого симетруючого пристрою, в загальному випадку можуть мати довільний характер. Однак найбільш економічними і які отримали найбільше поширення є симетруючі пристрої з реактивними

елементами. Тому провідності фаз симетруючих пристроїв приймають чисто реактивними:

$$\begin{aligned} Y'_A &= -jb_A; \quad Y'_B = -jb_B; \quad Y'_C = -jb_C; \\ Y''_{AB} &= -jb_{AB}; \quad Y''_{BC} = -jb_{BC}; \quad Y''_{CA} = -jb_{CA}; \end{aligned} \quad (4.7)$$

Знайдемо зв'язок між комплексними провідностями Y'_0 та Y'_1 з одного боку, і комплексної провідності Y'_2 - з іншого, а як наслідок - і струмом нульової послідовності I'_0 - з іншого боку. Для цього введемо спряжені комплекси провідностей СП:

$$Y'^*_A = -Y'_A, \quad Y'^*_B = -Y'_B, \quad Y'^*_C = -Y'_C$$

і спряжений оператор повороту $a = a^2, \quad a^2 = a$

Враховуючи ці співвідношення, запишемо симетричні складові спряжених комплексних провідностей симетрувального пристрою С1:

$$\left. \begin{aligned} Y'^*_1 &= \frac{1}{3} \left(Y'_A + a Y'_B + a^2 Y'_C \right) = \frac{1}{3} (-Y'_A - a^2 Y'_B - a Y'_C) = -Y'_2; \\ Y'^*_2 &= \frac{1}{3} \left(Y'_A + a^2 Y'_B + a Y'_C \right) = \frac{1}{3} (-Y'_A - a Y'_B - a^2 Y'_C) = -Y'_1; \\ Y'^*_0 &= \frac{1}{3} \left(Y'_A + Y'_B + Y'_C \right) = \frac{1}{3} (-Y'_A - Y'_B - Y'_C) = -Y'_0; \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

тобто $Y'^*_0 = -Y'_0, \quad Y'^*_2 = -Y'_1.$

З виразу (4.8) випливає, що провідність Y'_0 не залежить від провідності Y'_2 , а отже, і від складової нульової послідовності I'_0 струму навантаження. Тому провідність Y'_0 може бути задана довільно, наприклад,

$Y'_0 = Y_0$. В той же час провідність Y'_1 залежить від провідності Y'_2 і дорівнює $Y'_1 = Y'^*_2$.

Таким чином, з урахуванням виразу (4.6) можна записати наступні співвідношення для симетричних складових провідностей симетрувального пристрою С1:

$$\left. \begin{aligned} Y'_1 &= \frac{1}{U} I_0^* \\ Y'_2 &= \frac{1}{U} I_0 \\ Y'_1 &= Y_0 \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

Співвідношення (4.9) є системою рівнянь для провідностей СП. Вирішуючи цю систему рівнянь, знаходимо:

$$\left. \begin{aligned} Y'_A &= Y'_0 + Y'_1 + Y'_2 = \frac{1}{U} \left(I_0 + I_0^* \right) + Y_0 = \frac{2j}{U} J_m I_0 + Y_0 \\ Y'_B &= Y'_0 + a^2 Y'_1 + a Y'_2 = -\frac{1}{U} \left(a I_0 + a^2 I_0^* \right) + Y_0 = -\frac{2j}{U} J_m a I_0 + Y_0 \\ Y'_C &= Y'_0 + a Y'_1 + a^2 Y'_2 = -\frac{1}{U} \left(a^2 I_0 + a I_0^* \right) + Y_0 = -\frac{2j}{U} J_m a^2 I_0 + Y_0 \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

Зокрема, якщо домогтися виконання умови $Y'_0 = Y_0 = Y'_A - Y'_B - Y'_C = 0$, то останнього члена в формулах (4.10) не буде. Таким чином, симетрувальний пристрій, параметри якого задовольняють рівняння (4.10), дозволяє повністю компенсувати струми нульової послідовності в трифазній мережі. Провідності фаз симетрувального пристрою можна виразити не тільки через струм нульової послідовності, як це зроблено в формулах (4.10), а й через дійсні струми приймача.

Підставляючи у формули (4.10) співвідношення (4.1, а), отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} Y'_A &= \frac{2j}{3U} J_m (I_A + I_B + I_C) + Y_0 \\ Y'_B &= \frac{2j}{3U} J_m [a(I_A + I_B + I_C)] + Y_0 \\ Y'_C &= \frac{2j}{3U} J_m [a^2(I_A + I_B + I_C)] + Y_0 \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

Для ілюстрації застосування отриманих результатів розглянемо наступні окремі випадки. Як перший приклад розглянемо симетрування струмів чотирьохпровідної трифазної мережі при однофазному активному приймачі. Нехай до фази А чотирьохпровідної трифазної мережі підключена навантаження з провідністю g . Струм приймача дорівнює:

$$I_A = U_A g = U_g,$$

$$\text{а струм нульової послідовності: } I_0 = \frac{1}{3} I_A = \frac{1}{3} U_g.$$

Підставляючи це рівність у вираз (4.10) і поклавши визначимо провідності фаз симетрувального пристрою:

$$\left. \begin{aligned} Y'_A &= \frac{2j}{3U} J_m \frac{1}{3} U_g \\ Y'_B &= \frac{2j}{3U} J_m a \frac{1}{3} U_g = -\frac{j}{\sqrt{3}} g \\ Y'_C &= \frac{2j}{3U} J_m a^2 \frac{1}{3} U_g = \frac{j}{\sqrt{3}} g \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

З отриманих співвідношень (4.7) і (4.12) випливає, що провідності симетруючого пристрою в фазі А повинні бути рівні нулю ($g_A = 0$), а провідності в фазах В і С – рівні за модулем $|g_B| = |g_C| = g/\sqrt{3}$, але мати різний характер: у фазі В – виключно індуктивна, у фазі С – виключно

ємнісна. Схема включення елементів симетруючого пристрою показана на рис.4.2.

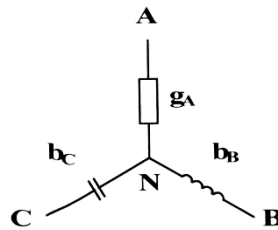


Рис.4.2 – Симетрування чотирьохпровідної трифазної мережі при активному навантаженні

У другому прикладі розглянемо симетрування струмів в чотирьохпровідній мережі при двофазному активному приймачі. Нехай до фаз А і В чотирьохпровідної мережі підключені приймачі, провідності яких g_A і g_B показані на рис. 4.3.

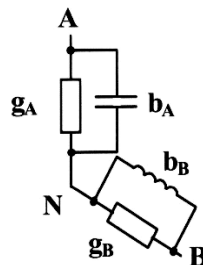


Рис. 4.3 – Симетрування чотирьохпровідної трифазної мережі при двофазній активному навантаженні

Струми в навантаженнях рівні:

$$I_A = U_A g_A = U_{g_A}; I_B = U_B g_B = a^2 U_{g_B}$$

Тоді струм нульової послідовності дорівнює:

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_A + I_B) = \frac{U}{3}(g_A + a^2 g_B).$$

Підставляючи цю рівність у вираз (4.10) за умови, що $X = 0$, отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} Y'_A &= -\frac{2j}{3U} J_m \frac{U}{3} (g_A + a^2 g_B) = -\frac{j}{\sqrt{3}} g_B \\ Y'_B &= \frac{2j}{3U} J_m \frac{U}{3} (a g_A + g_B) = -\frac{j}{\sqrt{3}} g_A \\ Y'_C &= \frac{2j}{3U} J_m \frac{U}{3} (a^2 g_A + a g_B) = \frac{j}{\sqrt{3}} (g_A - g_B) \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$

З виразу (4.7) і (4.13) випливає, що провідності елементів симетруючого пристрою зв'язані з провідностями навантажень рівняннями:

$$g_A = -\frac{g_B}{\sqrt{3}}; \quad g_B = \frac{g_C}{\sqrt{3}}; \quad g_C = -\frac{(g_A + g_B)}{\sqrt{3}}.$$

Таким чином, провідність фази А має ємнісний характер, провідність фази В – індуктивний; характер провідності фази С залежить від співвідношення провідностей приймачів. Так, якщо провідності приймачів рівні ($g_A = g_B$), то $g_C = 0$. Схема симетруючого пристрою для цього випадку наведена на рис.4.3. Якщо провідність навантаження фази А більше, ніж провідність навантаження фази В, то в фазу С симетруючого пристрою повинна бути включена ємнісна провідність. Якщо ж навпаки, то у фазу С симетруючого пристрою необхідно включити індуктивну провідність.

Схеми симетруючих пристроїв, отримані для розглянутих вище приватних випадків однофазного і двофазного активних навантажень, підтверджують справедливність запропонованої методики [15]. Отримані вирази (4.11) застосовні не тільки в окремих випадках, але і в загальному випадку, для якого відомих формул немає.

4.2 Симетрування трифазних трьохпровідних мереж

Вважаймо, що лінійні струми джерела $\underline{I}_{A2}, \underline{I}_{B2}, \underline{I}_{C2}$ не містять струмів нульової послідовності, які або відсутні зовсім, або компенсовані симетруючим пристроєм С1 нульової послідовності, представленим на рис. 4.1. У той же час ці струми мають складові прямої і зворотної послідовностей. Виразимо основні вектори цих складових струмів генератора через основні вектори симетричних складових струмів навантаження і симетруючого пристрою:

$$\underline{I}_{\varepsilon 1} = \underline{I}_1 + \underline{I}'_1; \quad \underline{I}_{\varepsilon 2} = \underline{I}_2 + \underline{I}'_2$$

Підставляючи сюди вирази (4.5) для струмів $\underline{I}'_1, \underline{I}'_2$ та враховуючи рівність $UY'_1 = I_0^*$ з виразу (4.9) отримаємо:

$$\underline{I}'_{\varepsilon 1} = \underline{I}_1 + UY'_0; \quad \underline{I}'_{\varepsilon 2} = \underline{I}_2 + UY'_1 = \underline{I}_2 + I_0^* \quad (4.14)$$

Очевидно, що якщо забезпечити $Y'_0 = 0$, то компенсація струмів нульової послідовності не міняє струму прямої послідовності, тобто $\underline{I}'_{\varepsilon 1} = \underline{I}_1$. Виразимо лінійні струми симетрувального пристрою $\underline{I}''_A, \underline{I}''_B, \underline{I}''_C$ через фазні напруги джерела і провідності фаз симетрувального пристрою:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}''_A &= \underline{I}_{AB} + \underline{I}_{AC} = Y''_{AB} \underline{U}_{AB} + Y''_{AC} \underline{U}_{AC} = Y''_{AB} (\underline{U}_A - \underline{U}_B) + Y''_{AC} (\underline{U}_A - \underline{U}_C); \\ \underline{I}''_B &= \underline{I}_{BA} + \underline{I}_{BC} = Y''_{BC} \underline{U}_{BA} + Y''_{CB} \underline{U}_{BC} = Y''_{AB} (\underline{U}_B - \underline{U}_C) + Y''_{BC} (\underline{U}_A - \underline{U}_C); \\ \underline{I}''_C &= \underline{I}_{CA} + \underline{I}_{CB} = Y''_{CA} \underline{U}_{CA} + Y''_{CB} \underline{U}_{CB} = Y''_{CA} (\underline{U}_C - \underline{U}_A) + Y''_{BC} (\underline{U}_C - \underline{U}_B); \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

Вважаючи, що фазні напруги джерела створюють симетричну систему,

представимо $U_A = U; U_B = a^2 U; U_C = aU$ в рівняннях (4.15) і після нескладних перетворень отримаємо:

$$\begin{aligned} I_A'' &= U \left[(1 - a^2) Y_{AB}'' + (1 - a) Y_{CA}'' \right] = U (1 - a) (Y_{CA}'' - a^2 Y_{AB}''); \\ I_B'' &= U \left[(a^2 - 1) Y_{AB}'' + (a^2 - a) Y_{BC}'' \right] = U (1 - a) (a^2 Y_{AB}'' - a Y_{BC}''); \\ I_C'' &= U \left[(a - 1) Y_{CA}'' + (a - a^2) Y_{BC}'' \right] = U (1 - a) (-Y_{AC}'' + a Y_{BC}''); \end{aligned} \quad (4.16)$$

Визначимо основні вектори струмів прямої $\underline{I}_1''$ і зворотної $\underline{I}_2''$ послідовностей симетруючого пристрою С2:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1'' &= \frac{1}{3} (\underline{I}_A'' + a \underline{I}_B'' + a^2 \underline{I}_C'') = \frac{1}{3} U (1 - a) \left[Y_{CA}'' - a^2 Y_{AB}'' + a (a^2 Y_{AB}'' - a Y_{BC}'') + a^2 (-Y_{CA}'' + a Y_{BC}'') \right] = \\ &= \frac{1}{3} U (1 - a) (1 - a^2) (Y_{AB}'' + Y_{BC}'' + Y_{CA}''); \\ \underline{I}_2'' &= \frac{1}{3} (\underline{I}_A'' + a^2 \underline{I}_B'' + a \underline{I}_C'') = \frac{1}{3} U (1 - a) \left[Y_{CA}'' - a^2 Y_{AB}'' + a^2 (a^2 Y_{AB}'' - a Y_{BC}'') + a (-Y_{CA}'' + a Y_{BC}'') \right] = \\ &= \frac{1}{3} U (1 - a)^2 (Y_{CA}'' + a^2 Y_{BC}'' + a Y_{CA}'') = -U \cdot a (Y_{CA}'' + a^2 Y_{BC}'' + a Y_{CA}''). \end{aligned}$$

У цих виразах врахуємо, що:

$$(1 - a) = j\sqrt{3}a^2; (1 - a^2) = j\sqrt{3}a; (1 - a)(1 - a^2) = 3; (1 - a)^2 = 3a$$

Введемо наступні позначення:

$$\begin{aligned} Y_0'' &= \frac{1}{3} (Y_{BC}'' + Y_{CA}'' + Y_{AB}''); \\ Y_1'' &= \frac{1}{3} (Y_{BC}'' + a Y_{CA}'' + a^2 Y_{AB}''); \end{aligned} \quad (4.17)$$

де Y_0'' та Y_1'' - нульова і пряма послідовності провідностей симетруючого пристрою С2.

Остаточно отримаємо:

$$\underline{I}_1'' = \frac{1}{3}U \cdot 3(Y_{BC}'' + Y_{CA}'' + Y_{AB}'') = 3U \cdot Y_0''; \quad (4.18)$$

$$\underline{I}_2'' = -U \cdot (Y_{BC}'' + aY_{CA}'' + a^2Y_{AB}'') = -3U \cdot Y_0''; \quad (4.19)$$

Запишемо вирази для основних векторів симетричних складових струмів генератора:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{e1} &= \underline{I}_{e1}' + \underline{I}_1'', \\ \underline{I}_{e2} &= \underline{I}_{e2}' + \underline{I}_2''. \end{aligned}$$

Підставляючи в ці рівності вирази (3.14), (3.18) і (3.19), отримаємо:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{e1} &= \underline{I}_1 + UY_0' + \underline{I}_1'' = \underline{I}_1 + U(Y_0' - 3Y_0''); \\ \underline{I}_{e2} &= \underline{I}_2 + I_0^* - 3UY_1''. \end{aligned} \quad (4.20)$$

З умови компенсації струмів зворотної послідовності отримаємо перше з рівнянь для визначення параметрів симетруючого пристрою С2:

$$Y_1'' = \frac{1}{3U} \left(\underline{I}_2 + I_0^* \right) \quad (4.21)$$

Друге рівняння отримаємо, склавши співвідношення

$$Y_2'' = \frac{1}{3} \left(Y_{BC}'' + a^2Y_{CA}'' + aY_{AB}'' \right), \text{ звідки:}$$

$$-Y_2'' = Y_1'' = \frac{1}{3U} \left(I_2^* + I_0^* \right) \quad (4.22)$$

Співвідношення (4.22) є другим рівнянням для визначення параметрів симетрувального пристрою С2.

Третє рівняння знайдемо, взявши провідність Y_0'' довільно. Тоді третє рівняння можна записати так:

$$Y_0'' = Y_0'' \quad (4.23)$$

Запишемо окремо отриману систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} Y_1'' &= \frac{1}{3U} \left(\underline{I}_2 + I_0^* \right); \\ Y_2'' &= \frac{1}{3U} \left(I_2^* + \underline{I}_0 \right); \\ Y_0'' &= Y_0'' \end{aligned} \right\} \quad (4.24)$$

Враховуючи, що являють собою симетричні складові комплексної провідності, виразимо провідності симетруючого пристрою $Y_{BC}'', Y_{CA}'', Y_{AB}''$ через Y_1'', Y_2'', Y_0'' :

$$\left. \begin{aligned} Y_{BC}'' &= Y_1'' + Y_2'' + Y_0'' \\ Y_{CA}'' &= a^2 Y_1'' + a Y_2'' + Y_0'' \\ Y_{AB}'' &= a Y_1'' + a^2 Y_2'' + Y_0'' \end{aligned} \right\}$$

Підставляючи в ці вирази формули (4.24) і перетворюючи, одержимо:

$$\left. \begin{aligned} Y_{BC}'' &= \frac{1}{3U} \left(\underline{I}_2 - I_2^* + I_0^* - \underline{I}_0 \right) + Y_0'' = \frac{j}{3U} J_m (2\underline{I}_2 - 2I_0) + Y_0'' \\ Y_{CA}'' &= \frac{1}{3U} \left[a^2 \left(\underline{I}_2 + I_2^* \right) + a \left(I_2^* + \underline{I}_0 \right) \right] + Y_0'' = \frac{j}{3U} J_m (2a^2 \underline{I}_2 - 2a I_0) + Y_0'' \\ Y_{AB}'' &= \frac{1}{3U} \left[a \left(\underline{I}_2 + I_2^* \right) - a^2 \left(I_2^* + \underline{I}_0 \right) \right] + Y_0'' = \frac{j}{3U} J_m (2a \underline{I}_2 - 2a^2 I_0) + Y_0'' \end{aligned} \right\} \quad (4.25)$$

Запишемо вирази (4.25) у наступному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} Y_{BC}'' &= \frac{2j}{3U} J_m (\underline{I}_2 - \underline{I}_0) + Y_0''; \\ Y_{CA}'' &= \frac{2j}{3U} J_m (a^2 \underline{I}_2 - a \underline{I}_0) + Y_0''; \\ Y_{AB}'' &= \frac{2j}{3U} J_m (a \underline{I}_2 - a^2 \underline{I}_0) + Y_0''; \end{aligned} \right\} \quad (4.26)$$

Вирази (4.26) дозволяють визначити параметри симетруючого пристрою за струмами $\underline{I}_0$ та $\underline{I}_2$. Так як компенсація струмів нульової та зворотної послідовностей здійснюється симетруючим пристроєм з реактивними елементами, то може змінитися коефіцієнт потужності мережі. Вирази (4.26), залежно від вибору, дозволяють здійснити симетрування із заданими коефіцієнтами потужності.

Розглянемо випадок, коли поряд з симетрування, здійснюється компенсація реактивної потужності, тобто $\cos \varphi = 1$. У цьому випадку вираз (4.26) повинен бути вибраний з умови компенсації реактивної потужності навантаження. Для цього запишемо вираз комплексу повної потужності через симетричні складові:

$$\tilde{S} = \underline{U}_A^* I_{A2} + \underline{U}_B^* I_{B2} + \underline{U}_C^* I_{C2} = U \left(I_{A2}^* + a^2 I_{B2}^* + a I_{C2}^* \right) = 3U I_{\epsilon 1}^*$$

Звідси реактивна потужність дорівнює $Q = J_m \tilde{S} = 3U J_m I_{\epsilon 1}^*$. З умови компенсації реактивної потужності $Q = 0$ отримаємо $J_m I_{\epsilon 1}^* = 0$. Підставляючи сюди вираз для $I_{\epsilon 1}^*$ (4.20), маємо $J_m [\underline{I}_1 + U(Y_0' + 3Y_0'')] = 0$, звідки:

$$J_m (Y_0' + 3Y_0'') = \frac{1}{U} J_m \underline{I}_1.$$

Так як провідності $Y_{BC}'', Y_{CA}'', Y_{AB}''$ чисто реактивні, то їх комплекси є уявними, отже:

$$\begin{aligned}
Y'_0 + 3Y''_0 &= -\frac{j}{U} J_m I_1; \\
Y''_0 &= -\frac{j}{3U} J_m I_1 - \frac{1}{3} Y'_0
\end{aligned}
\tag{4.27}$$

Співвідношення (4.27) є умовою компенсації реактивного навантаження. Підставивши (4.27) у вираз (4.26), запишемо останнє в наступному вигляді:

$$\left. \begin{aligned}
Y''_{BC} &= \frac{j}{3U} J_m (2I_2 - I_1) - \frac{2j}{3U} J_m I_0 - \frac{1}{3} Y'_0; \\
Y''_{CA} &= \frac{j}{3U} J_m (2a^2 I_2 - I_1) - \frac{2j}{3U} J_m a I_0 - \frac{1}{3} Y'_0; \\
Y''_{AB} &= \frac{j}{3U} J_m (2a I_2 - I_1) - \frac{2j}{3U} J_m a^2 I_0 - \frac{1}{3} Y'_0;
\end{aligned} \right\}
\tag{4.28}$$

Підставляючи у вираз (4.28) співвідношення, отримані з формул (4.11), маємо:

$$\left. \begin{aligned}
\frac{2j}{3U} J_m I_0 &= \frac{-Y'_A + Y'_0}{3}; \\
\frac{2j}{3U} J_m a I_0 &= \frac{-Y'_B + Y'_0}{3}; \\
\frac{2j}{3U} J_m a^2 I_0 &= \frac{-Y'_C + Y'_0}{3}
\end{aligned} \right\}$$

Матимемо:

$$\left. \begin{aligned}
Y''_{BC} &= \frac{j}{3U} J_m (2I_2 - I_1) + \frac{1}{3} Y'_A - \frac{2}{3} Y'_0; \\
Y''_{CA} &= \frac{j}{3U} J_m (2a^2 I_2 - I_1) + \frac{1}{3} Y'_B - \frac{2}{3} Y'_0; \\
Y''_{AB} &= \frac{j}{3U} J_m (2a I_2 - I_1) + \frac{1}{3} Y'_C - \frac{2}{3} Y'_0;
\end{aligned} \right\}
\tag{4.29}$$

Вирази (4.29) повністю вирішують задачу визначення параметрів симетруючого пристрої для компенсації, як струмів зворотної послідовності,

так і реактивної потужності несиметричної трифазної мережі. Для цього потрібно визначити діюче значення фазної напруги, симетричні складові струмів прямої і зворотної послідовностей навантаження і параметри симетруючого пристрою для компенсації складової нульової послідовності. Якщо компенсація реактивної потужності не потрібна, то параметри не залежать від струму прямої послідовності і у виразах (4.29) у якості $\underline{I}_1$ можна взяти будь комплексне число.

