

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____ Петро ПЛЄШКОВ
“ ____ ” _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:
«Дослідження несиметричних режимів роботи
електричних мереж та розробка заходів по зниженню
впливу несиметрії на параметри режиму»
«Research into asymmetrical modes of operation of
electrical networks and development of measures to reduce
the impact of asymmetry on mode parameters»

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу групи ЕЕ-24М
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»,
освітньо-професійної програми
«Електротехнічні системи
електроспоживання»
_____ Олексій ПОЛЩУК
« ____ » _____ 2025 р.

Керівник роботи
доцент, канд.техн.наук
_____ Ігор ПЕРЕВЕРЗЄВ
« ____ » _____ 2025 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університетФакультет будівництва, транспорту та енергетикиКафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджментуРівень вищої освіти другий (магістерський)Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Петро ПЛЄШКОВ

«_____» _____ 2025 р.

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

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Дослідження несиметричних режимів роботи електричних мереж та розробка заходів по зниженню впливу несиметрії на параметри режиму
Research into asymmetrical modes of operation of electrical networks and development of measures to reduce the impact of asymmetry on mode parameters

2. Керівник роботи (проекту) Переверзєв Ігор Олексійович, к.т.н., доцент

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 02.12.2025 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи

1. Несиметричні режими в електричних системах: причини, наслідки та засоби обмеження. 2. Вплив несиметрії на роботу електрообладнання. 3. Методи та засоби вимірювання несиметрії в системах електропостачання. 4. Методи та засоби зменшення несиметрії. 5. Вплив учасників процесу розподілу електроенергії на порушення симетрії в мережі. 6. Охорона праці.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Несиметричні режими в електричних системах: причини, наслідки та засоби обмеження</i>	06.10.2025	
2	<i>Вплив несиметрії на роботу електрообладнання</i>	15.10.2025	
3	<i>Методи та засоби вимірювання несиметрії в системах електропостачання</i>	22.10.2025	
4	<i>Методи та засоби зменшення несиметрії</i>	09.11.2025	
5	<i>Вплив учасників процесу розподілу електроенергії на порушення симетрії в мережі</i>	15.11.2025	
6	<i>Охорона праці</i>	21.11.2025	
7	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	27.11.2025	
8	<i>Оформлення презентаційної частини роботи</i>	02.12.2025	

Дата видачі завдання

« ____ » _____ 2025 р.

Підпис керівника _____

Ігор ПЕРЕВЕРЗЄВ

Завдання прийнято до виконання

« ____ » _____ 2025 р.

Підпис здобувача _____

Олексій ПОЛЩУК

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 101 с.; 27 рис.; 6 табл.; 17 джерел, 2 додатка

Поліщук О.І. Дослідження несиметричних режимів роботи електричних мереж та розробка заходів по зниженню впливу несиметрії на параметри режиму. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». Центральноукраїнський національний технічний університет. Кропивницький, 2025 р.

Метою роботи є систематизація та комплексний аналіз загальних відомостей про несиметричні режими, їхнього впливу на електрообладнання, а також дослідження існуючих методів, засобів вимірювання, розрахунку та зниження несиметрії у системах електропостачання.

Об'єкт та предмет дослідження: трифазні системи електропостачання, що працюють у несиметричних режимах; методи і засоби вимірювання, розрахунку та зниження несиметрії, а також оцінка участі суб'єктів розподілу у порушенні симетрії.

Методи дослідження: для виконання роботи застосовувалися методи системного аналізу та узагальнення для класифікації несиметричних режимів та їхнього впливу. Використовувалися методи теорії електричних кіл та метод симетричних складових для аналізу та розрахунку несиметричних режимів. Ефективність симетрувальних пристроїв оцінювалася за допомогою порівняльного аналізу різних схем та методів симетрування.

Ключові слова: система електропостачання, електроприймачі, несиметрія, несиметричні режими, симетрувальний пристрій, несиметрія напруг.

SUMMARY

Qualification work: 101 p.; 17 Fig.; 6 tables; 17 sources

Polishchuk O. Research into asymmetrical modes of operation of electrical networks and development of measures to reduce the impact of asymmetry on mode parameters. 141 "Electric power, electrical engineering and electromechanics" EPP, "Electrotechnical Systems of Power Consumption". Central Ukrainian National Technical University. Kropyvnytskyi, 2025.

The purpose of the work is to systematize and comprehensively analyze general information about asymmetric modes, their impact on electrical equipment, as well as to study existing methods, means of measurement, calculation and reduction of asymmetry in power supply systems.