При відсутності нульового проводу $\underline{I}_0 = 0$ симетруючий пристрій струмів нульової послідовності не потрібний, тобто можна вважати, що $Y'_A = Y'_B = Y'_C = Y'_0 = 0$. Тоді вирази (4.29) для визначення параметрів симетруючого пристрою для компенсації струмів зворотної послідовності значно спрощуються і приймають такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} Y''_{BC} &= \frac{j}{3U} J_m (2\underline{I}_2 - \underline{I}_1); \\ Y''_{CA} &= \frac{j}{3U} J_m (2a^2 \underline{I}_2 - \underline{I}_1); \\ Y''_{AB} &= \frac{j}{3U} J_m (2a \underline{I}_2 - \underline{I}_1); \end{aligned} \right\} \quad (4.30)$$

Виразимо провідності фаз симетрувального пристрою С2 через лінійні струми приймача. Для цього у виразі (4.29) підставимо співвідношення (4.1, а) і виконаємо відповідні перетворення. Наприклад, для провідності Y''_{BC} маємо:

$$Y''_{BC} = \frac{j}{3U} J_m (a^2 \underline{I}_B + a \underline{I}_C + \underline{I}_0) + \frac{1}{3} Y'_A - \frac{2}{3} Y'_0$$

Враховуючи в цьому виразі, що $\frac{j}{3U} J_m \underline{I}_0 = \frac{-Y'_A + Y'_0}{6}$, отримаємо:

$$Y_{BC}'' = \frac{j}{3U} J_m (a^2 \underline{I}_B + a \underline{I}_C) + \frac{Y'_A}{6} - \frac{Y'_0}{2}.$$

Аналогічно можуть бути отримані вирази і для інших двох провідностей симетрувального пристрою С2:

$$Y_{CA}'' = \frac{j}{3U} J_m (a^2 \underline{I}_A + a \underline{I}_C) + \frac{Y'_B}{6} - \frac{Y'_0}{2};$$

$$Y_{AB}'' = \frac{j}{3U} J_m (a^2 \underline{I}_A + a \underline{I}_B) + \frac{Y'_C}{6} - \frac{Y'_0}{2};$$

Підставляючи $Y'_0 = \frac{1}{3}(Y'_A + Y'_B + Y'_C)$, остаточно маємо:

$$\left. \begin{aligned} Y_{BC}'' &= \frac{j}{3U} J_m (a^2 \underline{I}_B + a \underline{I}_C) - \frac{1}{6}(Y'_B + Y'_C); \\ Y_{CA}'' &= \frac{j}{3U} J_m (a^2 \underline{I}_A + a \underline{I}_C) - \frac{1}{6}(Y'_C + Y'_A); \\ Y_{AB}'' &= \frac{j}{3U} J_m (a^2 \underline{I}_A + a \underline{I}_B) - \frac{1}{6}(Y'_A + Y'_B); \end{aligned} \right\} \quad (4.31)$$

Розглянемо окремі випадки ілюстраційного застосування запропонованої методики визначення параметрів симетрувального пристрою для компенсації струмів зворотної послідовності в трифазних мережах.

Як приклад візьмемо активне однофазне навантаження і синтезуємо для цього випадку параметри симетрувального пристрою. Нехай активний однофазний приймач, провідність якого позначимо g , ввімкнений між фазами А і В, як показано на рис. 4.4. При такому включенні лінійні струми навантаження рівні: $\underline{I}_A = \underline{I}_B = \underline{U}_{AB}g$; $\underline{I}_C = 0$. Знаходимо основні вектори струмів прямої і зворотної послідовностей:

$$\underline{I}_1 = \frac{1}{3}(\underline{I}_A + a \underline{I}_B) = \frac{1}{3}(\underline{U}_{AB}g - a \underline{U}_{AB}g) = \frac{1}{3}(1 - a \underline{U}_A - \underline{U}_B)g = \frac{1}{3}(1 - a) \cdot (1 - a^2) \underline{U}_g;$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(\underline{I}_A + a^2 \underline{I}_B) = \frac{1}{3}(1 - a^2)^2 \underline{U}_g$$

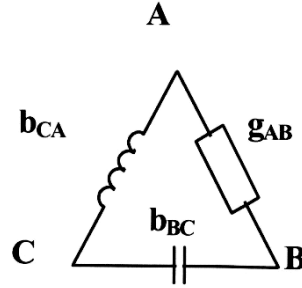


Рис. 4.4 – Симетрування трьохпровідної трьохфазної мережі з однофазним активним навантаженням

Враховуючи, що $(1-a)(1-a^2)=3$ і $(1-a^2)=-3a^2$, отримаємо:

$$\underline{I}_1 = \underline{U}g; \quad \underline{I}_2 = a^2 \underline{U}g \quad (4.32)$$

Підставивши співвідношення (4.32) у вирази (4.30), отримаємо провідності фаз симетрувального пристрою:

$$\left. \begin{aligned} Y_{BC}'' &= \frac{j}{3U} J_m (-2a^2 \underline{U}g - \underline{U}g) = \frac{j}{\sqrt{3}} g; \\ Y_{CA}'' &= \frac{j}{3U} J_m (-2a \underline{U}g - \underline{U}g) = -\frac{j}{\sqrt{3}} g; \\ Y_{AB}'' &= \frac{j}{3U} J_m (-2 \underline{U}g - \underline{U}g) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.33)$$

З виразів (4.33) випливає, що, $|b_{BC}| = b_{CA} = \frac{g}{\sqrt{3}}$; $b_{BA} = 0$, причому провідність b_{CA} має індуктивний характер. Одержаний індуктивно-ємнісний компенсатор зворотної послідовності є відомою схемою Штеймеца, що складається з конденсаторної батареї і дроселя (рис. 4.4).

У другому прикладі здійснимо синтез параметрів симетрувального

пристрою для компенсації струмів зворотної послідовності при двофазному активному приймачі та відсутності струмів нульової послідовності. Нехай двофазний активний приймач підключений до трифазної мережі рис.4.5

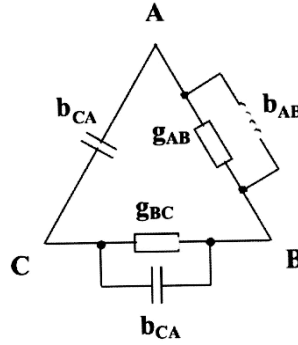


Рис. 4.5 – Схема симетрувального пристрою

Провідності фаз приймача позначимо через b_{AB} і b_{BC} відповідно. Визначимо параметри симетрувального пристрою для компенсації струмів зворотної послідовності, обумовлених несиметрією, що викликається такими навантаженнями. Запишемо вирази для лінійних струмів навантаження:

$$\begin{aligned}
 \underline{I}_A &= \underline{I}_{AB} = \underline{U}_{AB} g_{AB} = (\underline{U}_A - \underline{U}_B) g_{AB}; \\
 \underline{I}_C &= \underline{I}_{BC} = -\underline{U}_{BC} g_{BC} = (\underline{U}_B - \underline{U}_C) g_{BC}; \\
 \underline{I}_B &= \underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB} = \underline{U}_{BC} g_{BC} - \underline{U}_{AB} g_{AB} = (\underline{U}_B - \underline{U}_C) g_{BC} - (\underline{U}_A - \underline{U}_B) g_{AB};
 \end{aligned}
 \tag{4.34}$$

Отримаємо співвідношення для основних векторів симетричних складових струмів навантаження. Для цього підставимо вирази (4.34) у формули (4.1, а) для $\underline{I}_1$ та $\underline{I}_2$:

$$\begin{aligned}
 \underline{I}_1 &= \frac{1}{3} \{ (\underline{U}_A - \underline{U}_B) g_{AB} + d [(\underline{U}_B - \underline{U}_C) g_{BC} - (\underline{U}_A - \underline{U}_B) g_{AB}] + a^2 (\underline{U}_C - \underline{U}_B) g_{BC} \}; \\
 \underline{I}_2 &= \frac{U}{3} [(1 - a^2) g_{AB} + a^2 (a^2 - a) g_{BC} - a^2 (1 - a^2) g_{AB} + a (a - a^2) g_{BC}].
 \end{aligned}$$

Перетворивши ці вирази, отримаємо:

$$I_1 = \frac{U}{3}(g_{AB} + g_{BC})(2 - a - a^2);$$

$$I_2 = \frac{U}{3}[a(a-1)^2 g_{AB} - 3g_{BC}].$$

Враховуючи, що $2 - a - a^2 = 3$; $a(a-1)^2 = 3 - a^2$ остаточно маємо:

$$I_1 = U(g_{AB} + g_{BC});$$

$$I_2 = \frac{U}{3}[(3 - a^2)g_{AB} - 3g_{BC}].$$

Підставляючи ці співвідношення у формули (4.30), отримаємо вирази для визначення провідностей фаз симетрувального пристрою:

$$Y_{BC}'' = \frac{j}{9} J_m (2g_{AB} - 4a^2 g_{AB} + 2g_{AB} - 18g_{BC});$$

$$Y_{CA}'' = \frac{j}{9} J_m (2a^2 g_{AB} - 4ag_{AB} + 2g_{AB} - 6g_{BC});$$

$$Y_{BC}'' = \frac{j}{9} J_m (2ag_{AB} - 4ag_{AB} + 2a^2 g_{AB} - 6ag_{BC});$$

Перетворивши ці вирази, остаточно матимемо:

$$\left. \begin{aligned} Y_{BC}'' &= \frac{j}{\sqrt{3}} g_{AB}; \\ Y_{BC}'' &= \frac{j}{\sqrt{3}} (g_{AB} - g_{BC}); \\ Y_{BC}'' &= -\frac{j}{\sqrt{3}} g_{BC}; \end{aligned} \right\} \quad (4.35)$$

Таким чином, реактивні провідності фаз симетрувального пристрою пов'язані з провідностями двофазного навантаження наступними рівняннями:

$$b_{AB} = \frac{g_{BC}}{\sqrt{3}}; \quad b_{BC} = -\frac{g_{AB}}{\sqrt{3}}; \quad b_{CA} = -\frac{(g_{AB} - g_{BC})}{\sqrt{3}}.$$

Тобто провідність b_{BC} повинна мати ємнісний характер, провідність b_{AB} - індуктивний, а провідність b_{CA} залежить від співвідношення провідностей

навантаження. Якщо $b_{BC} > b_{AB}$, то провідність b_{CA} має ємнісний характер, а якщо $b_{BC} < b_{AB}$, то індуктивний. У тому випадку, коли провідності навантажень рівні ($b_{BC} = b_{AB}$), $b_{CA} = 0$. Схеми симетрувальних пристроїв для розглянутих випадків представлені на рис. 4.5, 4.6, 4.7.

У якості третього прикладу цікаво розглянути синтез параметрів симетрувального пристрою компенсації струмів нульової і зворотної послідовностей чотирьохпровідної трифазної мережі. Нехай у чотирьохпровідній трифазній мережі навантажені дві лінійні і дві фазні напруги активним навантаженням. Виразимо лінійні струми через провідності приймачів:

$$\underline{I}_A = \underline{I}'_A + \underline{I}_{AB} = \underline{U}_A g_A + \underline{U}_{AB} g_{AB} = U [g_A + g_{AB} (1 - a^2)];$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB} = (\underline{U}_B - \underline{U}_C) g_{BC} + (\underline{U}_B - \underline{U}_A) g_{AB} = U [(a^2 - a) g_{BC} + (a^2 - 1) g_{AB}];$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_C - \underline{I}_{AB} = \underline{U}_C g_C + (\underline{U}_C - \underline{U}_B) g_{BC} = U [a g_{BC} + (a - a^2) g_{BC}].$$

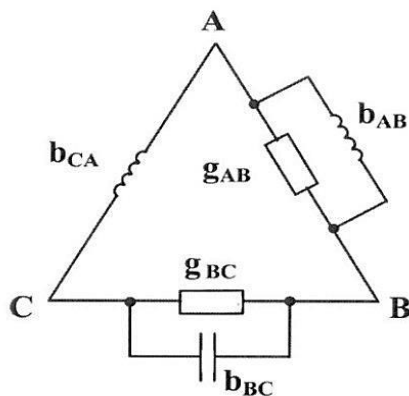


Рис. 4.6 – Схема симетрувального пристрою

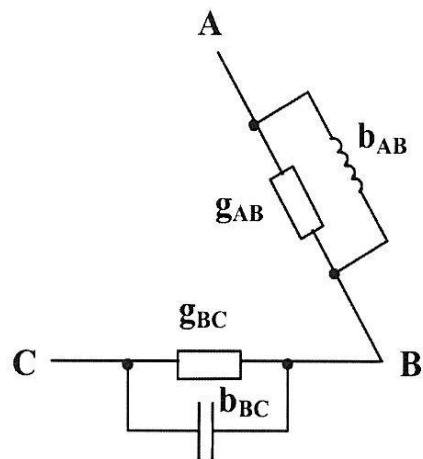


Рис. 4.7 – Схема симетрувального пристрою

Знайдемо співвідношення для основних векторів симетричних складових струмів розглянутої СЕП. Для цього підставимо співвідношення (4.36) у вирази (4.1, а):

$$I_0 = \frac{U}{3} \left[g_A + (1-a^2)g_{AB} + (a^2-a)g_{BC} + (a^2-1)g_{AB} + ag_C + (a-a^2)g_{BC} \right];$$

$$I_1 = \frac{U}{3} \left[g_A + (1-a^2)g_{AB} + (1-a^2)g_{BC} + (1-a)g_{AB} + g_C + (1-a)g_{BC} \right];$$

$$I_2 = \frac{U}{3} \left[g_A + (1-a^2)g_{AB} + (a-1)g_{BC} + (a-a^2)g_{AB} + a^2g_C + (a^2-1)g_{BC} \right];$$

Перетворивши ці вирази, отримаємо наступні формули:

$$I_0 = \frac{U}{3} (g_A + ag_C);$$

$$I_1 = \frac{U}{3} (g_A + g_C + 3g_{BC} + 3g_{AB});$$

$$I_2 = \frac{U}{3} (g_A - 3g_{BC} - 3a^2g_{AB} + a^2g_C).$$

Підставляючи ці вирази у формули (3.29), отримаємо:

$$Y_{BC}'' = \frac{j}{3U} J_m \left[\frac{U}{3} (2g_A - 6g_{BC} - 6a^2g_{AB} + 2a^2g_C - 2g_A - 2g_C - g_A - g_C - 3g_{BC} - 3g_{AB}) \right];$$

$$Y_{CA}'' = \frac{j}{3U} J_m \left[\frac{U}{3} (2a^2g_A - 6a^2g_{BC} - 6ag_{AB} + 2ag_C - 2ag_A - 2ag_C - g_A - g_C - 3g_{BC} - 3g_{AB}) \right];$$

$$Y_{AB}'' = \frac{j}{3U} J_m \left[\frac{U}{3} (2ag_A - 6ag_{BC} - 6g_{AB} + 2g_C - 2a^2g_A - 2g_C - g_A - g_C - 3g_{BC} - 3g_{AB}) \right].$$

Остаточно ці вирази для визначення параметрів симетрувального пристрою набувають наступний вигляд:

$$\left. \begin{aligned} Y''_{BC} &= \frac{j}{3\sqrt{3}}(3g_{AB} - 2g_C); \\ Y''_{CA} &= \frac{j}{3\sqrt{3}}(-2g_A + 2g_C + 3g_{BC} - 3g_{AB}); \\ Y''_{AB} &= \frac{j}{3\sqrt{3}}(2g_A - 3g_{BC}); \end{aligned} \right\} \quad (4.37)$$

З виразів (4.37) випливає, що провідності елементів симетрувального пристрою зв'язані з провідностями навантаження наступними виразами:

$$\begin{aligned} b_{AB} &= -\frac{2g_A - 3g_{BC}}{3\sqrt{3}}; \\ b_{BC} &= -\frac{3g_{AB} - 2g_C}{3\sqrt{3}}; \\ b_{CA} &= -\frac{-2g_A + 2g_{BC} - 3g_{AB}}{3\sqrt{3}}. \end{aligned}$$

Звідси видно, що провідності елементів симетрувального пристрою в залежності від співвідношення провідностей навантаження можуть мати різний характер. В якості прикладу, в табл. 4.1 зазначено характер елементів симетрувального пристрою для різних співвідношень провідностей навантажень, а на рис. 4.8 наведені схеми симетрувальних пристроїв для розглянутих випадків.

Наведені приклади наочно показують, наскільки спрощується синтез параметрів симетрувального пристрою за розробленою методикою.

Таблиця 4.1 – Приклади синтезу схем симетруючого пристрою

№ п/п	Співвідношення провідностей	Характеристика провідностей симетруючого пристрою			Рис.
1	$g_{BC}=g_{AB}=g_A=g_C$	Індикт.	0	Ємнісн.	3.8,а
2	$g_A>g_C=1,5g_{BC}<1,5g_{AB}$	Ємнісн.	Індикт.	Індукт.	3.8,б
3	$g_A=g_C<1,5g_{BC}>1,5g_{AB}$	Ємнісн.	0	Індукт.	3.8,в
4	$g_{AB}=g_{BC}>g_C>g_A$	Індукт.	Ємнісн.	Ємнісн.	3.8,г
5	$g_{AB}=g_{BC}>g_C>g_A$	Індукт.	Ємнісн.	Ємнісн.	3.8,д
6	$1,5g_{AB}>g_A=g_C<1,5g_{BC}$	Ємнісн.	Індукт.	Ємнісн.	3.8,ж

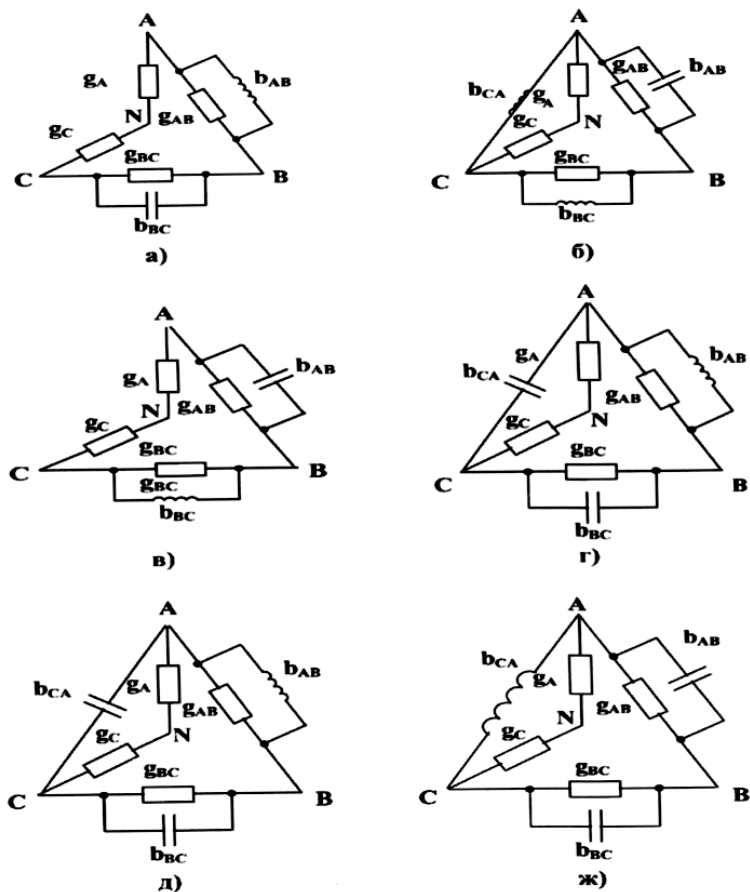


Рис.4.8 – Симетрування трифазних мереж при різних співвідношеннях провідностей навантажень

4.3 Методи симетрування трифазних мереж по потужності

У попередніх розділах були запропоновані методи симетрування трифазних мереж, засновані на використанні як інформаційних властивостей чи симетричні складові струмів навантаження, або діючі значення цих струмів. У даному розділі досліджена можливість симетрування систем електропостачання, якщо в якості інформаційних параметрів обрані потужності фаз. Використовуючи вираз (4.11), висловимо комплексні провідності симетрувального пристрою для компенсації струмів нульової послідовності через комплекси повної потужності фаз навантаження.

Для цього, перші члени правої частини кожного з рівнянь (4.11) помножимо і розділимо на U та врахуємо, що $\text{Im } \dot{I} = -\text{Im } I^*$. Тоді отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} Y'_A &= \frac{2j}{3U^2} J_m \left(U I_A^* + U I_B^* + U I_C^* \right) + Y'_0; \\ Y'_B &= \frac{2j}{3U^2} J_m \left[a \left(U I_A^* + U I_B^* + U I_C^* \right) \right] + Y'_0; \\ Y'_C &= \frac{2j}{3U^2} J_m \left[a^2 \left(U I_A^* + U I_B^* + U I_C^* \right) \right] + Y'_0; \end{aligned} \right\} \quad (4.38)$$

Перейдемо в цих виразах до комплексам повній потужності фаз приймача, використовуючи рівняння:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_A &= \underline{U}_A I_A^* = U I_A^*; \\ \tilde{S}_B &= \underline{U}_B I_B^* = a^2 U I_B^*; \\ \tilde{S}_C &= \underline{U}_C I_C^* = a U I_C^*; \end{aligned}$$

Отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} Y'_A &= \frac{2j}{3U^2} J_m (\tilde{S}_A + a\tilde{S}_B + a^2\tilde{S}_C) + Y'_0; \\ Y'_B &= \frac{2j}{3U^2} J_m (a\tilde{S}_A + a^2\tilde{S}_B + \tilde{S}_C) + Y'_0; \\ Y'_C &= \frac{2j}{3U^2} J_m (a^2\tilde{S}_A + \tilde{S}_B + a\tilde{S}_C) + Y'_0. \end{aligned} \right\} \quad (4.39)$$

Переходячи в цих рівняннях від повної потужності до активної і реактивної, отримаємо вирази:

$$\left. \begin{aligned} Y'_A &= \frac{j}{3U^2} [(Q_A - Q_B) + (Q_A - Q_C) + \sqrt{3}(P_B - P_C)] + Y'_0; \\ Y'_B &= \frac{j}{3U^2} [(Q_B - Q_C) + (Q_B - Q_A) + \sqrt{3}(P_C - P_A)] + Y'_0; \\ Y'_C &= \frac{j}{3U^2} [(Q_C - Q_A) + (Q_C - Q_B) + \sqrt{3}(P_A - P_B)] + Y'_0; \end{aligned} \right\} \quad (4.40)$$

Рівняння (4.40) дозволяють визначити параметри симетрувального пристрою за активною і реактивною потужностями фаз приймача. Ці рівняння дають можливість визначити реактивну потужність фаз симетрувального пристрою. Дійсно, беручи до уваги, що провідності фаз симетрувального пристрою мають суто реактивний характер (4.11), запишемо вираз (4.40) у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} -Q'_A &= \frac{1}{3} [(Q_A - Q_B) + (Q_A - Q_C) + \sqrt{3}(P_B - P_C) - Q'_0]; \\ -Q'_B &= \frac{1}{3} [(Q_B - Q_C) + (Q_B - Q_A) + \sqrt{3}(P_C - P_A) - Q'_0]; \\ -Q'_C &= \frac{1}{3} [(Q_C - Q_A) + (Q_C - Q_B) + \sqrt{3}(P_A - P_B) - Q'_0]; \end{aligned} \right\} \quad (4.41)$$

де $Q'_A = U^2 b_A$, $Q'_B = U^2 b_B$, $Q'_C = U^2 b_C$ - реактивні потужності фаз симетрувального пристрою;

$$Q'_0 = \frac{U^2}{3}(b_A + b_B + b_C) = \frac{1}{3}(Q'_A + Q'_B + Q'_C),$$

де Q'_0 - реактивна потужність вихідної частини симетрувального пристрою з номінальними параметрами, щодо яких відбувається їх перебудова в процесі симетрування.

Аналогічними перетвореннями рівнянь (4.31) можна виразити через потужності фаз навантаження параметри симетрувального пристрою для компенсації складової зворотної послідовності струмів. Опускаючи проміжні перетворення, запишемо остаточні вирази:

$$\left. \begin{aligned} -Q''_{BC} &= \frac{2}{\sqrt{3}}(P_B - P_C) + \frac{1}{3}(Q_A + Q_B + Q_C) + Q'_0; \\ -Q''_{CA} &= \frac{2}{\sqrt{3}}(P_C - P_A) + \frac{1}{3}(Q_A + Q_B + Q_C) + Q'_0; \\ -Q''_{AB} &= \frac{2}{\sqrt{3}}(P_A - P_B) + \frac{1}{3}(Q_A + Q_B + Q_C) + Q'_0; \end{aligned} \right\} \quad (4.42)$$

Вирази (4.42) можна записати в наступному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} Q''_{BC} &= -\frac{2}{\sqrt{3}}(P_B - P_C) + Q''_0; \\ Q''_{CA} &= -\frac{2}{\sqrt{3}}(P_C - P_A) + Q''_0; \\ Q''_{AB} &= -\frac{2}{\sqrt{3}}(P_A - P_B) + Q''_0; \end{aligned} \right\} \quad (4.43)$$

де Q''_0 - реактивна потужність вихідної частини симетрувального пристрою з номінальними параметрами, щодо яких відбувається їх перебудова в процесі симетрування:

$$Q''_0 = -Q'_0 - \frac{1}{3}(Q_A + Q_B + Q_C).$$

Розглянемо випадок, коли в трифазній мережі відсутні струми нульової послідовності:

$$\underline{I}_0 = \frac{1}{3}(\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C) = 0 \quad (4.44)$$

Помножимо пов'язаний комплекс виразу (4.44) на фазну напругу $\underline{U}$:

$$\underline{U} \underline{I}_A^* + a \underline{U} \underline{I}_B^* + a^2 \underline{U} \underline{I}_C^* = 0$$

Вважаючи, що система фазних напруг джерела симетрична, запишемо:

$$\underline{U}_A \underline{I}_A^* + a \underline{U}_B \underline{I}_B^* + a^2 \underline{U}_C \underline{I}_C^* = 0$$

звідки:

$$\tilde{S}_A + a \tilde{S}_B + a^2 \tilde{S}_C = 0 \quad \text{або} \quad (P_A + jQ_A) + a(P_B + jQ_B) + a^2(P_C + jQ_C) = 0$$

Окремо прирівнюючи до нуля дійсну і уявну частини цих виразів, отримаємо:

$$\begin{aligned} P_A - \frac{1}{2}P_B + \frac{1}{2}P_C + \frac{\sqrt{3}}{2}(Q_C - Q_B) &= 0; \\ Q_A - \frac{1}{2}Q_B - \frac{1}{2}Q_C + \frac{\sqrt{3}}{2}(P_B - P_C) &= 0. \end{aligned} \quad (4.45)$$

Перетворивши вираз (4.45), отримаємо наступні співвідношення для активних і реактивних потужностей фаз:

$$\left. \begin{aligned} (Q_A - Q_B) + (Q_A - Q_C) + \sqrt{3}(P_B - P_C) &= 0 \\ (Q_B - Q_C) + (Q_B - Q_A) + \sqrt{3}(P_C - P_A) &= 0 \\ (Q_C - Q_A) + (Q_C - Q_B) + \sqrt{3}(P_A - P_B) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.46)$$

Беручи до уваги рівність (4.42) і якщо $Q'_0 = 0$ то отримаємо спрощену умову компенсації струмів зворотної послідовності за реактивними потужностями фаз:

$$\left. \begin{aligned} -Q''_{BC} &= -Q_A + Q_B + Q_C; \\ -Q''_{CA} &= -Q_B + Q_C + Q_A; \\ -Q''_{AB} &= -Q_C + Q_A + Q_B; \end{aligned} \right\} \quad (4.47)$$

При відсутності струму зворотної послідовності $\underline{I}_2 = 0$, після перетворень можна записати наступні співвідношення для активних і реактивних навантажень:

$$\left. \begin{aligned} (Q_A - Q_B) + (Q_A - Q_C) - \sqrt{3}(P_B - P_C) &= 0 \\ (Q_B - Q_C) + (Q_B - Q_A) - \sqrt{3}(P_C - P_A) &= 0 \\ (Q_C - Q_A) + (Q_C - Q_B) - \sqrt{3}(P_A - P_B) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.48)$$

Враховуючи ці співвідношення у виразах (4.41) і (4.42), одержимо параметри симетрувального пристрою, що забезпечують компенсацію струмів нульової послідовності:

$$\left. \begin{aligned} Q'_A &= -\frac{2}{3}(2Q_A - Q_B - Q_C) + Q'_0; \\ Q'_B &= -\frac{2}{3}(2Q_B - Q_C - Q_A) + Q'_0; \\ Q'_C &= -\frac{2}{3}(2Q_C - Q_A - Q_B) + Q'_0; \end{aligned} \right\} \quad (4.49)$$

Розглянута методика симетрування трифазних чотирьохпровідних мереж дозволяє по активної та реактивної потужності навантаження визначити параметри СП, тобто компенсувати струми нульової і зворотної послідовностей.

4.4 Симетрування і компенсація реактивної потужності в трифазних мережах

У тих випадках, коли відомі параметри навантаження, параметри симетрувального пристрою зручно виразити через них [18]. У цьому випадку

струми зворотної та нульової послідовностей навантаження визначаються через параметри навантаження аналогічними формулами (4.6) і (4.21) виразами.

Підставляючи в співвідношення (4.11) і (4.26) значення струмів виражені через параметри навантаження знайдемо:

$$\begin{aligned}\Delta b_A &= -\Delta b_A'' + \frac{1}{\sqrt{3}}(g_C'' + g_B''); \\ \Delta b_{BC} &= -\Delta b_{BC}'' + \frac{1}{\sqrt{3}}(g_{CA}'' + g_{AB}'') + \frac{2}{3\sqrt{3}}(g_C'' + g_B''),\end{aligned}\quad (4.50)$$

де $\Delta b_A''$ та $\Delta b_{BC}''$ - несиметричні частини реактивних провідностей навантаження:

$$\begin{aligned}\Delta b_A'' &= b_A'' - \frac{1}{3}(b_A'' + b_B'' + b_C''); \\ \Delta b_{BC}'' &= b_{BC}'' - \frac{1}{\sqrt{3}}(b_{BC}'' + b_{CA}'' + b_{AB}'').\end{aligned}$$

Інші параметри отримуємо циклічною перестановкою індексів А, В, С.

Для трьохпровідної мережі:

$$g_A'' = g_B'' = g_C'' = b_A'' = b_C'' = 0,$$

тоді:

$$\Delta b_{BC} = -\Delta b_{BC}'' + \frac{1}{\sqrt{3}}(g_{CA}'' + g_{AB}'') \quad (4.51)$$

Слід також зазначити, що реактивна потужність, яку вносять визначені вище параметрами симетрувального пристрою, дорівнює:

$$\Delta Q = U^2(\Delta b_A + \Delta b_B + \Delta b_C + \Delta b_{BC} + \Delta b_{CA} + \Delta b_{AB}) = 0$$

Тому симетрувальний пристрій з обчисленими параметрами не змінює коефіцієнт потужності мережі. Для отримання заданого коефіцієнта

потужності слід використовувати параметри симетричної його частини (провідності нульової послідовності), що визначаються співвідношеннями (4.4) і (4.17). Очевидно, додавання будь-якої симетричної частини до СП не змінює умов симетрування, але дозволяє отримати необхідний коефіцієнт потужності. Реактивна потужність, яка вноситься симетричною частиною, дорівнює:

$$Q^C = 3U^2(b'_0 + 3b''_0). \quad (4.52)$$

Позначивши через $\cos \varphi$ - вихідний, а через $\cos \theta$ - необхідний коефіцієнт потужності, отримаємо:

$$b'_0 + 3b''_0 = \frac{P}{3U^2}(\operatorname{tg} \theta - \operatorname{tg} \varphi), \quad (4.53)$$

де P - активна потужність навантаження.

Співвідношення (4.53) дозволяє одержати будь-які фазові зсуви в межах $-\frac{\pi}{3} < \theta < \frac{\pi}{2}$, в тому числі і $\theta = 0$, для якого:

$$b'_0 + b''_0 = -\frac{Q}{3U^2}, \quad (4.54)$$

де Q - реактивна потужність навантаження.

Співвідношення (4.54) визначає вибір симетричною частини СП для забезпечення $\cos \varphi = 1$. Це співвідношення дозволяє визначити параметри симетричною частини СП для забезпечення заданого коефіцієнта потужності в трифазній трьохпровідній мережі.

Вибравши величини b'_0 і b''_0 , що задовольняють співвідношенням (4.52) або (4.53), знаходимо остаточні вирази для визначення параметрів СП:

$$\begin{aligned} Y_A &= Y'_0 + \Delta Y_A; & Y_B &= Y'_0 + \Delta Y_B; & Y_C &= Y'_0 + \Delta Y_C; \\ Y_{AB} &= Y''_0 + \Delta Y_{AB}; & Y_{BC} &= Y''_0 + \Delta Y_{BC}; & Y_{CA} &= Y''_0 + \Delta Y_{CA}; \end{aligned} \quad (4.55)$$

де $\Delta Y_A, \Delta Y_B, \Delta Y_C, \Delta Y_{AB}, \Delta Y_{BC}, \Delta Y_{CA}$ - несиметричні частини СП.

Слід зазначити, що у виразах (4.52) і (4.53) ми не визначаємо обидві величини b'_0 і b''_0 однозначно, але залишаємо вільним один з параметрів. Цим ступенем свободи можна розпорядитися так, щоб задовольнити яку-небудь додаткову умову. Наприклад, можна поставити завдання про вибір параметрів, що задовольняють умові (4.52) і мінімізують будь-яку цільову функцію.

В якості цільової функції може бути взята сумарна (за абсолютною величиною) потужність реактивних елементів або максимальне значення провідності елементів СП, або час перехідного процесу і т.ін.

Розглянемо тільки одну можливість. Якщо взяти величину $b'_0 = -\Delta b_A (-\Delta b_B, -\Delta b_C)$ або $b''_0 = -\Delta b_{BC} (-\Delta b_{CA}, -\Delta b_{AB})$, то шестиелементна схема на рис. 4.9. стане п'ятиелементною (рис. 4.10).

Сказане відноситься і до чотирьохпровідної лінії. Для трьохпровідної лінії $\Delta b_A = \Delta b_B = \Delta b_C = 0$ і тому для симетрування достатньо трьох параметрів [якщо припустити що $b'_0 = 0$, а b''_0 визначити з рівнянь (4.52) і (4.53)].

Якщо розглядати завдання тільки як симетрування і не турбуватися про коефіцієнт потужності, то для чотирьохпровідної мережі при $b'_0 = \Delta b_A, b''_0 = \Delta b_{BC}$ отримаємо двоелементну схему.

Таким чином, розглянуті методи дозволяють по провідностям навантаження визначити параметри симетро-компенсуючих пристроїв, які виконують компенсацію струмів нульової і зворотної послідовностей з одномоментною компенсацією реактивної потужності.

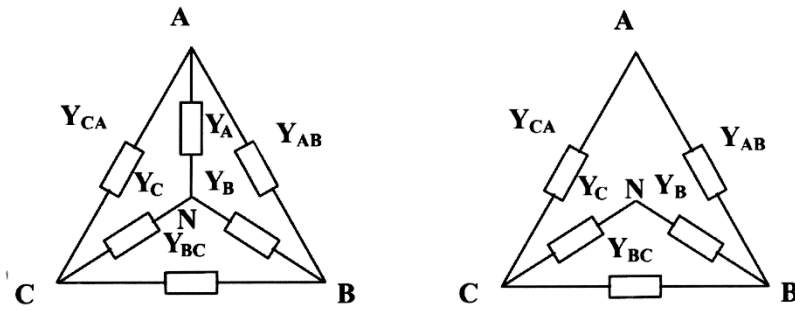


Рис. 4.9 – Шестиелементна схема симетрування

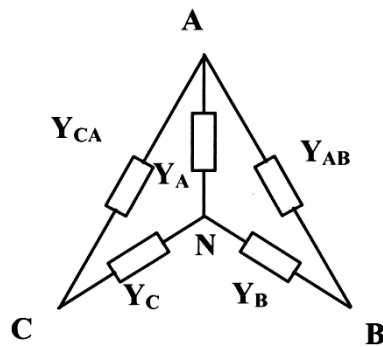


Рис.4.10 – П'ятиелементна схема симетрування

4.5 Похибка і стійкість процесу симетрування трифазних мереж

У попередніх розділах при визначенні параметрів СП виходили з припущення про те, що система напруг симетрична, незважаючи на те, що система несиметрична. Це допущення може призвести до похибки у визначенні параметрів СП і, отже, до залишкової несиметрії в системі струмів. При досить великих похибках, залишкова несиметрія при циклічній багатотактовій роботі СП, може призвести до нестійкості процесу симетрування[19].

Розглянемо чотирьохпровідну трифазну мережу з фазними струмами $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$, що містить складові прямої, зворотної та нульової послідовностей відповідно до виразу (4.1, а).

У виразі (4.1, а) виразимо фазні струми через фазні напруги і провідності навантаження:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{U}_A Y_A^H + \underline{U}_A Y_{AB}^H - \underline{U}_B Y_{AB}^H - \underline{U}_C Y_{CA}^H + \underline{U}_A Y_{CA}^H; \\ \underline{I}_B &= \underline{U}_B Y_B^H + \underline{U}_B Y_{BC}^H - \underline{U}_C Y_{BC}^H - \underline{U}_A Y_{AB}^H + \underline{U}_B Y_{AB}^H; \\ \underline{I}_C &= \underline{U}_C Y_C^H + \underline{U}_C Y_{CA}^H - \underline{U}_A Y_{CA}^H - \underline{U}_B Y_{BC}^H + \underline{U}_C Y_{BC}^H; \end{aligned} \right\} \quad (4.56)$$

У виразі (4.56) запишемо фазні напруги через складові прямої $\underline{U}_1$, зворотного $\underline{U}_2$ та нульової послідовностей. Перетворені рівняння (4.56) підставимо у вираз (4.1, а). Після перетворення вираз (4.1, а) можна записати в наступному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{U}_1 (Y'_{0H} + 3Y''_{0H}) + \underline{U}_2 (Y'_{2H} + 3Y''_{2H}) + \underline{U}_0 Y'_{1H}; \\ \underline{I}_2 &= \underline{U}_2 (Y'_{1H} + 3Y''_{0H}) + \underline{U}_2 (Y'_{0H} + 3Y''_{0H}) + \underline{U}_0 Y'_{2H}; \\ \underline{I}_0 &= \underline{U}_1 Y'_{2H} + \underline{U}_2 Y'_{1H} + \underline{U}_0 Y'_{0H} \end{aligned} \right\} \quad (4.57)$$

Тут:

$$\begin{aligned} Y'_{0H} &= \frac{1}{3} (Y_A^H + Y_B^H + Y_C^H); \\ Y'_{1H} &= \frac{1}{3} (Y_A^H + aY_B^H + a^2Y_C^H); \\ Y'_{2H} &= \frac{1}{3} (Y_A^H + a^2Y_B^H + aY_C^H); \\ Y''_{0H} &= \frac{1}{3} (Y_{BC}^H + Y_{CA}^H + Y_{AB}^H); \\ Y''_{1H} &= \frac{1}{3} (Y_{BC}^H + aY_{CA}^H + a^2Y_{AB}^H); \\ Y''_{2H} &= \frac{1}{3} (Y_{BC}^H + a^2Y_{CA}^H + aY_{AB}^H); \end{aligned} \quad (4.58)$$

де Y_A^H, Y_B^H, Y_C^H - комплексні провідності фаз навантаження;

$Y_{AB}^H, Y_{BC}^H, Y_{CA}^H$ - міжфазні провідності навантаження.

У звичайних умовах лінійні напруги симетричні. Це означає, що система фазних напруг може містити тільки складові прямий і нульової послідовності. При цьому для струму нульової послідовності навантаження маємо:

$$\underline{I}_0 = \underline{U}_1 Y'_{2n} + \underline{U}_0 Y'_{0n} \quad (4.59)$$

Якщо виразити $\underline{U}_0$ через провідності фаз, то

$$\underline{U}_0 = -\frac{\underline{U}_1 Y'_{2n}}{Y'_0 + 3Y_N}, \quad (4.60)$$

де Y_N - провідність нейтрального проводу.

Отже, струм нульової послідовності дорівнює:

$$\underline{I}_0 = \underline{U}_1 Y'_2 \left(1 - \frac{Y'_0}{Y'_0 + 3Y_N} \right). \quad (4.61)$$

Для того, щоб обернути струм до нуля, достатньо паралельно навантаженню ввімкнути СП із провідністю $Y'_2 = Y'_{2n}$. Тоді навантаження разом з СП можна розглядати як нове навантаження з провідністю $Y'_2 - Y'_{2n} = 0$, так що $\underline{I}_0 = 0$. Разом із тим обернеться до нуля, як видно з виразу (4.61), і зсув нейтралі.