Object and subject of the study: three-phase power supply systems operating in asymmetric modes; methods and means of measurement, calculation and reduction of asymmetry, as well as assessment of the participation of distribution entities in symmetry violation.

Research methods: to perform the work, methods of system analysis and generalization were used to classify asymmetric modes and their impact. Methods of the theory of electrical circuits and the method of symmetrical components were used to analyze and calculate asymmetric modes. The effectiveness of balancing devices was assessed by means of a comparative analysis of various schemes and methods of balancing.

Key words: power supply system, electrical consumers, asymmetry, asymmetric modes, balancing device, voltage asymmetry.

ЗМІСТ

	Перелік скорочень	6
	Вступ	7
1.	Несиметричні режими в електричних системах: причини, наслідки та засоби обмеження	8
2.	Вплив несиметрії на роботу електрообладнання	12
3.	Методи та засоби вимірювання несиметрії в системах електропостачання	18
	3.1. Вимірювання несиметрії	18
	3.2. Методика розрахунку несиметричних режимів	24
4.	Методи та засоби зменшення несиметрії	34
	4.1. Симетрування трифазної мережі з нульовим проводом	35
	4.2. Симетрування трипровідних трифазних мереж	41
	4.3. Методика симетрування трифазних мереж за допомогою фазних потужностей	51
	4.4. Симетрування та компенсація реактивної потужності в трифазних мережах	55
	4.5. Похибка та стійкість процесу симетрування трифазних електричних мереж	58
	4.6. Типові схеми симетрувальних систем у мережах електропостачання	62
5.	Вплив учасників процесу розподілу електроенергії на порушення симетрії в мережі	70
	5.1. Вплив фазового зсуву на визначення участі учасників процесу розподілу електричної енергії	71
	5.2. Вплив похибки у визначенні опору зв'язку з системою	75
	Висновки	81
	Список літератури	83
	Додатки	85
А	Розрахунок електричної мережі ПЛ-0,4 кВ при несиметричному навантаженні	86
Б	Охорона праці в умовах несиметричних режимів роботи електроустановок	97

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АД - асинхронний двигун

БК - батареї конденсаторів

ЕЕ – електроенергія

ЕП – електроприймачі

ЕРС - електрорушійна сила

ККД - коефіцієнт корисної дії

КУ - конденсаторні установки

ЛЕП - лінія електропередачі

МРБН - межі розподілу балансової належності

РЗ - релейний захист

РП - реактивна потужність

СЕП - система електропостачання

СП - симетрувальний пристрій

ТЗП - точка загального приєднання

ВСТУП

У сучасних електроенергетичних системах забезпечення надійності та якості електропостачання є одним із ключових завдань, від ефективного розв'язання якого залежить стабільність роботи промислових підприємств, комунальної інфраструктури та побутових споживачів. Одним із факторів, що істотно впливає на параметри та режими роботи електричних мереж, є несиметрія напруг.

Найчастіше несиметрія напруг виникає внаслідок нерівномірного розподілу навантаження між фазами. У мережах високої напруги подібні режими, як правило, спричиняються роботою потужних однофазних електроприймачів, а також трифазних установок із неоднаковим споживанням у фазах. Такі прояви несиметрії особливо характерні для систем, де спостерігається значна концентрація нелінійних або специфічних технологічних навантажень.

Несиметричний режим роботи електричних мереж призводить до низки негативних наслідків. Зокрема, він може викликати перегрів ізоляції електричних машин, зниження крутного моменту та збільшення втрат потужності в асинхронних двигунах. У синхронних машинах можливе виникнення небезпечних вібрацій, а також погіршення умов генерації реактивної потужності генераторами, компенсаторами та батареями статичних конденсаторів. Сукупність цих факторів здатна спровокувати лавинний розвиток напруги, що становить серйозну загрозу для стабільності всієї енергосистеми. Крім того, несиметричні режими суттєво ускладнюють роботу релейного захисту та автоматичних систем керування, що може знизити їхню чутливість, селективність та надійність. Усе це підкреслює важливість детального вивчення природи виникнення несиметрії та методів її компенсування для забезпечення безпечної та якісної роботи електричних мереж.

1. НЕСИМЕТРИЧНІ РЕЖИМИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ: ПРИЧИНИ, НАСЛІДКИ ТА ЗАСОБИ ОБМЕЖЕННЯ

Практично всі робочі стани електричних систем мають несиметричний характер. Несиметрія режимів полягає в тому, що вектори напруги або струму в різних фазах електропередачі мають неоднакове абсолютне значення, а також фазові кути між ними відрізняються від $\pm 120^\circ$.