Тому якщо відомі провідності фаз навантаження або хоча б величина Y'_{2n} (4.58), то завжди можна знайти реактивні провідності фаз СП, що забезпечують одночасне виконання умов $\underline{I} = 0$ та $\underline{U} = 0$:

$$\left. \begin{aligned} b_A &= -\frac{2}{3}b''_A - \frac{1}{\sqrt{3}}(g''_B - g''_C) + \frac{1}{3}(b''_B - b''_C); \\ b_B &= -\frac{2}{3}b''_B - \frac{1}{\sqrt{3}}(g''_C - g''_A) + \frac{1}{3}(b''_C - b''_A); \\ b_C &= -\frac{2}{3}b''_C - \frac{1}{\sqrt{3}}(g''_A - g''_B) + \frac{1}{3}(b''_A - b''_B); \end{aligned} \right\} \quad (4.62)$$

Зауважимо, що величина $Y'_{2н}$ може бути визначена також із співвідношення (3.59). Тут потрібно знати лише сумарну провідність фаз навантаження. Тоді, вимірявши величини $\underline{I}_0, \underline{U}_0$, знайдемо:

$$Y'_{2н} = \frac{1}{\underline{U}} (\underline{I}_0 - \underline{U}_0 Y'_{0н}).$$

Проте у ряді випадків визначення $Y'_{2н}$ може зустріти труднощі. Це має місце, наприклад, тоді коли навантаження містить як споживачі, з'єднані зіркою з нульовим проводом, так і споживачі, з'єднані в трикутник або зірку без нульового проводу. Як видно з співвідношень (4.57), визначення $Y'_{2н}$ тільки по струмах і напруженням навантаження без додаткової інформації про міжфазні провідності навантаження неможливо.

Однак співвідношення (4.61) дозволяє по виміряному значенню струму $\underline{I}_0$ визначити наближене значення провідності $\tilde{Y}'_{2н}$:

$$\tilde{Y}'_{2н} = \frac{I_0}{U_1} = Y'_{2н} - \frac{Y'_{0н}}{Y'_{0н} + 3Y'_N} \cdot Y'_{2н} \quad (4.63)$$

Зі співвідношення (4.63) для СП запишемо:

$$Y'_2 = -\tilde{Y}'_{2н} = -\frac{\underline{I}_0}{\underline{U}_1} \quad (4.64)$$

Визначення провідностей фаз СП з рівняння (4.64) проводимо відомими методами.

Так як величина Y'_2 визначена з похибкою, то виникає несиметрія струму:

$$\Delta \underline{I}_0 = \underline{U}_1 (Y'_{2н} + Y'_{2c}) \left(1 - \frac{Y'_{0н}}{Y'_0 + 3Y'_N} \right)$$

Зі співвідношень (4.63) і (4.64) маємо:

$$Y'_{2H} + Y'_2 = Y_{2H} - \tilde{Y}'_2 = \frac{Y'_{0H}}{Y'_{0H} + 3Y_N} \cdot Y'_{2H}.$$

Тому для $\Delta \underline{I}_0$ отримуємо:

$$\Delta I_0 = \frac{\underline{U}_1 Y'_{2H} Y'_2}{Y'_0 + 3Y_N} \left(1 - \frac{Y'_{0H}}{Y'_0 + 3Y'_N} \right) = \frac{Y'_{0H}}{Y'_{0H} + 3Y_N} \cdot \underline{I}_0. \quad (4.65)$$

Аналогічно з виразу (4.61) знаходимо залишкову несиметрію напруг:

$$\Delta \underline{U}_0 = - \frac{\underline{U}_1 (Y'_{2H} + Y'_2)}{Y'_{0H} + 3Y_N} \cdot \underline{U}_0 \quad (4.66)$$

Співвідношення (4.65) і (4.66) визначають похибку симетрування. Для відносної похибки маємо:

$$\delta_C + \frac{\Delta \underline{I}_0}{\underline{I}_0} = \frac{\Delta \underline{U}_0}{\underline{U}_0} = \frac{Y'_{0H}}{Y'_{0H} + 3Y_N} \quad (4.67)$$

Якщо провідність нейтрального проводу велика в порівнянні з провідністю навантаження, тобто $Y_N \gg Y'_{0H}$, то похибка симетрування буде мала:

$$|\delta_C| \approx \frac{Y'_{0H}}{3Y_N} \ll 1 \quad (4.68)$$

У цьому випадку можна обмежитися одним циклом симетрування. Похибка симетрування можна зменшити n -кратним застосуванням симетрування за співвідношенням:

$$Y'^{(n)}_2 = \frac{\underline{I}_0^{(n-1)}}{\underline{U}_1} \quad (4.69)$$

де $\underline{I}_0^{(n-1)}$ - значення струму нульової послідовності, отриманого на n -му кроці.

Після N циклів симетрування залишкова несиметрія буде дорівнює:

$$\delta_C^{(N)} = \frac{\underline{I}_0^{(N)}}{\underline{I}_0} = \frac{\underline{U}_0^{(N)}}{\underline{U}_0} = \left(\frac{Y'_{0H}}{Y'_{0H} + 3Y_N} \right)^N \quad (4.70)$$

З формули (4.70) ясно, що для стійкості процесу симетрування, тобто щоб похибка симетрування зменшувалася в ході процесу, необхідно виконання умови:

$$q = \left| \frac{Y'_{0H}}{Y'_{0H} + 3Y_N} \right| < 1 \quad (4.71)$$

Чим менше величина g , тим швидше йде процес симетрування.

Формули (4.70) і (4.71) дозволяють визначити число циклів N , за які досягається необхідне значення похибки.

Після усунення струму нульової послідовності і зміщення нейтралі усунення струму зворотної послідовності виробляємо відповідно до формули (4.72) за виразами:

$$N = \ln \frac{1}{|\delta_C|} / \ln \frac{1}{g} \quad (4.72)$$

Вирішене в цьому розділі завдання дозволяє визначити похибка симетрування трифазних мереж. Отримані аналітичні вирази дають можливість встановити кількість циклів симетрування і стійкість цього процесу при отриманні необхідного значення похибки.

4.6. Схеми симетрувальних пристроїв в системах електропостачання

Синтез параметрів СП здійснюється виходячи з умов дотримування в допустимих межах несиметрії напруг та струмів при високому коефіцієнті потужності і мінімальній потужності елементів СП.

Здійснення симетрування за допомогою СП зводиться до проведення компенсації еквівалентного струму зворотної послідовності в несиметричних навантаженнях і, як наслідок, виконаною ними напруги зворотної послідовності. Залежно від того, в якому місці встановлено СП, розрізняють індивідуальні, групові, централізовані і комбіновані способи симетрування. Індивідуальні СП встановлюються безпосередньо у несиметричних ЕП. При здійсненні групового симетрування в різних точках мережі встановлюється декілька СП, кожне з них симетрує якусь ділянку мережі з підключенням до нього групи несиметричних електроприймачів. При організації централізованого симетрування в розподільній мережі встановлюється один СП. Другий, комбінований спосіб симетрування полягає в сполучення СП, представлених вище. Всі способи симетрування мають свої особливості. Індивідуальний спосіб усуває несиметрію струмів і напруг безпосередньо у самого споживача, але при такому способі встановлена потужність силових елементів СП використовується нерационально. При централізованому способі необхідна менша встановлена потужність елементів СП, проте в мережі з несиметричними навантаженнями несиметрія струмів лишається незмінною. Груповий спосіб симетрування об'єднує переваги і недоліки індивідуального і централізованого способів. Обрання способу симетрування загалом визначається параметрами мережі і характером навантажень.

Симетрувальні пристрої використовуються некерованими або керованими в залежності від особливостей графіка навантаження. Відоме велике число схем СП, які мають і електричні, і електромагнітні зв'язки поміж елементами. Конкретне схемне і технічне рішення симетрувальних пристроїв має свої певні переваги і недоліки, які обмежують область їх застосування.

Розглянемо найбільш відомі симетрувальні пристрої. Симетрувальні пристрої трансформаторного типу дуже різноманітні. Використовуючи декілька трансформаторів або спеціальний трансформатор, включеного

спеціальним чином між мережею та несиметричним навантаженням, можна отримати необхідну напругу навантаження і досягти часткового вирівнювання лінійних струмів. На прикладі, на рис. 3.11 наведена схема живлення від трансформатора Скотта двофазного навантаження. Також на схемі представлені векторні діаграми струмів і напруг.

Співвідношення числа витків трансформаторів обираються так, щоб їх вторинні напруги дорівнювали одна одній. За цією схемою живляться індукційні плавильні печі. Симетрувальні пристрої трансформаторного типу можуть бути індивідуальними і нерегульованими, а їх симетрувальні властивості відповідають характеру навантаження.

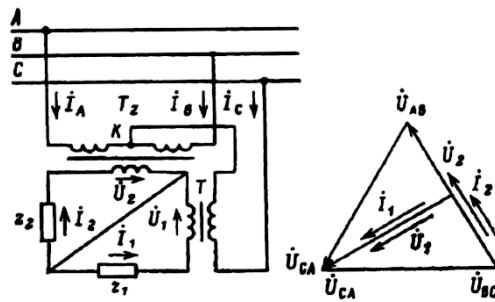


Рис.4.11 – Схема струмів і напруг при живленні двофазного навантаження від трансформатора Скотта та їх векторна діаграма

Симетрувальні пристрої з електромагнітними зв'язками поділяються на дві групи: 1) з дільниками (автотрансформаторні) та 2) трансформаторні. В схемах з дільниками потужність симетруючого пристрою майже завжди обирається рівною потужності навантаження. Перемиканням автотрансформаторної відпайки можна симетрувати нелінійне навантаження зі змінним коефіцієнтом потужності. На рис.4.12 показана схема з одним регульованим елементом. В такій схемі значення $\cos \varphi < 0,7$.

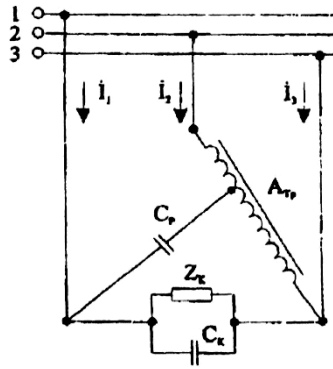


Рис.4.12 – Автотрансформаторна схема з регульованим елементом C_r

На рис.4.13. представлена схема СП з двома регульованими елементами C і L . По своїм характеристикам вона є кращою, чим попередня схема і знаходить використання для навантажень з $\cos \varphi = 1$.

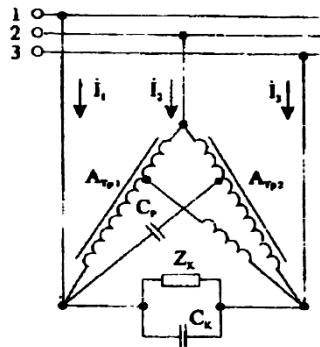


Рис.4.13 – Автотрансформаторна схема з регулюючими елементами

Індуктивно-ємнісні симетруючі пристрої вмикаються до мережі паралельно з несиметричним навантаженням; вони представляють собою комбінацію індуктивних і ємнісних елементів [14]. Самого розповсюдженого поширення отримала схема Штейнметца, яка представлена на рис.4.14 [12]. Векторна діаграма, що показує роботу пристрою, наведена на цьому ж рисунку. Симетрувальний пристрій Штейнметца є найефективнішим, якщо коефіцієнт потужності навантаження дорівнює одиниці. З цієї причини при

активно-індуктивному навантаженні паралельно їй підключається БК С2. В цьому випадку потужність реактора і БК С1 обирається з умови:

$$Q_L = Q_C = P_{ном} / \sqrt{3} \quad (4.73)$$

Пристрій Штейнметца здійснює симетрування активно-індуктивного навантаження (без наявності конденсаторів С2). Проте у цьому випадку коефіцієнт потужності зменшується до значень, які менше коефіцієнта потужності навантаження. В розглянутому прикладі потужність симетрувальних елементів обирається з умови:

$$Q_L = 2S_n \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{3}\right) / \sqrt{3};$$

$$Q_L = 2S_n \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{3}\right) / \sqrt{3}, \quad (4.74)$$

де S_n - повна потужність однофазного навантаження.

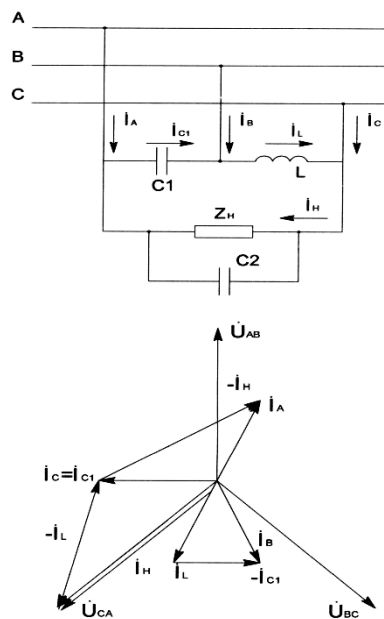


Рис.4.14 – Схема Штейнметца і векторна діаграма для цієї схеми

Симетрування при постійних значеннях симетрувальних елементів здійснюється тільки при одному певному значенні потужності навантаження. Якщо можливу зміну параметрів навантаження призводить до збільшення

допустимої несиметрії, то виникає необхідність впровадження керованих СП. Проте застосування керованих СП не завжди є необхідним при змінній несиметричного навантаження; потрібно, щоб несиметрія напруги не виходила за допустимі межі з інтегральною імовірністю 95%. Для обґрунтування можливості використання некерованих СП в мережах зі змінним навантаженням необхідне здійснення статистичних досліджень щодо параметрів несиметрії. Керовані СП можуть мати систему управління як безперервну (аналогову), так і ступеневу (дискретну).

Батареї конденсаторів дискретних симетруючих пристроїв виробляються з декількох груп, одна з яких постійно підключена, а інші – підключені змінно. Перемикання проводиться за допомогою контакторів або тиристорних ключів. На даний момент знаходить використання плавне регулювання ємнісних елементів методом підключення реакторів, керованих тиристорами, паралельно конденсаторам. Недоліками такого способу управління є встановлення додаткових реакторів, що веде до збільшення втрат енергії та встановленої потужності обладнання симетруючих пристроїв, а також генерування ВГ струму тиристорами. В дискретному регулюванні індуктивний елемент представляє собою декілька елементарні реактори або являє собою один реактор з відгалуженнями. Необхідне плавне регулювання індуктивного елемента може бути забезпечено за рахунок ввімкнення реактора через керовані тиристири підмагнічування магнітопроводу (якщо є в наявності), регулювання немагнітних зазорів в магнітопроводі, а також за допомогою використання ковзного контакту. В якості приклада на рис.4.15 наведені два варіанти керованих СП, основаних на схемі Штейнметца. Їх недоліком є те, що сумарна повна потужність устаткування перевищує повну потужність навантаження, симетруючі пристрої мають обмежений діапазон регулювання.

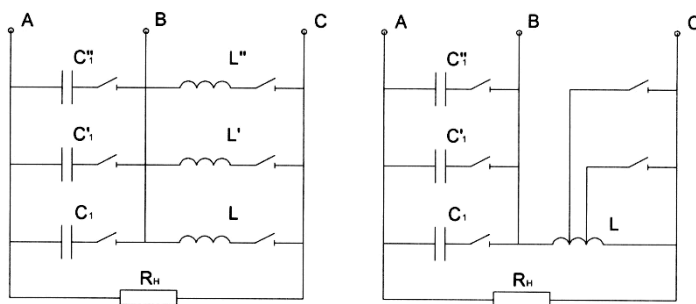


Рис.4.15 – Варіанти керованих симетруючих пристроїв на основі схеми Штейнметца

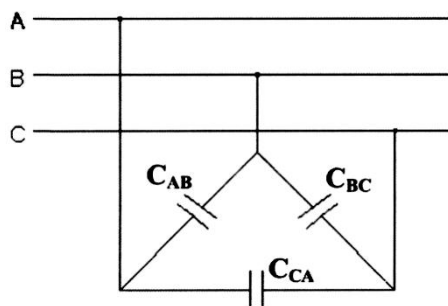


Рис.4.16 – Схема симетрування з використанням батареї конденсаторів

Для проведення симетрування системи лінійних напруг при одно- і двох- і трифазних несиметричних навантаженнях широкого розповсюдження набули БК з різними потужностями фаз, які використовуються для регулювання РП в мережі (рис.4.16).

Дуже важливою обставиною є багатфункціональний характер ємнісних СП, БК яких є джерелом РМ.

На практиці повне симетрування, тобто коли $K_{2U} = 0$, є технічно і економічно недоцільним; тому використовується часткове симетрування, коли за допомогою непрямої компенсації або застосування симетруючих пристроїв забезпечується значення $K_{2U} \leq 0,02$. Умова часткового симетрування має такий вигляд:

$$K_{2U} = I_{2OCT} Z_2 / U_{НОМ} \leq U_{2ДОП} / U_{НОМ} = K_{2UДОП} = 0,02$$

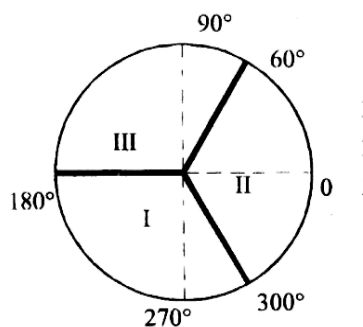
де I_{2OCT} - залишковий струм зворотної послідовності, який обумовлений несиметричним навантаженням і СП; $U_{2ДОП}$ - допустима напруга оберненої послідовності. У випадку повного симетрування, вираз має бути:

$$I_{2CY} = -I_{2H},$$

де I_{2CY} і I_{2H} - комплекси струмів зворотної послідовності СП і несиметричного навантаження. Сумарна потужність ємнісного симетруючого пристрою обирається з умови КРП. Вона перерозподіляється по фазах СП так, що струм зворотної послідовності несиметричної батареї конденсаторів компенсує струм зворотної послідовності несиметричного навантаження. В загальному випадку симетрування може бути здійснене з допомогою двох ємкісних елементів, підключених на однакові лінійні напруги (в залежності від фази струму зворотної послідовності). Симетрувальні можливості ємнісного двоелементного СП значно залежать від характеру несиметричного навантаження.

Щоб визначити параметри БК ємнісного СП, були розроблені аналітичні та графічні методи.

Алгоритм аналітичного методу полягає в наступному. Потужність БК і вмикання їх між тими чи іншими фазами визначаються залежно від аргументу φ_2 вектору еквівалентного струму зворотної послідовності $I_{2\Sigma}$ в I, II або III області (рис.4.17).



$$I. 180^\circ \leq \varphi_{2\Sigma} \leq 300^\circ$$

$$II. 300^\circ \leq \varphi_{2\Sigma} \leq 60^\circ$$

$$III. 60^\circ \leq \varphi_{2\Sigma} \leq 180^\circ$$

Рис.4.17 – Діаграма розподілу аргументу струму зворотної послідовності

Сумарна потужність батареї конденсаторів при повному симетруванні (якщо припустити, що вони працюють при номінальній напрузі) знаходиться за виразами:

$$I. Q_\Sigma = \sqrt{3}U_{НОМ} I_{2\Sigma} (\sqrt{3} \sin \varphi_{2\Sigma} + \cos \varphi_{2\Sigma})$$

$$II. Q_\Sigma = 2\sqrt{3}U_{НОМ} I_{2\Sigma} (\cos \varphi_{2\Sigma})$$

$$III. Q_\Sigma = \sqrt{3}U_{НОМ} I_{2\Sigma} (\sqrt{3} \sin \varphi_{2\Sigma} - \cos \varphi_{2\Sigma})$$

В СЕП підприємств, які живлять електротехнологічні установки (печі електрошлакового переплаву, індукційні печі та інші.) технологічний процес відзначається частою зміною кількості ввімкнених агрегатів і їх завантаження. Це викликає зміни K_{2U} як за значенням, так і по фазі. Треба зазначити, що електротехнологічні установки - це досить потужні споживачі реактивної потужності. Для СЕП таких призначень в ІЕД НАН України розроблені симетро-компенсуючі пристрої багатоцільового призначення, які здійснюють симетрування напруг мережі і КРП. Ці пристрої утворюються з

дискретно регульованих ємностей. Схеми цих ємностей представлені на рис.4.18.

Симетрування режиму мережі (автоматичне або ручне) базується на оцінці несиметрії за допомогою аргументу τ_H пульсуючої потужності трифазної системи на основній частоті N:

$$N = 3(U_1 I_2 + U_2 I_1 + U_0 I_0) = N \exp \tau_H$$

де U_1, U_2, U_0 та I_1, I_2, I_0 - симетричні складові напруг і струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей [20].

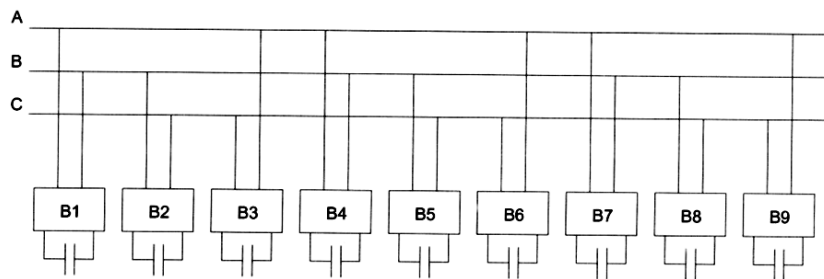


Рис.4.18 – Схема симетро-компенсуючих пристроїв

Реалізація спільних умов КРП і симетрування дає змогу істотно зменшити встановлену потужність регульованих компенсуючих пристроїв в СЕП підприємств. Одним з оригінальних технічних рішень є симетруючий пристрій на основі трансформаторів з обертовим магнітним полем, які включають трифазний статор і загальмований ротор. На роторі є однофазна обмотка, до неї підключені постійні реактивні елементи (батарея або реактор). Пристрій представляє собою несиметричне навантаження, в якому фаза струму зворотної послідовності змінюється в діапазоні $0-2\pi$ при повороті ротора. Комплекс з двох таких СП дозволяє регулювати модуль та фазу струму зворотної послідовності методом повороту на певні кути їх роторів. На рис.4.19 наведені схеми СП з обертовим магнітним полем типу L-L і L-C. Закон управління СП типу L-C:

$$\alpha_L = 0,5 \left(\pi + \varphi_{2H} - \arcsin \left[\sqrt{3} U_{\text{Л}} I_{2H} (Q_L + Q_C)^{-1} \right] \right) \quad (4.75a)$$

$$\alpha_C = 0,5 \left(\pi + \varphi_{2H} + \arcsin \left[\sqrt{3} U_{\text{Л}} I_{2H} (Q_L + Q_C)^{-1} \right] \right) \quad (4.756)$$

Тут α_L, α_C - кути повороту роторів; Q_L, Q_C - потужності реактивних елементів; φ_{2H} - аргумент лінійного струму зворотної послідовності несиметричного навантаження I_{2H} .

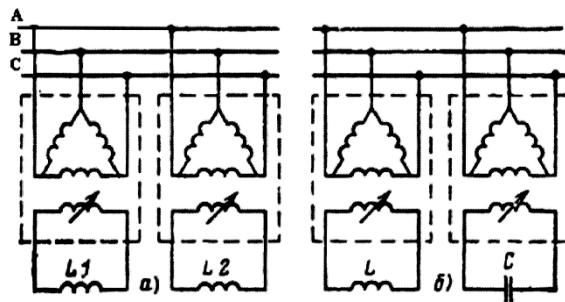


Рис.4.19 – Схеми СП типу L-L (а) і L-C (б) з обертовим магнітним полем

Симетрування системи напруг здійснюється також методом введення системи додаткових ЕРС. Принцип даного способу симетрування полягає в тому, що в розрив лінійних проводів між джерелом і приймачем вмикаються додаткові джерела ЕРС, які утворюють систему зворотної послідовності. В результаті вводу ЕРС основного і додаткового джерел, їхні симетричні складові зворотної послідовності взаємокомпенсуються, напруга на приймачі приймає симетричну форму. На практиці джерелом додаткової системи ЕРС можуть бути використані:

- синхронний генератор;
- трансформатори послідовного регулювання;
- трансформатор з фазним регулювання коефіцієнта трансформації.

В якості критерію оптимальності вибору параметрів СП приймається умова мінімуму встановленої потужності СП. Ця умова використовується при виборі пристроїв для повного або часткового симетрування. Встановлена

потужність СП з електричними зв'язками визначається РП елементів СП або провідностями [20].

Технічні рішення розглядаються за методом порівняння варіантів з урахуванням номенклатури випущених промисловістю виробів (реактивних елементів, комутаційного устаткування, пристроїв релейного захисту та автоматики), а також надійності СП.

РОЗДІЛ 5 УЧАСТЬ СУБ'ЄКТІВ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ПОРУШЕННІ СИМЕТРІЇ

Аналіз відповідних наукових праць в області дослідження несиметричних режимів дає чіткий висновок: участь споживачів у створенні несиметрії на збірних шинах за нульовою послідовністю, досить наочний і не вимагає додаткових підтверджень. На відміну від нульової послідовності, в порушенні симетрії по зворотній послідовності може брати участь мережеве підприємство. Саме цей фактор не дозволяє визначити участь суб'єктів розподілу електричної енергії в порушенні симетрії за зворотною послідовністю, використовуючи вимірювання фазних провідностей навантаження. В результаті, вирази для встановлення участі суб'єктів в погіршенні симетрії по зворотній послідовності досить складні, залежні від умов виникнення несиметрії і їх не можна назвати наочними.

Перевірка основних закономірностей участі суб'єктів в погіршенні симетрії по зворотній послідовності, отриманих аналітичним шляхом виконана на математичній моделі електричної мережі.

Участь суб'єктів в порушенні симетрії по зворотній послідовності на ГРБП визначається за коефіцієнтами участі навантаження $K_{2уч.н}$ і системи $K_{2уч.сист}$, основними елементами для розрахунку яких являються коефіцієнти K'_{2U}, K''_{2U} . Названий метод можна вважати справедливим в тому випадку, якщо використовувані в ньому закономірності носять об'єктивний характер.

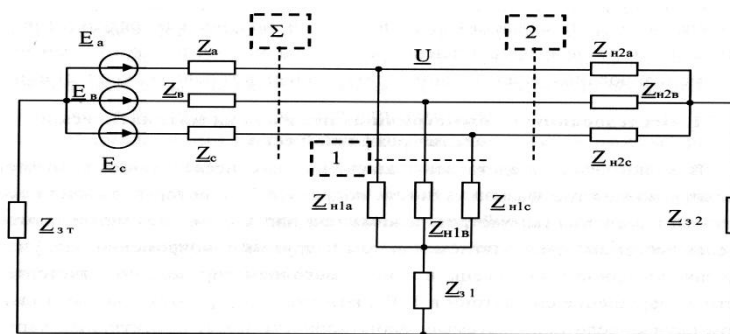


Рис. 5.1 – Схема заміщення трифазної мережі

Розглянута еквівалентна схема заміщення трифазної електричної мережі з двома споживачами (рис. 5.1). Джерела напруги $\underline{E}_a, \underline{E}_b, \underline{E}_c$ відображають живлячу систему разом з опорами зв'язку по кожній з фаз - $\underline{Z}_a, \underline{Z}_b, \underline{Z}_c$. Опори $\underline{Z}_{n1a}, \underline{Z}_{n1b}, \underline{Z}_{n1c}$ являють собою окремо виділене навантаження, величини $\underline{Z}_{n2a}, \underline{Z}_{n2b}, \underline{Z}_{n2c}$ відображають фазні опори решти навантаження шин, $\underline{Z}_{z1}, \underline{Z}_{z2}, \underline{Z}_{z3}$ - опори контурів заземлення трансформатора, першого та другого навантажень.

Несиметрія системи в розглянутій еквівалентній схемі може бути задана зміною амплітуд і фаз живлячих напруг. Несиметрія споживача може створюватися зміною фазних опорів виділеного навантаження. Аналогічним чином можна створювати несиметрію, що вноситься з боку решти споживачів.

Для проведення моделювання використана модель [21], на якій досліджувався конкретний приклад підключення навантаження через трансформатор 10/0,4 кВ потужністю 1 МВА і кабель довжиною 1 км. Дослідження на математичній моделі [22] проводилися стосовно до ТЗП, розміщеної на збірних шинах нижчої напруги трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ.

5.1 Вплив фазового зсуву на оцінку участі суб'єктів

Фазовий зсув (кут δ_2) між напругою зворотного послідовності $\underline{U}_2''$, створюваною в ТЗП несиметричним навантаженням споживача, і напругою зворотної послідовності системи $\underline{E}_2$ залежить від ряду непередбачуваних заздалегідь факторів: причин, що викликали несиметрію, взаємного розташування джерел несиметрії в системі і в навантаженні, параметрів мережі та режиму [23].

В силу того, що кут δ_2 є величиною випадковою, вплив однакових чинників порушення симетрії на рівень несиметрії на ГРБП може бути різним при незмінній величині несиметрії в системі і в навантаженні споживача. Це пояснюється тим, що напруга зворотної послідовності на ГРБП $\underline{U}_2$ - це геометрична сума напруг зворотної послідовності, створюваних системою $\underline{U}'_2$ і споживачем $\underline{U}''_2$:

$$\underline{U}_2 = \underline{U}'_2 + \underline{U}''_2 \quad (5.1)$$

Залежно від випадкового фактору (кута δ_2) наявність джерел несиметрії по обидві сторони від ГРБП може призводити або до посилення несиметрії в точці вимірювання, або до взаємної компенсації. Умови

$$K_{2\text{уч}\Sigma} = \frac{K''_{2U}}{K'_{2U} + K''_{2U}}; \quad K_{2\text{уч}C} = \frac{K'_{2U}}{K'_{2U} + K''_{2U}},$$

які визначають участь системи і споживача у створенні несиметрії, виходять з того, що кожен із суб'єктів повинен нести відповідальність, яка відповідає його пайовій участі у створенні несиметрії на ГРБП не залежно від кута δ_2 .

На моделі виконані дослідження, в яких використовуються два фактори несиметрії, кожен з яких має близький за величиною вплив на несиметрію на ГРБП. Несиметрія системи моделюється зниженням однієї з фазних напруг до $U_\phi = 0,8 \cdot U_{\phi \text{ ном}}$. Несиметрія навантаження споживача досягається зниженням опору сумарного навантаження фази А до $Z_{нА} = 3 \cdot Z_n$. Коефіцієнт несиметрії по зворотній послідовності $K_{2н} = y_2 / y_1$ задається для кожного дослідження, коефіцієнти несиметрії напруги по зворотній послідовності на ГРБП, створювані системою K'_{2U} та навантаженням K''_{2U} , розраховуються за формулами:

$$K'_{2U} = \frac{U'_2}{U_1}; K''_{2U} = \frac{U''_2}{U_1}.$$

Розглянемо дослід порушення симетрії тільки системою. Введемо несиметрію системи по фазі А: $U_A = 0,8 \cdot U_{\phi \text{ ном}}$ (табл. 5.1, дослід 1.1), навантаження задане симетричним. При цьому, коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності на ГРБП $K_{2U} = 0,071$; коефіцієнт несиметрії навантаження $K_{2н} = 0$; коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності, що створюється системою на ГРБП $K'_{2U} = K_{2U} = 0,071$; коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності, створюваний навантаженням на ГРБП $K''_{2U} = K_{2н} = 0$; коефіцієнт участі системи у створенні несиметрії на ГРБП $K_{уч \text{ сист}} = 1$; коефіцієнт участі навантаження у створенні несиметрії на ГРБП $K_{уч н} = 0$.

Таблиця 5.1 – Участь суб'єктів в порушенні симетрії при розташуванні факторів несиметрії в фазі А

Номер дослід	Фактори несиметрії	K_{2U}	$K_{2н}$	K'_{2U}	K''_{2U}	$K_{уч \text{ сист}}$	$K_{уч н}$
1.1	$U_A = 0,8 \cdot U_{\phi \text{ ном}};$ $Z_{нА} = Z_n$	0,071	0	0,071	0	1	0
1.2	$U_A = U_{\phi \text{ ном}};$ $Z_{нА} = 0,3 \cdot Z_n$	0,079	0,438	0	0,079	0	1
1.3	$U_A = 0,8 \cdot U_{\phi \text{ ном}};$ $Z_{нА} = 0,3 \cdot Z_n$	0,143	0,438	0,071	0,079	0,474	0,526

У досліді порушення симетрії (табл. 5.1, досвід 1.2) тільки навантаженням вводимо $Z_{нА} = 0,3 \cdot Z_n$ і симетричну напруга системи. При цьому маємо наступний набір значень використовуваних коефіцієнтів: $K_{2U} = 0,079$; $K_{2н} = 0,438$; $K'_{2U} = 0$; $K''_{2U} = K_{2U} = 0,079$; $K_{уч \text{ сист}} = 0$; $K_{уч н} = 1$.

У досліді порушення симетрії системою і навантаженням одночасно (табл. 5.1, дослід 1.3) введені обидва чинники несиметрії по фазі А: $U_A = 0,8 \cdot U_{\phi \text{ ном}}$ та $Z_{нА} = 0,3 \cdot Z_n$. Спостерігаємо наступні значення використуваних коефіцієнтів:

$$K_{2U} = 0,143; K_{2н} = 0,438; K'_{2U} = 0,71; K''_{2U} = 0,079; K_{уч \text{ сист}} = 0,474; K_{уч н} = 0,526.$$

Розрахункова величина коефіцієнтів несиметрії, створюваних джерелами, розташованими в системі (K'_{2U}) або в навантаженні (K''_{2U}) визначає несиметрію на ГРБП. Так, у разі розташування джерела несиметрії тільки в системі $K_{2U} = K'_{2U}$, при $K''_{2U} = 0$. У разі розташування джерела тільки в навантаженні $K_{2U} = K''_{2U}$, при $K'_{2U} = 0$. Відповідно розподіляються коефіцієнти участі: в досліді 1.1 – $K_{уч \text{ сист}} = 1; K_{уч н} = 0$, в досліді 1.2 – $K_{уч \text{ сист}} = 0; K_{уч н} = 1$. В досліді порушення симетрії системою і навантаженням одночасно, несиметрія на ГРБП залежить від обох джерел. Причому, кожне з джерел впливає таким чином, як при роздільному впливі: $K'_{2U} = 0,71$; $K''_{2U} = 0,79$. Участь розподіляється пропорційною коефіцієнтам K'_{2U} і K''_{2U} відповідно до формул:

$$K'_{2U} = \frac{U'_2}{U_1}; K''_{2U} = \frac{U''_2}{U_1}.$$

Досліди 1.1 ~1.3 показують відповідність отриманих результатів критеріям порушень симетрії при різному розташуванні джерел несиметрії.

Розглянемо вплив фазового зсуву між $\underline{U}_2''$ і $\underline{E}_2$ на визначення участі суб'єктів. Для цього змінимо аргумент вектору $\underline{E}_2$, зберігши без змін аргумент вектору $\underline{U}_2''$. Введемо несиметрію по фазах В і С, таку ж, як у попередніх дослідіх використовувалася у фазі А. Несиметрія по фазі В

забезпечується умовою $U_B = 0,8 \cdot U_{\phi \text{ ном}}$ (табл. 5.2), по фазі С – $U_C = 0,8 \cdot U_{\phi \text{ ном}}$ (табл. 5.3).

Як показують досліди, відмінність в отриманих на моделі значеннях коефіцієнтів при введенні несиметрії в різних фазах спостерігається тільки в одному, але основному, контролюємо згідно ГОСТу показнику – коефіцієнті несиметрії напруги по зворотній послідовності на ГРПП – K_{2U} . При введенні фактору несиметрії системи по фазі А, значення коефіцієнта становить 0,143; по фазі В – 0,075; по фазі С – 0,088. Отримана відмінність є зрозумілою з фізичної точки зору і пояснюється різним ступенем, залежною від кута δ_2 , взаємної компенсації несиметрії системи з одного боку, і навантаження – з іншого.

Таблиця 5.2 – Участь суб'єктів в порушенні симетрії при розташуванні фактору несиметрії системи в фазі В, фактору несиметрії навантаження в фазі А

Номер дослідів	Фактори несиметрії	K_{2U}	K_{2n}	K'_{2U}	K''_{2U}	$K_{уч \text{ сист}}$	$K_{уч \text{ н}}$
2.1	$U_B = 0,8 \cdot U_{\phi \text{ ном}};$ $Z_{нА} = Z_n$	0,071	0	0,071	0	1	0
2.2	$U_B = U_{\phi \text{ ном}};$ $Z_{нА} = 0,3 \cdot Z_n$	0,079	0,438	0	0,079	0	1
2.3	$U_B = 0,8 \cdot U_{\phi \text{ ном}};$ $Z_{нА} = 0,3 \cdot Z_n$	0,075	0,438	0,071	0,079	0,474	0,526

Таблиця 5.3 – Участь суб'єктів в порушенні симетрії при розташуванні фактору несиметрії системи в фазі С, фактору несиметрії навантаження в фазі А

Номер дослідів	Фактори несиметрії	K_{2U}	K_{2H}	K_{2U}'	K_{2U}''	$K_{уч\ сист}$	$K_{уч\ H}$
3.1	$U_C = 0,8 \cdot U_{\phi\ ном};$ $Z_{HA} = Z_H$	0,071	0	0,071	0	1	0
3.2	$U_C = U_{\phi\ ном};$ $Z_{HA} = 0,3 \cdot Z_H$	0,079	0,438	0	0,079	0	1
3.3	$U_C = 0,8 \cdot U_{\phi\ ном};$ $Z_{HA} = 0,3 \cdot Z_H$	0,088	0,438	0,071	0,079	0,474	0,526

Головною особливістю проведених дослідів є те, що вони показали: коефіцієнти несиметрії напруги по зворотній послідовності K_{2U}' і K_{2U}'' , створювані суб'єктами на ГРБП, не залежать від фазового зсуву δ_2 . Відповідно, не залежать від кута δ_2 і коефіцієнти участі системи $K_{уч\ сист}$ і навантаження $K_{уч\ H}$. Вимірювання участі суб'єктів розподілу електричної енергії в погіршенні симетрії визначається величиною впливу несиметрії, створюваної ними, на несиметрію на ГРБП і не залежить від факторів, що викликають несиметрію.

5.2 Вплив похибки опору зв'язку з системою на оцінку участі суб'єктів

Визначення участі суб'єктів у створенні несиметрії на збірних шинах вимагає введення опору зв'язку між ГРБП і ЕРС системи. Опір зв'язку (Z_C) є величина розрахункова, тому обов'язково будуть мати місце неточності в її оцінці. На математичній моделі проведені дослідів, в яких визначено залежності від похибки введення опору зв'язку ΔZ_C : коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності K_{2U} на ГРБП; коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності, створюваного системою на ГРБП K_{2U}' ;

коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності, створюваного навантаженням на ГРБП K_{2U}'' , коефіцієнта участі системи у створенні несиметрії на ГРБП $K_{2уч сист}$ і коефіцієнта участі навантаження у створенні несиметрії на ГРБП $K_{2уч н}$.

Для забезпечення можливості приведення похибок, отриманих у різних дослідах, до однакових умов, досліди виконані за умови постійності суми коефіцієнтів K_{2U}'' і K_{2U}' ($K_{2U}'' + K_{2U}' = 0,3$). В якості факторів несиметрії в системі використані зміни амплітуди фазної напруги U_A , у споживача – модуля опору навантаження фази А – $Z_{нА}$. Регулювання факторів несиметрії в моделі здійснюється через коефіцієнти f та k :

$$\underline{U}_A = \underline{U}_A - f \cdot \Delta \underline{U}; \quad \underline{Z}_{нА} = \underline{Z}_{нА} - k \cdot \Delta \underline{Z}_{нА}$$

Помилка визначення опору зв'язку вводиться в модель через коефіцієнт d : $\Delta \underline{Z}_C = d \cdot \Delta \underline{Z}_C$. Діапазон зміни похибок становить $\pm 50\%$. Результати дослідів зведені в табл. 5.4. Зміни показників несиметрії в залежності від відносної похибки ΔZ_C^* проілюстровані на рис. 5.2. Як видно з наведених графіків, значення коефіцієнтів участі системи і навантаження у створенні несиметрії на збірних шинах помітно залежать від опору зв'язку. Представляє інтерес точність визначення участі суб'єктів в порушенні симетрії по зворотній послідовності. З цією метою виконано розрахунки похибок коефіцієнта участі системи – $\Delta K_{2уч сист}$ і похибки його складових: $\Delta K_{2U}''$ та $\Delta K_{2U}'$ (табл. 5.5) у функції від ΔZ_C^* .

Похибки коефіцієнта участі системи приведені до суми коефіцієнтів участі:

$$\Delta K_{2уч сист} = \frac{K_{2уч сист} - K_{2уч сист}(0)}{K_{2уч сист} + K_{2уч н}} \cdot 100\%, \quad (5.2)$$

де в силу умови для зворотної послідовності аналогічного:

$$K_{2уч\ сист} + K_{2уч\ н} = 1$$

Похибки коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності, створюваного системою в ТЗП – K'_{2U} і коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності, створюваного навантаженням в ТЗП, – K''_{2U} приведені відповідно до їх суми:

$$\Delta K'_{2U} = \frac{K'_{2U} - K'_{2U}(0)}{K'_{2U} + K''_{2U}} \cdot 100\%; \quad \Delta K''_{2U} = \frac{K''_{2U} - K''_{2U}(0)}{K'_{2U} + K''_{2U}} \cdot 100\% \quad (5.3)$$

У діапазоні зміни помилки по опору зв'язку $\Delta Z^*_C = \pm 50\%$ похибка визначення участі системи $\Delta K_{2уч\ сист}$ становить від -23,2% до 30,7% (рис. 5.3).