У більшості випадків несиметрія є незначною, тому нею можна знехтувати при розрахунках, не отримуючи відчутних похибок. Однак існують ситуації, коли несиметрія стає суттєвою, і її необхідно обов'язково брати до уваги під час аналізу функціонування електричних систем.

Основні фактори виникнення несиметрії. Виділяють три головні причини, які спричиняють несиметричні режими в електропередачах:

1. Несиметричне фазове навантаження.

Цей вид несиметрії виникає через різницю в значенні електрорушійної сили (ЕРС) генераторів, коефіцієнтів трансформації, або через нерівномірний розподіл однофазних споживачів по фазах тощо. Вона має випадковий (стохастичний) характер і зазвичай призводить до невеликих відхилень від нормального режиму. Таке несиметричне навантаження, як правило, не справляє помітного впливу на режимні характеристики електропередачі.

2. Розбіжність у параметрах фаз електропередачі.

Основна причина — геометрична несиметрія розташування фазних проводів у просторі. Наприклад, коли провoda розташовані на опорах по вершинах рівнобічного трикутника, їх взаємне розміщення симетричне. Проте вони знаходяться на різній висоті відносно землі, що викликає несиметрію ємнісних поперечних провідностей. При горизонтальному розташуванні провіда перебувають на однаковій висоті, але їх взаємне розташування несиметричне (відстань між крайніми фазами вдвічі більша, ніж між центральною і крайньою). Це призводить до розбіжності між взаємними індуктивностями та ємністю між

різними фазами. Неминуча розбіжність електричних параметрів ліній за фазами викликає несиметрію струмів і напруг.

3. Неповнофазні режими роботи ліній.

Вони можуть бути спричинені короткочасним (через короткі замикання чи інші аварійні відключення) або тривалим (під час пофазного ремонту) вимкненням однієї або двох фаз. Тривала експлуатація в неповнофазних режимах дозволяє підвищити надійність постачання енергії, адже споживачі отримуватимуть електроенергію, хоча й в обмеженому обсязі. Однак, тривала робота в таких режимах обмежується різким зниженням якості електроенергії та економічності роботи всієї електричної системи.

Негативні наслідки несиметричних режимів. Виникнення струмів і напруг зворотної та нульової послідовностей у несиметричних станах призводить до низки негативних явищ:

- додаткові втрати та погіршення показників: виникають додаткові втрати потужності в елементах схеми електропередачі, що погіршує техніко-економічні показники;

- зсув нейтралі та перенапруги: режими характеризуються зсувом нейтралі трифазної системи напруг (виникає напруга зсуву), це може призводити до підвищення напруги в одних фазах і зменшення в інших; неприпустимі перенапруги, що виникають, можуть бути критичними для лінійної ізоляції; зсув нейтралі негативно впливає на електроприймачі, оскільки напруга на їхніх затискачах може суттєво відрізнятись від номінального значення;

- перегрів обладнання: зростання струмів у певних фазах може викликати неприпустиме перегрівання струмопровідних елементів, особливо обмоток трансформаторів, генераторів та двигунів;

- зниження пропускної здатності та стійкості: в несиметричних умовах суттєво зменшується пропускна здатність електропередачі, оскільки знижується стійкість паралельної роботи об'єднаних енергосистем;

- вплив на електричні машини: струми зворотної послідовності створюють у статорі магнітне поле, що обертається відносно ротора у зворотному напрямку

з подвоєною синхронною швидкістю, це поле викликає пульсуючий гальмівний електромагнітний момент і додаткове нагрівання роторів; в асинхронних двигунах це призводить до додаткових втрат у статорі та різкого зменшення моменту обертання; у синхронних машинах можуть виникати небезпечні вібрації, які потенційно можуть спричинити руйнування; ускладнюються умови генерації реактивної потужності синхронними генераторами та компенсаторами, що може спровокувати лавину напруги;

- ускладнення роботи релейного захисту: різко погіршуються умови функціонування релейного захисту та автоматики, налаштування яких мусить враховувати можливі несиметричні стани;

- електромагнітна індукція: незбалансовані електромагнітні поля навколо ліній надвисокої напруги можуть індукувати значні (часто неприпустимі) ЕРС у сусідніх лініях зв'язку та електропередачі нижчих класів напруги;

- підвищення небезпеки для людей: збільшується ризик ураження людини струмом через неприпустиме зростання крокової та дотичної напруг.

Заходи для симетрування режимів.

Зважаючи на всі негативні наслідки, важливо контролювати і обмежувати несиметрію в режимах роботи електричної системи.