Таблиця 5.4 – Зміна параметрів, які характеризують несиметрію, в залежності від ΔZ^*_C

$K_{2уч\ сист}(0)$	Параметри	ΔZ^*_C											
		-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
1	K_{2U}	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	K'_{2U}	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	5	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	K''_{2U}	0,021	0,016	0,012	0,008	0,004	0,0	0,002	0,008	0,012	0,016	0,02	
	$\Delta K_{2уч\ сист}$	0,936	0,948	0,961	0,974	0,987	1,0	0,987	0,974	0,962	0,95	0,938	

Продовження таблиці 5.4

1	$\Delta K_{2уч \Sigma}$	0,064	0,052	0,039	0,026	0,013	0,0	0,013	0,026	0,038	0,05	0,062
0,75	K_{2U}	0,253	0,258	0,262	0,266	0,27	0,274	0,277	0,28	0,284	0,286	0,289
	K_{2U}^I	0,201	0,207	0,212	0,216	0,221	0,225	0,229	0,233	0,236	0,24	0,243
	K_{2U}^{II}	0,094	0,09	0,086	0,082	0,079	0,075	0,071	0,068	0,064	0,06	0,057
	$\Delta K_{2уч сист}$	0,682	0,696	0,71	0,724	0,737	0,75	0,762	0,775	0,787	0,799	0,81
	$\Delta K_{2уч \Sigma}$	0,312	0,304	0,29	0,276	0,263	0,25	0,238	0,225	0,213	0,201	0,19
0,5	K_{2U}	0,222	0,233	0,242	0,25	0,258	0,265	0,272	0,278	0,283	0,289	0,293
	K_{2U}^I	0,093	0,106	0,119	0,13	0,14	0,15	0,159	0,167	0,175	0,182	0,189
	K_{2U}^{II}	0,166	0,163	0,16	0,156	0,153	0,15	0,147	0,143	0,14	0,137	0,134
	$\Delta K_{2уч сист}$	0,359	0,395	0,426	0,454	0,478	0,5	0,52	0,538	0,555	0,57	0,585
	$\Delta K_{2уч \Sigma}$	0,641	0,605	0,574	0,546	0,522	0,5	0,48	0,462	0,445	0,43	0,415
0,25	K_{2U}	0,21	0,226	0,24	0,253	0,264	0,274	0,283	0,291	0,298	0,305	0,311
	K_{2U}^I	0,022	0,004	0,023	0,042	0,059	0,075	0,089	0,102	0,114	0,125	0,135
	K_{2U}^{II}	0,239	0,236	0,233	0,231	0,228	0,225	0,222	0,22	0,217	0,214	0,212
	$\Delta K_{2уч сист}$	0,084	0,018	0,091	0,155	0,207	0,25	0,286	0,317	0,344	0,368	0,389
	$\Delta K_{2уч \Sigma}$	0,916	0,982	0,909	0,845	0,793	0,75	0,714	0,683	0,656	0,632	0,611
0	K_{2U}	0,222	0,243	0,261	0,276	0,289	0,3	0,31	0,319	0,326	0,333	0,34
	K_{2U}^I	0,138	0,103	0,072	0,045	0,021	0,0	0,019	0,037	0,053	0,067	0,08
	K_{2U}^{II}	0,311	0,308	0,306	0,304	0,302	0,3	0,298	0,296	0,294	0,292	0,289
	$\Delta K_{2уч сист}$	0,307	0,25	0,191	0,13	0,066	0,0	0,061	0,111	0,152	0,187	0,217
	$\Delta K_{2уч \Sigma}$	0,693	0,75	0,809	0,87	0,934	1,0	0,939	0,889	0,848	0,813	0,783

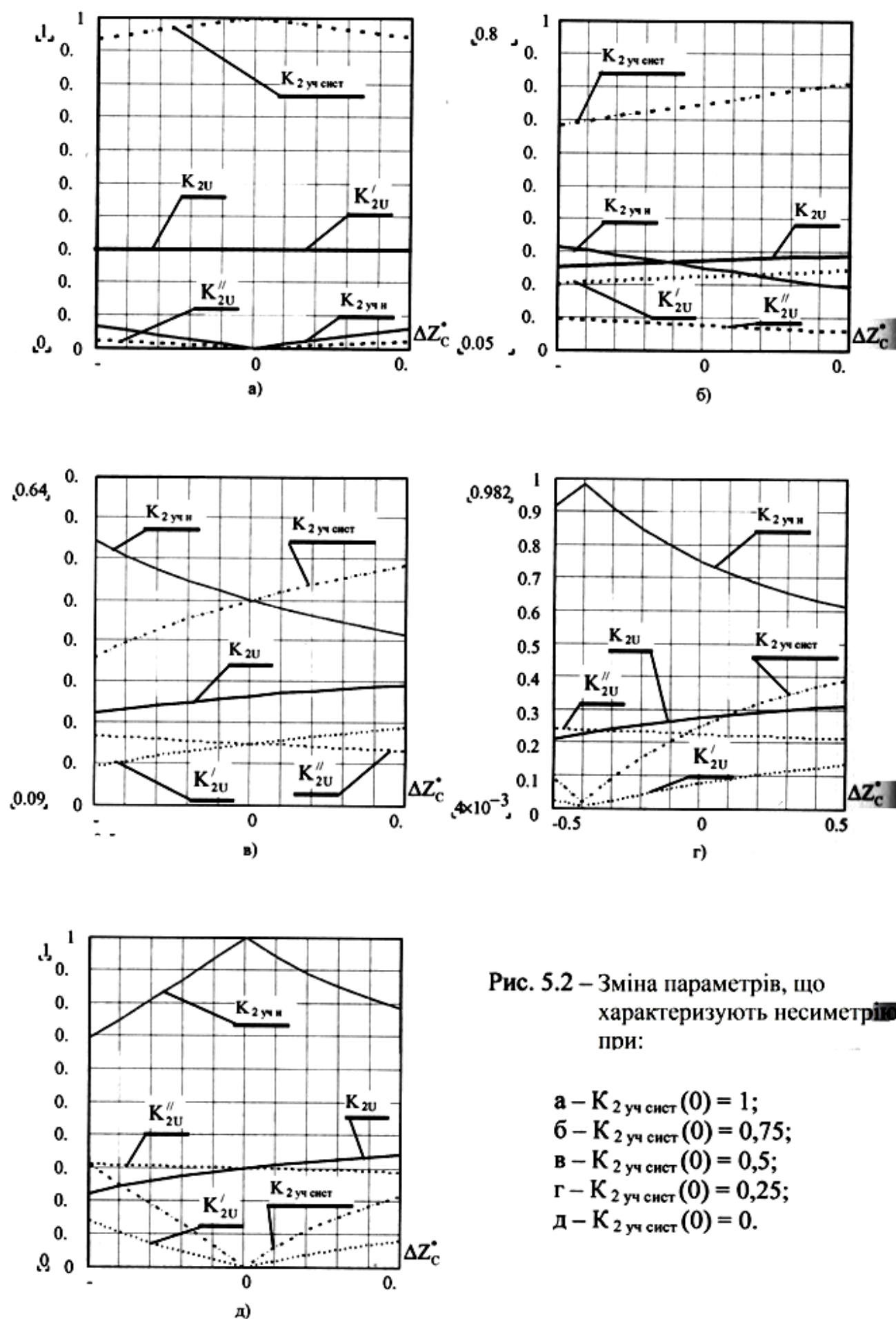


Рис. 5.2 – Зміна параметрів, що характеризують несиметрію при:

- а – $K_{2\text{уч сист}}(0) = 1$;
- б – $K_{2\text{уч сист}}(0) = 0,75$;
- в – $K_{2\text{уч сист}}(0) = 0,5$;
- г – $K_{2\text{уч сист}}(0) = 0,25$;
- д – $K_{2\text{уч сист}}(0) = 0$.

Таблиця 5.5 – Похибка параметрів, які характеризують несиметрію, в залежності від ΔZ_C^*

$K_{2уч\ cист}(0)$	Похибки параметрів	ΔZ_C^*										
		-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
1	$\Delta K_{2U}^I, \%$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	$\Delta K_{2U}^{II}, \%$	7,0	5,33	4,0	2,67	1,33	0,0	0,67	2,67	4,0	5,33	6,67
	$\Delta K_{2уч\ cист}, \%$	6,4	5,2	3,9	2,6	1,3	0,0	1,3	2,6	3,8	5,0	6,2
0,75	$\Delta K_{2U}^I, \%$	-8,0	-6,0	-4,33	-3,0	-1,33	0,0	1,33	2,67	3,67	5,0	6,0
	$\Delta K_{2U}^{II}, \%$	6,33	5,0	3,67	2,33	1,33	0,0	-1,33	-2,33	-3,67	-5,0	-6,0
	$\Delta K_{2уч\ cист}, \%$	-6,8	-5,4	-4,0	-2,6	-1,3	0,0	1,2	2,5	3,7	4,9	6,0
0,5	$\Delta K_{2U}^I, \%$	-19,0	-14,7	-10,3	-6,7	-3,3	0,0	3,0	5,7	8,3	10,7	13,0
	$\Delta K_{2U}^{II}, \%$	6,3	4,3	3,3	2,0	0,1	0,0	-0,1	-0,23	-3,3	-4,3	-5,3
	$\Delta K_{2уч\ cист}, \%$	-14,1	-10,5	-7,4	-4,6	-2,2	0,0	2,0	3,8	5,5	7,0	8,5
0,25	$\Delta K_{2U}^I, \%$	-17,6	-23,6	-17,3	-11,0	-5,33	0,0	4,67	9,0	13,0	16,7	20,0
	$\Delta K_{2U}^{II}, \%$	4,67	3,67	2,67	2,0	1,0	0,0	-1,0	-1,67	-2,67	-3,67	4,33
	$\Delta K_{2уч\ cист}, \%$	-16,6	-23,2	-15,9	-9,5	-4,3	0,0	3,6	6,7	9,4	11,8	13,9
0	$\Delta K_{2U}^I, \%$	46,0	34,3	24,0	15,0	7,0	0,0	6,33	12,3	17,7	22,3	26,7
	$\Delta K_{2U}^{II}, \%$	3,67	2,67	2,0	1,33	0,67	0,0	-0,67	-1,33	-2,0	-2,67	3,67
	$\Delta K_{2уч\ cист}, \%$	30,7	25,0	19,1	13,0	6,6	0,0	6,1	11,1	15,2	18,7	21,7

Розглянемо, чим визначаються похибки коефіцієнтів участі (рис. 5.4). Для цього можна порівняти в функції від ΔZ_C^* зміни $\Delta K_{2\text{уч сист}}$ зі змінами похибок коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності, створюваного системою в ТЗП – $\Delta K_{2U}'$, і коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності, створюваного навантаженням в ТЗП – $\Delta K_{2U}''$. З графіків випливає, що похибки зростають по мірі збільшення участі навантаження в порушенні симетрії по зворотній послідовності. Характер зміни похибки $\Delta K_{2\text{уч сист}}$ визначається, в основному, похибкою коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності, створюваного системою – $\Delta K_{2U}'$ (рис. 5.4, б–д). Це пояснюється тим, що при знаходженні складової $\Delta K_{2U}'$, похибка вноситься безпосередньо у визначення падіння напруги на опорі зв'язку. В той же час, при симетричному навантаженні характер зміни $\Delta K_{2\text{уч сист}}$ визначається виключно похибкою коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності, створюваного навантаженням – $\Delta K_{2U}''$ (рис. 5.4, а). В даному випадку проявляються ознаки порушення симетрії за зворотною послідовністю при симетричному навантаженні.

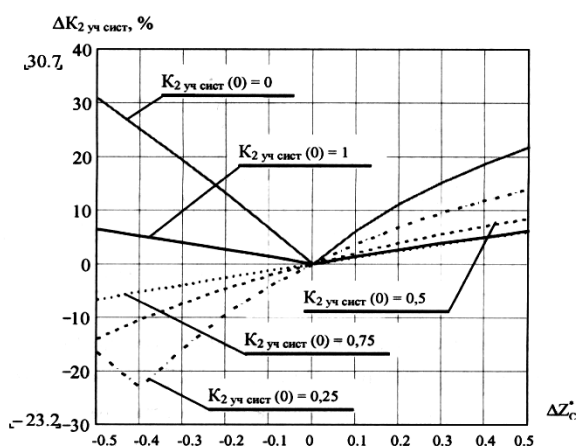


Рис. 5.3 – Залежність похибки розрахунку коефіцієнтів участі від помилки завдання опору зв'язку

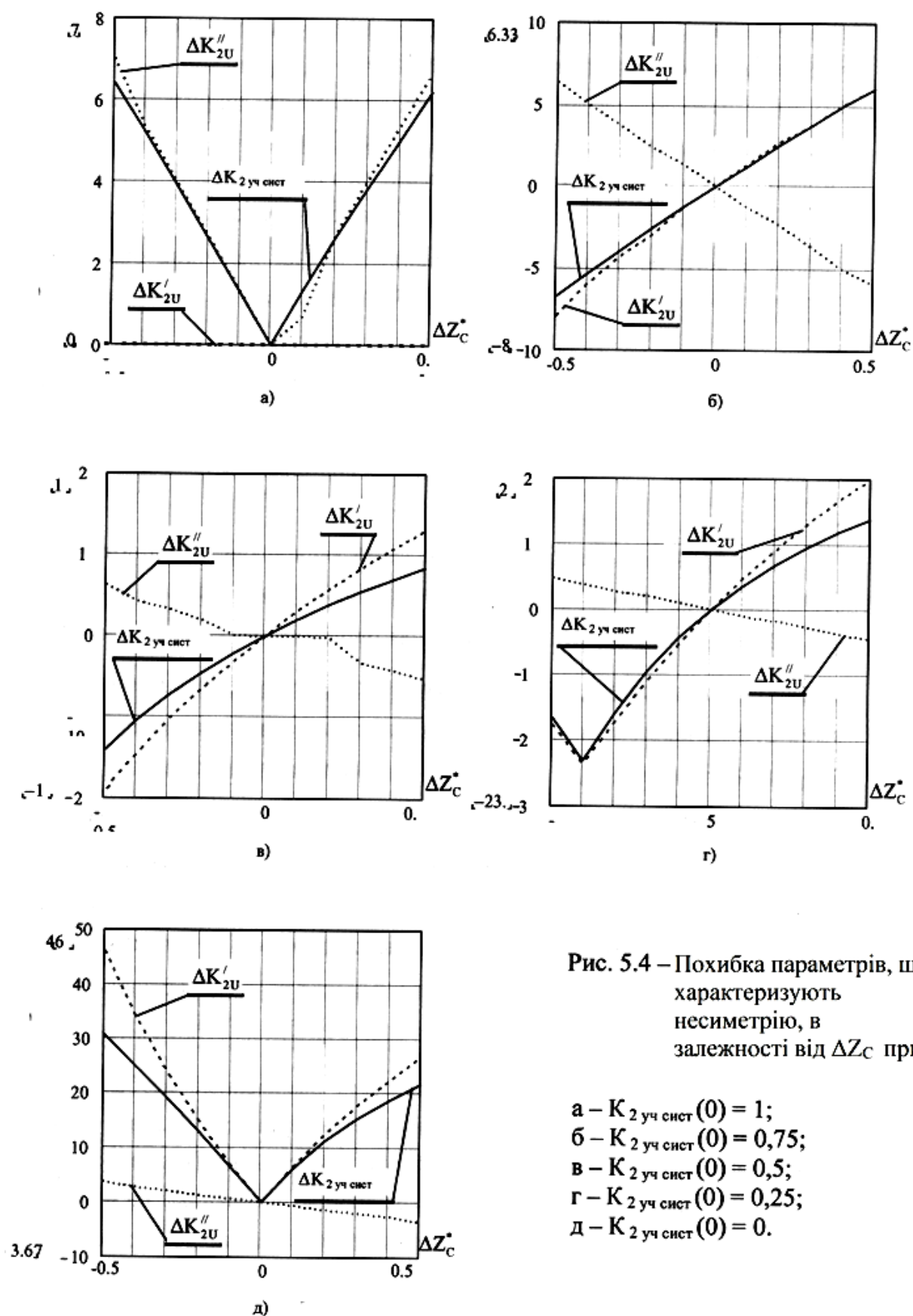


Рис. 5.4 – Похибка параметрів, що характеризують несиметрію, в залежності від ΔZ_C при:

- а – $K_{2\text{уч сист}}(0) = 1$;
- б – $K_{2\text{уч сист}}(0) = 0,75$;
- в – $K_{2\text{уч сист}}(0) = 0,5$;
- г – $K_{2\text{уч сист}}(0) = 0,25$;
- д – $K_{2\text{уч сист}}(0) = 0$.

5.3 Компенсації похибки визначення участі суб'єктів, викликаной помилкою опору зв'язку

У дослідях по визначенню впливу похибки опору зв'язку з системою на оцінку участі суб'єктів (Г, досліді Г.1 - Г.3) були виявлені наступні особливості зміни параметрів несиметрії:

- в випадках порушення симетрії тільки системою і при повній симетрії в мережі похибки $\Delta K_{2U}''$ однакові, їх величина визначається помилкою по опору зв'язку ΔZ_C^* ;
- похибки коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності, створюваного навантаженням, однакові в дослідях з однаковим коефіцієнтом несиметрії навантаження при різних коефіцієнтах несиметрії системи. Іншими словами: $\Delta K_{2U}'' = const$, якщо $\Delta K_{2n} = const$ при $\Delta K_{2U}' = var..$

Для перевірки зроблених спостережень виконана додаткова серія дослідів (Г, досліді Г.4), на підставі яких можна зробити висновки:

1. похибка $\Delta K_{2U}''$, що спричиняється помилкою введення в розрахунок опору зв'язку з системою ΔZ_C^* , не залежить від несиметрії системи;
2. якщо навантаження симетричне, то в області розглянутих змінних похибка $\Delta K_{2U}''$ визначається лише помилкою опору зв'язку ΔZ_C^* .

Зроблені висновки визначені тим, що коефіцієнт $\Delta K_{2U}''$ визначається виключно параметрами схеми і не залежить від параметрів режиму мережі. Висновки, зроблені для похибки коефіцієнта несиметрії $\Delta K_{2U}''$, поширюються і на похибку напруги зворотної послідовності $\Delta U_2''$, створюваної навантаженням в ТЗП.

З'являється можливість використовувати виявлені особливості для компенсації похибки визначення участі суб'єктів, викликаной помилкою введення опору зв'язку. Виходячи із зроблених висновків, можна

запропонувати способи компенсації похибки, засновані на використанні вимірювання параметрів у характерних режимах.

Розглянемо *режим симетричного навантаження*. Режим визначається за його основною ознакою – $K_{2H} = 0$. У цьому режимі дійсна величина напруги зворотної послідовності, створюваної навантаженням в ТЗП, повинна мати нульове значення ($U_2'' = 0$). Згідно з другим виводом вимірювання приладом величина U_2'' буде похибкою:

$$U_2'' = \Delta U_2'' \quad (5.4)$$

З урахуванням (5.4) матрицю симетричних складових напруги можна записати для розглянутого випадку у вигляді:

$$\begin{pmatrix} U_1'' \\ U_2'' \\ U_0'' \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{Z_{HA}}{Z_c + Z_{HA} + \Delta Z_c} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{Z_{HB}}{Z_c + Z_{HB} + \Delta Z_c} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{Z_{HC}}{Z_c + Z_{HC} + \Delta Z_c} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{E}_A \\ \underline{E}_B \\ \underline{E}_C \end{pmatrix}. \quad (5.5)$$

У матричному рівнянні (5.5) інтерес представляє його складова по зворотній послідовності, з якого можна було б знайти похибку введення опору зв'язку ΔZ_c , якби були відомі фазні ЕРС системи. Значення фазних ЕРС визначаються шляхом урахування втрати напруги в опорі зв'язку. Таким чином, потрібно вирішити відносно ΔZ_c наступну систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_2'' &= \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{\underline{E}_A \cdot Z_{HA}}{Z_c + Z_{HA} + \Delta Z_c} + a^2 \cdot \frac{\underline{E}_B \cdot Z_{HA}}{Z_c + Z_{HB} + \Delta Z_c} + a \cdot \frac{\underline{E}_C \cdot Z_{HA}}{Z_c + Z_{HC} + \Delta Z_c} \right); \\ \begin{pmatrix} \underline{E}_A \\ \underline{E}_B \\ \underline{E}_C \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_B \\ \underline{U}_C \end{pmatrix} + (Z_c + \Delta Z_c) \cdot \begin{pmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (5.6)$$

З використанням вирішення системи (5.6) можна виконати блок автоматичного підстроювання, який буде коригувати значення опорів зв'язку $\Delta \underline{U}_c$ на вході пристрою визначення відповідальності за несиметрію напруги. Блок повинен запускатися за фактом роботи навантаження в симетричному режимі, який або притаманний даному споживачеві, або в силу виробничого процесу періодично виникає при відключенні потужної несиметрії.

Якщо в навантаженні присутня стабільна несиметрія, то система рівнянь (5.6) не може бути вирішена через відсутність інформації про похибки $\Delta U_2^{//}$. Для такого навантаження розглянемо інший характерний режим – *дослід холостого ходу*. Йдеться про повне відключення навантаження із записом з боку приймального кінця параметрів режиму в попередньому режимі і в режимі холостого ходу.

Дослід холостого ходу дає можливість визначити напругу зворотної послідовності U_2' , створювану системою в ТЗП. Це можливо, оскільки згідно з ознаками порушення симетрії при симетричному навантаженні, заміряли в цьому режимі напруга $\underline{U}_2^{xx}$ дасть шукану величину:

$$\underline{U}_2' = \underline{U}_2^{xx} \quad (5.7)$$

У режимі нормальної роботи, що передує чи слідує після холостого ходу, можна знайти дійсну напруга зворотного послідовності $\underline{U}_{2 \text{ дійсн}}^{//}$, що створюється навантаженням в ТЗП:

$$\underline{U}_{2 \text{ дійсн}}^{//} = \underline{U}_2 - \underline{U}_2', \quad (5.8)$$

а потім похибка:

$$\Delta \underline{U}_2^{//} = \underline{U}_2^{//} - \underline{U}_{2 \text{ дійсн}}^{//} \quad (5.9)$$

Знайдена з дослідження холостого ходу за формулами (5.7 - 5.9) похибка напруги зворотної послідовності $\Delta \underline{U}_2''$, створеної навантаженням в ТЗП, може бути використана для вирішення системи рівнянь (5.6). Повністю автоматизувати компенсацію із застосуванням дослідження холостого ходу не представляється можливим, оскільки його проведення вимагає дозволу диспетчера.

РОЗДІЛ 6 РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВСТАНОВЛЕННЯ СИМЕТРУВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

Для розрахунку доцільності встановлення спеціальних пристроїв для симетрування живлячих напруг візьмемо, як приклад, підприємство галузі легкої промисловості. Розрахунок оцінки економічних збитків зумовлених відхиленнями напруг (зокрема – зумовлених несиметрією трифазної мережі) проводився після аналізу даних на одному з харківських підприємств з виробництва гумотехнічних виробів.

Вихідні дані по підприємству:

- Річне споживання електроенергії – 75 000 кВт·год;
- Вартість основних та оборотних фондів – 1,2 млн. грн.;
- Середній процент додаткової з/п – 10%;
- Встановлений процент відрахувань в соціальні фонди – 38%;
- Нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень – 20%.

Розрахунки по підприємству зведені в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Величина та структура збитків по підприємству

Вид збитків	Час подачі ЕЕ Низької якості	Збитки по цехах, грн			
		Підго- товчий	Каланд- ровий	Скла- дальний	Вулкані- заційний
Від простою робочої сили	0,5 год.	41	27,32	-	41
	1 год.	82	54,65	-	82
	2 год.	164	109,3	-	164
Від випуску продукції низької якості	0,5 год.	-	16,48	-	-
	1 год.	-	32,96	-	-
	2 год.	-	65,92	-	-
Від браку продукції	0,5 год.	-	-	-	232,5
	1 год.	-	-	-	232,5
	2 год.	-	-	-	232,5

По цехах сумарно	0,5 год.	41	43,8		273,5
	1 год.	82	87,61		314,5
	2 год.	164	175,22		393,5
Усього за місяць		287	306,63		984,5
Від недовикористання підприємством виробничих фондів	0,5 год.	144			
	1 год.	192			
	2 год.	288			
Усього за місяць по цехах	0,5 год.	269,8			
	1 год.	676,11			
	2 год.	1023,72			

Продовження табл. 6.1

Від роботи понаднормово	6,5 год.	547,3
Від знищення (пошкодження) основних фондів		11100
Повні збитки за один календарний місяць по підприємству:		13616,93
прямий		11100
непрямий		2516,93

Розрахунки виконані на основі досліджень приведених в праці [24].

Для симетрування режиму напруг живлячої мережі підприємства, пропонується встановлення пристрою ГЕРЦ М 36-3/63 (41,4кВА) виробництва фірми «Елекс», м. Одеса.

Технічні характеристики ГЕРЦ М 36-3/63 (41,4кВА):

- номінальний вхідний струм по фазі – 63А;
- номінальна потужність – 41,4 кВА;
- вихідна напруга по фазі – 220 +/- 1%;
- діапазон робочої напруги – 150-260В;
- пороги відключення – 120В, 280В;
- межі підстроювання вихідної напруги – 210-230 В;
- число ступенів перемикання регулюючого трансформатора – 36;
- час реакції на зміну вхідної напруги – 20 мс;
- габаритні розміри (Ш х В х Г) – 500 х 800 х 320 мм;

- маса – 125 кг.

Ціна від виробника на прилад – 64 740 грн.

Розрахунок капіталовкладень на обладнання

$$K = C_{обл} + D_{ост} + M_{онт} = 64740 \text{ грн} + 650 \text{ грн} + 9700 \text{ грн} = 75090 \text{ грн}, \quad (6.1)$$

де $C_{обл}$ – ціна обладнання;

$D_{ост}$ – вартість доставки;

$M_{онт}$ – вартість монтажу та пусконаладжувальних робіт.

Розрахунок річних експлуатаційних (поточних) витрат

Річні базові поточні витрати (до встановлення обладнання) розрахуємо базуючись на даних з табл.6.1.:

$$E_{кБ} = 13616,93 \text{ грн} \cdot 12 = 163403,16 \text{ грн} \quad (6.2)$$

підприємства, пропонується встановлення пристрою ГЕРЦ М 36-3/63 (41,4кВА), що дозволить знизити річні збитки від несиметрії на 80-85%. Таким чином, збитки підприємства після встановлення симетрувального пристрою складуть 20% від базових – $З_{бН}=32680,32$ грн.

Річні витрати з урахуванням встановленого обладнання:

$$E_{кН} = B_p + B_{ел} + A + З_{бН} \quad (6.3)$$

Витрати на ремонт та обслуговування:

$$\begin{aligned} B_p &= T_p \cdot 3z(1 + 0,01Hq)(1 + 0,01Hc) \cdot n = \\ &= 40 \cdot 20,5(1 + 0,01 \cdot 10)(1 + 0,01 \cdot 38) \cdot 1 = 1244,75 \text{ грн} \end{aligned} \quad (6.4)$$

Тут: T_p – норма втрат часу, год;

$Z_{\text{ср}}$ – середньогодинна зарплата обслуговуючого персоналу, грн;

H_q – норма додаткової зарплати, %;

H_c – норма відрахувань в соціальні фонди, %.

Витрати на електроенергію:

$$B_{\text{ел}} = P_{\text{ел}} \cdot \Gamma_p \cdot C_{\text{ел}} = 4,2 \text{ кВт} \cdot 2112 \text{ год} \cdot 1,24 \text{ грн} = 10093,63 \text{ грн} \quad (6.5)$$

Тут: $P_{\text{ел}}$ – споживана потужність, кВт;

Γ_p – час експлуатації, год;

$C_{\text{ел}}$ – тариф на електроенергію, грн.

Амортизаційні відрахування:

$$A = \frac{K \cdot H_A}{100\%} = \frac{75090 \text{ грн} \cdot 15\%}{100\%} = 11263,5 \text{ грн} \quad (6.6)$$

Тоді за формулою (6.3):

$$E_{\text{кн}} = 1244,75 + 10093,63 + 11263,5 + 32680,32 = 55282,5 \text{ грн}$$

Результати розрахунку зведемо в табл. 6.2.

Таблиця 6.2 – Розрахунок річних експлуатаційних витрат

Найменування статей витрат	Позначення	Сума витрат, грн (за варіантами)	
		Базовий	Новий
1. Збитки від несиметрії системи напруг	$E_{\text{кб}}, Z_{\text{бн}}$	163403,16	32680,32
2. Витрати на ремонт та обслуговування	B_p	-	1244,75
3. Вартість спожитої пристроєм електроенергії	$B_{\text{ел}}$	-	10093,63
4. Амортизаційні відрахування	A	-	11263,5
Всього		163403,16	55282,5

Як ми можемо бачити з результату розрахунку, сума поточних витрат після встановлення симетрувального пристрою значно знизилась.

Розрахунок економічної ефективності встановлення обладнання

Річний економічний ефект:

$$E_p = (E_{\kappa B} - E_{\kappa H}) - E_n \cdot K = (163403,16 \text{ грн} - 55282,5 \text{ грн}) - 0,2 \cdot 75090 = 93102,66 \text{ грн} \quad (6.7)$$

Термін окупності:

$$T_{ок} = \frac{K}{E_{\kappa B} - E_{\kappa H}} = \frac{75090 \text{ грн}}{163403,16 \text{ грн} - 55282,5 \text{ грн}} \approx 0.7 \text{ років} \quad (6.8)$$

Висновок: проведений розрахунок дає можливість зробити висновок, що встановлення пристрою ГЕРЦ М 36-3/63 (41,4кВА) є економічно доцільним вирішенням проблеми порушення режиму напруг для даного підприємства.

ВИСНОВКИ

Проблема низької якості електричної енергії є дуже поширеною в Україні. Зокрема, несиметрія напруг та струмів спричиняє суттєвий негативний вплив на реальні технологічні процеси та виробничі цикли підприємств в багатьох сферах промисловості та сільського господарства. Проте, незважаючи на всю очевидність негативного впливу несиметрії на обладнання та режим електропостачання в цілому, на практиці цій проблемі не приділяють достатньої уваги.

Ціллю даної наукової праці стало детальне вивчення несиметричних режимів та розробка заходів щодо зниження їх впливу. Таким чином, в ході виконання роботи був детально досліджений вплив несиметрії на електрообладнання, вивчені методи розрахунку та вимірювання несиметричних режимів, а також – методи та заходи зниження впливу несиметрії на параметри режиму електропостачання. На основі проведених досліджень було запропоноване практичне впровадження пристроїв вимірювання показників якості електроенергії та симетрування напруг.

Результатом виконання роботи можна вважати наступні рішення:

- пропозиція впровадження аналізатора якості електричної енергії;
- приведення даних визначення участі суб'єктів розподілу електроенергії в порушенні симетрії зроблених за допомогою аналізатора АК-3Ф;
- приведення методів усунення несиметрії, оснований на застосуванні спеціальних симетрувальних пристроїв, що дозволяють усунути струми нульової та зворотної послідовностей;
- доведення ефективності встановлення симетрувального пристрою шляхом виконання економічних розрахунків по даним реального підприємства легкої промисловості.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методичні вказівки до виконання магістерських робіт на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня – магістр електротехніки за фахом 8.090603 «Електротехнічні системи електроспоживання». /Укл.: П.Г.Плешков, Н.Ю.Гарасьова – Кіровоград: КДТУ, 2002-44 с.
2. Гриб О.Г. Контроль и регулирование несимметричных режимов в системах электроснабжения. – Харків: ХГАГХ, 2003. – 180с.
3. Сулейманов В.М., Каладзе Т.Л. Электричні мережі та системи. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 139-143с.
4. Гриб. О.Г., Сокол Е.И., Жаркин А.Ф. Качество электрической энергии. Том 2. Контроль качества электрической энергии. Под общей редакцией д.т.н., профессора Гриба О.Г. – Харків, 2014 р. – 54с.
5. Гриб. О.Г., Сокол Е.И., Жаркин А.Ф. Качество электрической энергии. Том 2. Контроль качества электрической энергии. Под общей редакцией д.т.н., профессора Гриба О.Г. – Харків, 2014 р. – 42-49с.
6. Пристрої для компенсації провалів напруги. – <http://www.powertessa.com/>
7. Шиндловский А.К., Москаленко Г.А. Симметрирующие устройства с трансформаторными фазосдвигающими элементами. – К.: Наукова думка, 1981. – 204с.
8. Минц М.Я., Чинков В.Н., Гриб О.Г. Симметрирование системы токов трехфазной сети. – Энергетика, 1984. – №10. – 16-20с.
9. Гриб О.Г. Автоматическое симметрирующее устройство на базе микропроцессора. – Энергетика, 1987. – №7. – 25-29с.
10. Гриб О.Г. Погрешность и устойчивость процесса симметрирования трехфазных сетей. – Энергетика, 1987. – №4 – 53-55.
11. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261с.

12. Сендерович Г.А. Математическая модель для исследования несимметричных режимов в трехфазной сети. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2005. – №57. – 86-93с.
13. Сендерович Г.А. Влияние погрешности сопротивления связи с системой на определение долевого участия субъектов в нарушении симметрии напряжений. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – №17. – 120-128с.
14. Сендерович Г.А., Гриб О.Г., Щербакова П.Г. Качество электрической энергии. Том 4. Определение долевого участия потребителей и поставщиков в ответственности за нарушение качества электроэнергии. – Харьков, 2014. – 249-253с.
15. Гриб О.Г., Сокол Е.И., Жаркин А.Ф. Качество электрической энергии. Том 1. Экономико-правовая база качества энергии в Украине и Евросоюзе. Под общей редакцией д.т.н., профессора Гриба О.Г. – Харків, 2014 р. – 285-286с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А. Охорона праці.

Основні організаційно-технічні заходи з техніки безпеки

Оформлення робіт. Всі планові експлуатаційні роботи виконуються за нарядом або, в окремих випадках, за усним розпорядженням. Наряд – це письмове розпорядження, що визначає категорію і характер роботи, місце, час і умови її безпечного проведення, кваліфікаційний склад бригади і осіб (керівник робіт і наглядач), відповідальних за точне дотримання правил техніки безпеки і спеціальних приписів, зазначених у наряді. В процесі роботи заборонено змінювати її категорію і кордони без виписки нового наряду або користуватися вантажопідйомними механізмами, які не зазначені в наряді.

В аварійних випадках роботи дозволено виконувати без наряду. Кваліфікація керівника при цьому повинна відповідати категорії виконуваної роботи (на контактній мережі - група не нижче V).

Без наряду можна виконувати деякі прості роботи, які не вимагають здійснення комплексу організаційно-технічних заходів.

Допуск до робіт. Проводиться після підготовки місця роботи, що перевіряє відповідальний керівник і виконавець роботи спільно з допускаючим. До контактної мережі допуск здійснює керівник роботи після отримання наказу енергодиспетчера і перевірки виконання всіх необхідних технічних заходів. Допускаючий перевіряє склад бригади, зачитує основні пункти наряду, проводить інструктаж на місці робіт, показує бригаді приєднання, що залишаються під напругою і т. п., демонструє відсутність напруги, показуючи накладені заземлення (при напрузі понад 35 кВ) або торкаючись струмоведучих частин рукою після перевірки відсутності напруги покажчиком або штангою.

Нагляд під час робіт. Його виконують виконавець (керівник) робіт або спостерігач, які повинні весь час перебувати на місці роботи. У разі їх

відлучки бригада виводиться з місця роботи. Кваліфікаційна група спостерігача залежить від категорії робіт і напруги електроустановки, контактної мережі і ЛЕП.

Перерви робіт, перехід на інше робоче місце і закінчення робіт. У цих випадках потрібна підвищена увага, контроль з боку виконавця (керівника), який спостерігає і допускає за всією бригадою і кожним її членом. Напруга може бути подана після виведення всієї бригади з місця роботи, перевірки закінчення роботи і стану обладнання, зняття заземлень і плакатів.

Якщо при виконанні роботи по наряді сталася аварія або електротравма, то наряд необхідно зберігати в архіві підприємства.

Проведення відключень. Вони виконуються роз'єднувачами, віддільниками або вимикачами навантаження, які не містять автоматичного приводу на включення, вимкненням запобіжників, відокремленням або зняттям шин або проводів (шлейфів). При цьому з кожного боку від місця роботи повинен бути видимий (відкритий) розрив. З метою забезпечення безпеки приводи замикають в відключеному положенні висячим або блокувальним замком, а при дистанційному управлінні видаляють запобіжники на всіх полюсах.

Вивішування попереджувальних плакатів, установка огорож і видача попереджень. Це виконують з метою виключення подачі напруги на місце роботи. На ключах керування, рукоятках і кнопках приводів, на підставах запобіжників вивішують плакати.

Щоб не допускати перекриття ізолюючих сполучень або секційних ізоляторів струмоприймачами електрорухомого складу і подачі тим самим напруги в контактну мережу, стрілки і з'їзди на станціях або окремі ділянки шляху закриваються для руху. Це здійснюється за наказом поїзного диспетчера черговими відповідних станцій по заявці енергодиспетчера. У ряді випадків (при відсутності зв'язку з енергодиспетчером) керівник робіт сам вживає всіх заходів до огорожі зони робіт і забезпечення безпеки працюючих.

При роботі зі знімною ізолюючою вишкою в умовах поганої видимості на поїзді повинні також видаватися попередження про особливу пильність і, при необхідності, подачі сигналів в зоні роботи бригади з ізолюючою знімною вишкою порядком.

Перевірка відсутності напруги і накладення заземлення. Перевірка відсутності напруги виконується для електроустановок напругою до 110 кВ включно з допомогою попередньо перевіреного покажчика напруги. Для електроустановок напругою 35÷220 кВ в суху погоду дозволяється виконувати спеціальною ізолюючою штангою перевірку «на іскру і потріскування». Відсутність напруги в контактній мережі постійного струму напругою 3,3 кВ і змінного струму 27,5 кВ перевіряють, торкаючись до заземлених елементів, що знаходяться під напругою, спеціальним вістрям заземлюючої штанги, прикріпивши її попередньо до заземлювача (рейки) або приладом дистанційного контролю.

Накладення і зняття заземлень в установках напругою понад 1000 В повинні виконувати дві особи. В установках до 1000 В накладати і знімати заземлення, а також включати і вимикати заземлювальні ножі може одна людина. Надійне і за правилами виконане заземлення - основний захід захисту як від робочого, так і від наведеної напруги. Заземленням знімається також з ліній залишковий електричний заряд.

З метою дотримання послідовності накладення заземлення штанги для контактної мережі повинні мати блокування. Розташування штанг і їх кількість залежать від роду струму контактної мережі, характеру роботи, місця роботи, а також від характеристики обладнання, що відключається.

Установка шунтуючих штанг і спеціальних шунтів при роботі під напругою. Це виконується з метою створення в зоні роботи еквіпотенційних умов при нормальному режимі роботи і в аварійних випадках (пробою ізоляції ізолюючого захисного засобу і ізоляції електроустановок, контактної мережі і т. п.).

Розрахунок блискавкозахисту будівлі

Найбільш небезпечним при появі блискавки з точки зору ураження будівель є прямий удар. Очікувана кількість уражень блискавкою в рік будівель і споруд висотою не більше 60 м, не обладнаних грозозахистом і які мають незмінну висоту, визначають за формулою:

$$N = (B + 6h_x)(L + 6h_x)n \cdot 10^{-6},$$

де B – ширина об'єкту, що захищається, м; L – довжина об'єкту, що захищається, м; h_x – висота об'єкту по його боковим сторонам, м; n – середнє число уражень блискавкою 1 км² земної поверхні в рік, значення якого наведено в таблиці 12.2 [9] в залежності від інтенсивної грозової діяльності.

З табличних даних приймається, що захисна зона відноситься до типу Б категорії грозозахисту III. Під зоною захисту грозовідводу розуміють частину простору, всередині якого споруда чи будівля захищена від прямих ударів блискавки з деякою ступінню надійності. Розрізняють зони захисту типу А, де ступінь захисту складає 99,5% і вище, та зону захисту типу Б зі ступінню надійності 95% і вище.

При інтенсивності грозової діяльності 60-80 год/рік приймається $n = 9$ (табл. 12.2 [10]) та $B = 36$ м; $L = 90$ м; $h_x = 11$ м:

$$N = (36 + 6 \times 11)(90 + 6 \times 11)9 \times 10^{-6} = 0,143.$$

Приймається виконання захисту двома окремо розміщеними металевими грозовідводами стрижневого типу висотою $h = 50$ м на відстані $l = 110$ м.

Для зони Б при $l > 1,5h$ ($110\text{ м} > 75\text{ м}$) параметри зони захисту визначаються (див. рис. 4.2.):

$$r_0 = 1,5h = 1,5 \times 50 = 75 \text{ м}, \quad r_x = 1,5 \times \left(h - \frac{h_x}{0,92} \right) = 1,5 \times \left(50 - \frac{11}{0,92} \right) = 57,065 \text{ м},$$

$$h_0 = 0,92h = 0,92 \times 50 = 46 \text{ м},$$

$$h_c = h_0 - 0,14(l - 1,5h) = 46 - 0,14(110 - 1,5 \times 50) = 41,1 \text{ м},$$

$$r_{cx} = r_0 \frac{h_c - h_x}{h_c} = 75 \frac{41,1 - 6}{41,1} = 64,051 \text{ м}, r_c = r_0 = 75 \text{ м}.$$

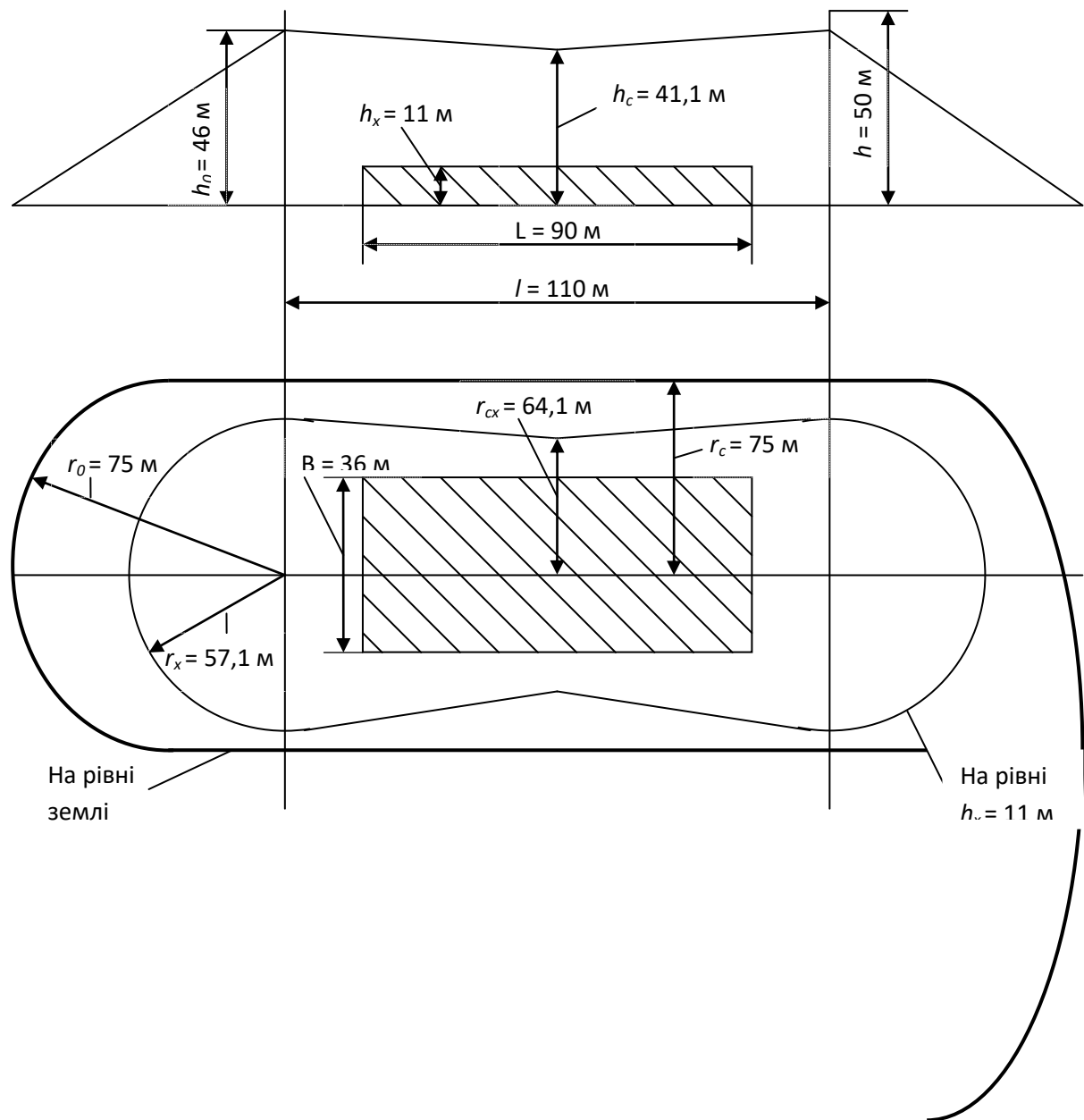


Рис.1 - Зони захисту грозозахисту.

Кожний грозовідвід складається з наступних елементів:

- блискавкоприймач, безпосередньо сприймаючий прямий удар;
- несуча конструкція, що призначена для встановлення блискавкоприймача;
- струмовідвід, що забезпечує відведення струму блискавки в землю;
- заземлення, яке відводить струм блискавки в землю

блискавкоприймача і струмопроводу.

На основі отриманих значень будуються зони захисту даного об'єкту на різних рівнях (рис.1)

Базою для організації безпечного функціонування електроустановок є висока технічна грамотність та професійна дисципліна працюючого персоналу, який зобов'язаний жорстко дотримуватись організаційних та технічних заходів, а також приймати і чергувати під час виконання експлуатаційних операцій.

Основні організаційно-технічні заходи з техніки безпеки складаються з оформлення робіт; допуск до робіт; нагляд під час робіт. Також обов'язковим під час проведення робіт є організація перерви робіт, перехід на інше робоче місце і закінчення робіт, проведення відключень, вивішування попереджувальних плакатів, установка огорож і видача попереджень, перевірка відсутності напруги і накладення заземлення.

Проведений розрахунок контуру заземлення трансформаторної підстанції напругою 10/0,4 кВ визначена кількість та розміри вертикальних заземлювачів, а також довжини з'єднувальної смуги.

Проведений розрахунок блискавкозахисту будівлі, обрані кількість та висота грозовідводів, побудовані їхні захисні зони.

ДОДАТОК Б. Розрахунок електричної мережі ПЛ-0,4 кВ при несиметричному навантаженні

Вихідні дані:



Рис.1. Схема електричної мережі 10/0,38 кВ

I – ідеальне джерело 3-ф напруги 10 кВ;

T – 3-ф трансформатор 10/0,4кВ ТМ-160 зі схемою з'єднання обмоток D/Y_n -0;

ЛЕП – чотирьохпровідна ПЛ-0,38 кВ, виконана проводом А-50, з розташуванням фаз та нульового проводу у вершинах правильного чотирикутника (квадрата) зі стороною 60 см;

U := 380

Н – несиметричне навантаження, задане сталими потужностями фаз.

$$D_{ij} := 60 \cdot 10^{-2} \quad r_N := r \quad r := 4.5 \cdot 10^{-3}$$

Матриця геометричних відстаней між проводами:

$$D := \begin{pmatrix} r & D_{ij} & D_{ij} & \sqrt{2} \cdot D_{ij} \\ D_{ij} & r & \sqrt{2} \cdot D_{ij} & D_{ij} \\ D_{ij} & \sqrt{2} \cdot D_{ij} & r & D_{ij} \\ \sqrt{2} \cdot D_{ij} & D_{ij} & D_{ij} & r_N \end{pmatrix}$$

Електричні параметри лінії:

$$r_0 := 0.588 \quad r_{N0} := r_0 \quad \mu := 1$$

$$\omega := 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314.159$$

$$i := 1..4$$

$$j := 1..4$$

Погонні індуктивності 3-фазної 4-х провідної лінії,

Гн/км:

$$L_{i,j} := \left(2 \cdot \ln \left(\frac{1000}{D_{i,j}} \right) \right) \cdot 10^{-4} \quad L_{i,i} := L_{i,i} + 0.5 \cdot \mu \cdot 10^{-4}$$

$$L = \begin{pmatrix} 2.512 \times 10^{-3} & 1.484 \times 10^{-3} & 1.484 \times 10^{-3} & 1.414 \times 10^{-3} \\ 1.484 \times 10^{-3} & 2.512 \times 10^{-3} & 1.414 \times 10^{-3} & 1.484 \times 10^{-3} \\ 1.484 \times 10^{-3} & 1.414 \times 10^{-3} & 2.512 \times 10^{-3} & 1.484 \times 10^{-3} \\ 1.414 \times 10^{-3} & 1.484 \times 10^{-3} & 1.484 \times 10^{-3} & 2.512 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

Матриця індуктивних опорів ділянки лінії довжиною 1 км:

$$x_0 := \omega \cdot L = \begin{pmatrix} 0.789 & 0.466 & 0.466 & 0.444 \\ 0.466 & 0.789 & 0.444 & 0.466 \\ 0.466 & 0.444 & 0.789 & 0.466 \\ 0.444 & 0.466 & 0.466 & 0.789 \end{pmatrix}$$

$$z_0 := \begin{pmatrix} r_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{N0} \end{pmatrix} + j \cdot x_0$$

$$z_0 = \begin{pmatrix} 0.588 + 0.789i & 0.466i & 0.466i & 0.444i \\ 0.466i & 0.588 + 0.789i & 0.444i & 0.466i \\ 0.466i & 0.444i & 0.588 + 0.789i & 0.466i \\ 0.444i & 0.466i & 0.466i & 0.588 + 0.789i \end{pmatrix}$$

$$l=0,2 \text{ км}$$

– довжина лінії, км

$$Z_{abcN} := z_0 \cdot l = \begin{pmatrix} 0.118 + 0.158i & 0.093i & 0.093i & 0.089i \\ 0.093i & 0.118 + 0.158i & 0.089i & 0.093i \\ 0.093i & 0.089i & 0.118 + 0.158i & 0.093i \\ 0.089i & 0.093i & 0.093i & 0.118 + 0.158i \end{pmatrix}$$

Трансформатор 10/0,4 ТМ 160:

$$Z_T := 10.55 + j \cdot 28.13$$

$$k := \frac{10}{0.4} = 25$$

$$Z_{T1} := Z_T$$

$$Z_{T2} := Z_T$$

$$Z_{T0} := Z_T$$

Матриця опорів трансформатора:

$$Z_{T120} := \begin{pmatrix} Z_{T1} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{T2} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{T0} \end{pmatrix}$$

Матриці переходу (перетворення) між системами координат:

$$a := \frac{-1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \quad e30 := \frac{\sqrt{3}}{2} - j \cdot \frac{1}{2} \quad \text{– поворот на } 30 \text{ градусів за часовою стрілкою}$$

$$s_s := \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -0.5 - 0.866i \\ -0.5 + 0.866i \end{pmatrix} \quad \text{– вектор для отримання 3-фазних векторів ABC}$$

$$\underline{s}_s := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{– матриця переходу від координат симетричних складових до системи фазних координат;}$$

$$\underline{k}_s := \begin{pmatrix} e_{30} & 0 & 0 \\ 0 & \overline{e_{30}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{– матриця переходу для фазних струмів и напруг вторинної обмотки до первинної для 11-ої групи з'єднання обмоток}$$

Матриця фазних опорів трансформатора:

$$\underline{Z}_{Tabc} := \underline{s} \cdot \underline{Z}_{T120} \cdot \underline{s}^{-1} = \begin{pmatrix} 10.55 + 28.13i & 0 & 0 \\ 2.772 \times 10^{-15} - 3.858i \times 10^{-15} & 10.55 + 28.13i & -1.776i \times 10^{-15} \\ -1.884 \times 10^{-15} + 2.082i \times 10^{-15} & -1.776i \times 10^{-15} & 10.55 + 28.13i \end{pmatrix}$$

Джерело :

$$U_{10} := 10 \quad \text{kV}$$

$$E := \frac{U}{\sqrt{3}} = 219.393 \quad E_3 := \frac{U_{10}}{\sqrt{3}} \cdot 1.05 = 6.062$$

Фазні напруги:

$$\underline{E}_{0abc} := \underline{E} \cdot \underline{s}_s = \begin{pmatrix} 219.393 \\ -109.697 - 190i \\ -109.697 + 190i \end{pmatrix} \quad \underline{E}_{3abc} := \underline{E}_3 \cdot \underline{s}_s = \begin{pmatrix} 6.062 \\ -3.031 - 5.25i \\ -3.031 + 5.25i \end{pmatrix}$$

Навантаження:

$$\underline{\cos} := 0.9 \quad \underline{\text{tg}} := \sqrt{\frac{1}{\cos^2} - 1} = 0.484$$

$$P_{abc} := \begin{pmatrix} 10 \\ 30 \\ 50 \end{pmatrix}$$

$$Q_{abc} := P_{abc} \cdot \text{tg} = \begin{pmatrix} 4.843 \\ 14.53 \\ 24.216 \end{pmatrix}$$

$$S_{abc} := P_{abc} + j \cdot Q_{abc}$$

$$S_{abc} = \begin{pmatrix} 10 + 4.843i \\ 30 + 14.53i \\ 50 + 24.216i \end{pmatrix}$$

$$P_{\Sigma} := \sum P_{abc} = 90 \qquad Q_{\Sigma} := \sum Q_{abc} = 43.589$$

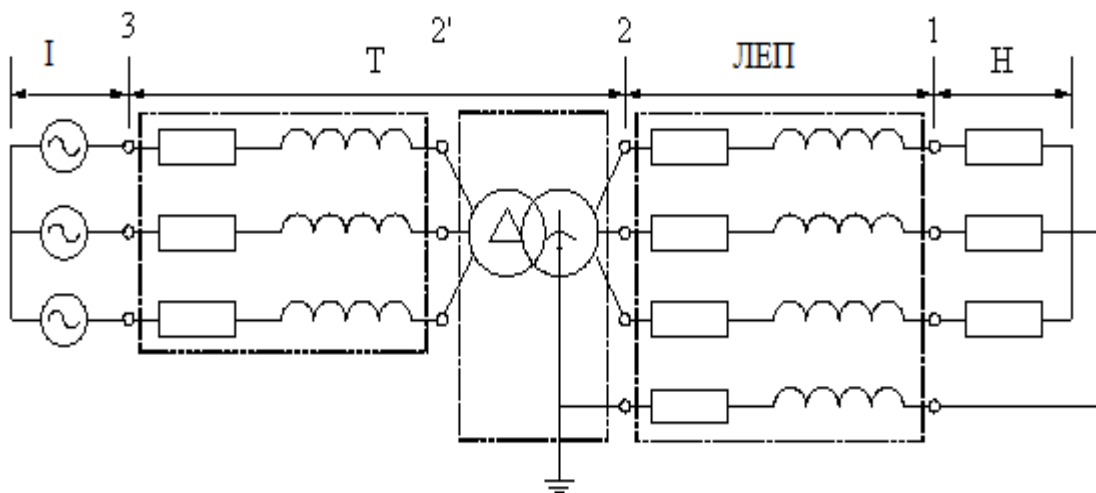


Рис.2 Схема заміщення електричної мережі

Розрахунок несиметричного режиму в фазних координатах

Початкове наближення для U_1

$$U_{1abc} := E_{0abc} = \begin{pmatrix} 219.393 \\ -109.697 - 190i \\ -109.697 + 190i \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{|U_{1abc}|} = \begin{pmatrix} 219.393 \\ 219.393 \\ 219.393 \end{pmatrix}$$

Перша ітерація

1. Розрахунок 4-х провідної лінії

$$J_{abc} := \text{diag}(\overline{U_{1abc}})^{-1} \cdot \overline{S_{abc}} \cdot 10^3 = \begin{pmatrix} 45.58 - 22.076i \\ -125.724 - 85.308i \\ -18.361 + 252.557i \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{— фазні струми} \\ \text{навантаження, А} \end{array}$$

$$J_N := -\sum J_{abc} = 98.505 - 145.174i \quad \text{— струм в нейтралі, А. Напрямок від ЦП}$$

$$I_{abcN} := \begin{pmatrix} J_{abc1} \\ J_{abc2} \\ J_{abc3} \\ J_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 45.58 - 22.076i \\ -125.724 - 85.308i \\ -18.361 + 252.557i \\ 98.505 - 145.174i \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{— струм в фазах ВЛ та} \\ \text{нульовому проводі лінії,} \\ \text{А} \end{array}$$

$$\Delta U_{abcN} := Z_{abcN} \cdot I_{abcN} = \begin{pmatrix} 6.155 - 0.079i \\ -8.172 - 18.077i \\ -18.853 + 29.062i \\ 20.87 - 10.905i \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{— падіння напруги} \\ \text{в проводах ПЛ, В} \end{array}$$

$$\overrightarrow{|\Delta U_{abcN}|} = \begin{pmatrix} 6.155 \\ 19.839 \\ 34.641 \\ 23.547 \end{pmatrix}$$

$$\Delta S_{abcN} := \overrightarrow{(\overline{I_{abcN}} \cdot \Delta U_{abcN})} \cdot 10^{-3} = \begin{pmatrix} 0.282 + 0.132i \\ 2.57 + 1.576i \\ 7.686 + 4.228i \\ 3.639 + 1.956i \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{– втрати потужності} \\ \text{проводах лінії, кВт} \end{array}$$

$$S_{2,abc0} := \left[\begin{pmatrix} S_{abc1} \\ S_{abc2} \\ S_{abc3} \\ 0 \end{pmatrix} + \Delta S_{abcN} \right] = \begin{pmatrix} 10.282 + 4.975i \\ 32.57 + 16.105i \\ 57.686 + 28.444i \\ 3.639 + 1.956i \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{– потужність на початку} \\ \text{лінії, кВА} \end{array}$$

2. Розрахунок трансформатора (точки 2 та 2' – обмотка низької напруги, 3 – високої)

$$I_{2abc} := \text{submatrix}(I_{abcN}, 1, 3, 1, 1) = \begin{pmatrix} 45.58 - 22.076i \\ -125.724 - 85.308i \\ -18.361 + 252.557i \end{pmatrix}$$

$$U_{2abc} := U_{1abc} + \text{submatrix}(\Delta U_{abcN}, 1, 3, 1, 1) = \begin{pmatrix} 225.548 - 0.079i \\ -117.869 - 208.077i \\ -128.549 + 219.062i \end{pmatrix}$$

$$\overrightarrow{|\mathbf{U}_{2abc}|} = \begin{pmatrix} 225.548 \\ 239.143 \\ 253.994 \end{pmatrix}$$

Напруга в точці 2', кВ

$$k = 25$$

$$U_{2'abc} := \frac{k \cdot s \cdot k_s \cdot s^{-1} \cdot U_{2abc}}{1000} = \begin{pmatrix} 5.111 - 3.163i \\ -4.957 - 3.002i \\ -0.154 + 6.165i \end{pmatrix}$$

$$\arg(U_{2abc}) = \begin{pmatrix} -0.02 \\ -119.53 \\ 120.405 \end{pmatrix} \cdot \text{deg} \qquad \arg(U_{2'abc}) = \begin{pmatrix} -31.752 \\ -148.798 \\ 91.432 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

Струм в точці 2', A :

$$I_{2'abc} := \frac{1}{k} \cdot s \cdot k_s \cdot s^{-1} \cdot I_{2abc} = \begin{pmatrix} 1.477 - 6.342i \\ -3.956 - 1.46i \\ 2.479 + 7.803i \end{pmatrix}$$

$$\overrightarrow{|I_{2'abc}|} = \begin{pmatrix} 6.512 \\ 4.217 \\ 8.187 \end{pmatrix}$$

$$\arg(I_{2'abc}) = \begin{pmatrix} -76.894 \\ -159.74 \\ 72.371 \end{pmatrix} \cdot \text{deg} \qquad \arg(I_{2abc}) = \begin{pmatrix} -25.842 \\ -145.842 \\ 94.158 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

Падіння напруги в трансформаторі:

$$\Delta U_{Tabc} := \frac{Z_{Tabc} \cdot I_{2'abc}}{1000} = \begin{pmatrix} 0.194 - 0.025i \\ -6.592 \times 10^{-4} - 0.127i \\ -0.193 + 0.152i \end{pmatrix}$$

$$U_{3.abc} := U_{2'abc} + \Delta U_{Tabc}$$

$$\overrightarrow{|U_{3.abc}|} = \begin{pmatrix} 6.189 \\ 5.862 \\ 6.327 \end{pmatrix}$$

Втрати потужності в трансформаторі:

$$\Delta S_{Tabc} := \overrightarrow{\left(\overline{I_{2'abc}} \cdot \Delta U_{Tabc} \right)} = \begin{pmatrix} 0.447 + 1.193i \\ 0.188 + 0.5i \\ 0.707 + 1.886i \end{pmatrix}$$

Потужність на стороні високої напруги трансформатора:

$$S_{3abc} := \overrightarrow{\left(\overline{I_{2'abc}} \cdot U_{3.abc} \right)} = \begin{pmatrix} 28.056 + 28.938i \\ 24.181 + 5.139i \\ 48.43 + 18.375i \end{pmatrix}$$

$$\sum S_{3abc} = 100.667 + 52.451i$$

3. Розрахунок режиму напруг

$$I_{2'abc} := \text{diag}(\overline{E_{3abc}})^{-1} \cdot \overline{S_{3abc}} = \begin{pmatrix} 4.628 - 4.773i \\ -2.729 - 3.031i \\ -1.369 + 8.434i \end{pmatrix}$$

$$\overrightarrow{|I_{2'abc}|} = \begin{pmatrix} 6.649 \\ 4.078 \\ 8.545 \end{pmatrix} \quad \Delta U_{Tabc} := \frac{Z_{Tabc} \cdot I_{2'abc}}{1000} = \begin{pmatrix} 0.183 + 0.08i \\ 0.056 - 0.109i \\ -0.252 + 0.05i \end{pmatrix}$$

$$\overrightarrow{|\Delta U_{Tabc}|} = \begin{pmatrix} 0.2 \\ 0.123 \\ 0.257 \end{pmatrix}$$

$$U_{2'abc} := E_{3abc} - \Delta U_{Tabc} = \begin{pmatrix} 5.879 - 0.08i \\ -3.088 - 5.141i \\ -2.779 + 5.2i \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{|E_{3abc}|} = \begin{pmatrix} 6.062 \\ 6.062 \\ 6.062 \end{pmatrix}$$

$$\overrightarrow{|U_{2'abc}|} = \begin{pmatrix} 5.88 \\ 5.997 \\ 5.896 \end{pmatrix}$$

$$U_{2abc} := 1000 \cdot \frac{1}{k} \cdot s \cdot \overline{k_s} \cdot s^{-1} \cdot U_{2'abc} = \begin{pmatrix} 207.075 + 116.889i \\ -7.117 - 238.811i \\ -199.959 + 121.922i \end{pmatrix}$$

$$\overrightarrow{|U_{2abc}|} = \begin{pmatrix} 237.788 \\ 238.917 \\ 234.197 \end{pmatrix}$$

$$I_{2abc} := k \cdot s \cdot \overline{k_s} \cdot s^{-1} \cdot I_{2'abc} = \begin{pmatrix} 106.183 - 25.156i \\ -19.617 - 165.479i \\ -86.566 + 190.635i \end{pmatrix}$$

$$I_N := -\left(\sum I_{2abc}\right) = -4.263 \times 10^{-14} + 2.842i \times 10^{-14}$$

$$U_N := \sum U_{2abc} = -2.842 \times 10^{-14}$$

$$U_{1abcN} := \left[\begin{pmatrix} U_{2abc_1} \\ U_{2abc_2} \\ U_{2abc_3} \\ U_N \end{pmatrix} - Z_{abcN} \cdot \begin{pmatrix} I_{2abc_1} \\ I_{2abc_2} \\ I_{2abc_3} \\ I_N \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} 192.963 + 112.985i \\ -16.334 - 218.46i \\ -176.738 + 105.012i \\ 0.11 + 0.462i \end{pmatrix}$$

$$\overrightarrow{|U_{1abcN}|} = \begin{pmatrix} 223.607 \\ 219.07 \\ 205.581 \\ 0.475 \end{pmatrix}$$

Розрахунок режиму трифазної мережі з параметричною несиметрією і несиметричним навантаженням. Розрахунок виконується методом послідовних наближень по заданій наперед кількості ітерацій (зазвичай 4-5 ітерацій цілком достатньо).

Результати розрахунку режиму лінії:

$$\text{Res} = (17.883 + 28.293i \quad 192.261 + 113.3i \quad -16.482 - 218.803i \quad -175.906 + 105.032i \quad 0.127 + 0.471i)$$

$$\underline{T} := \text{Res}^T \quad - \text{ вектор результатів з 5-и елементів}$$

Фазні напруги:

$$|T_2| = 223.162$$

$$|T_3| = 219.423$$

$$|T_4| = 204.877$$

Лінійні напруги:

$$|T_2 - T_3| = 392.258$$

$$|T_3 - T_4| = 360.95$$

$$|T_4 - T_2| = 368.26$$

Напруга на нейтралі:

$$|T_5| = 0.488$$

$$\Delta P_{\text{mp}} := \text{Re}(\text{Res}^T)_1 = 17.883$$

– втрати потужності в ПЛ і Т

ДОДАТОК В. Звіт подібності.