Транспозиція фаз. Найефективнішим методом для зменшення несиметрії напруги/струму, спричиненої розбіжністю параметрів фаз, є транспозиція фазних провідників лінії.

- Цей захід полягає в періодичній зміні чергування фазних проводів у просторі на спеціально призначених транспозиційних опорах.

- Для ліній довжиною понад 100 км рекомендується виконувати повний цикл транспозиції між основними пунктами (електростанціями, підстанціями).

- Використання транспозиції дозволяє вирівняти розбіжність параметрів ліній по фазах і знизити несиметрію до допустимого рівня.

Інші заходи. Можливе застосування інших методів, націлених на симетрування фазних параметрів, таких як зміна відносної висоти підвісу фаз або зменшення кроку розщеплення середньої фази. Однак такі дії часто недостатньо ефективні (наприклад, зменшення несиметрії за зворотною послідовністю може супроводжуватися зростанням несиметрії за нульовою) і потребують більших капітальних інвестицій.

Нормативні обмеження. Згідно з чинними нормативними документами в Україні, гранично допустимі значення коефіцієнтів зворотної і нульової послідовностей обмежуються 2% і 4% відповідно.

Окрім причин виникнення, розрізняють два види несиметрії за їхнім характером:

1. Систематична несиметрія: Викликана постійним нерівномірним перевантаженням однієї з фаз.

2. Імовірнісна (випадкова) несиметрія: Відповідає непостійним навантаженням. При цьому в різний час перевантажуються різні фази через випадкові чинники (така несиметрія також називається переміжною).

2. ВПЛИВ НЕСИМЕТРІЇ НА РОБОТУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

Причини та наслідки несиметрії напруг.

Несиметрія напруг, як правило, виникає через нерівномірне навантаження в електромережі (рис.2.1).

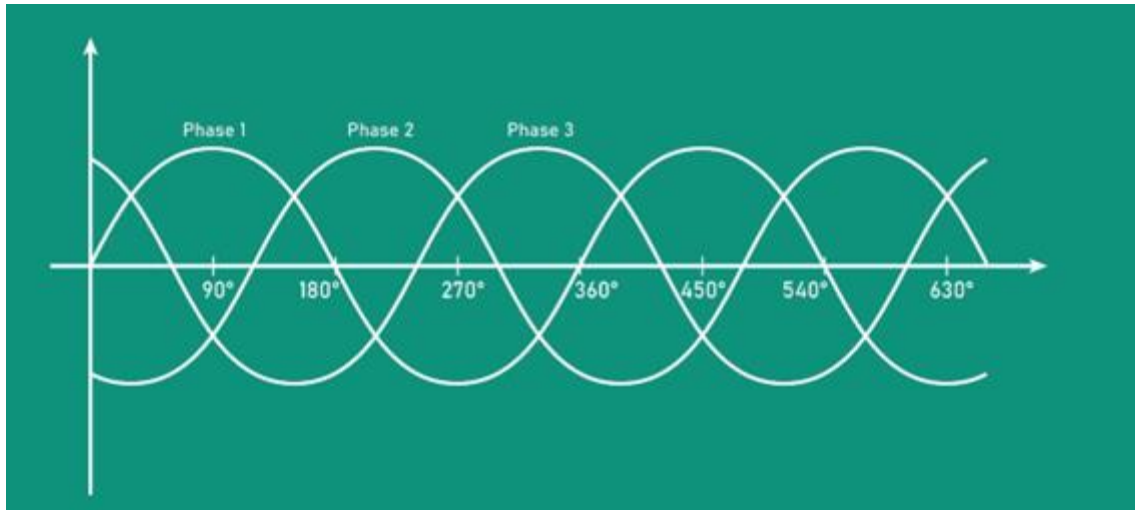


Рис.2.1. Форма хвилі змінного струму трифазного джерела живлення.

Коли в системі електропостачання протікають несиметричні струми, це спричиняє різні падіння напруги на елементах мережі, що призводить до формування несиметричної системи напруг на виводах електроприймачів (ЕП).

У фазі з перевантаженням відхилення напруги може перевищувати допустимі норми, тоді як напруги в інших фазах можуть залишатися в межах нормативних значень.

Окрім погіршення режиму напруги, несиметричні умови істотно ускладнюють роботу як самих ЕП, так і всіх компонентів мережі. Це знижує надійність функціонування електрообладнання та системи електропостачання в цілому. Важливо також зазначити, що несиметрія напруги може бути викликана не тільки несиметричним навантаженням, але й неоднаковими параметрами ліній електропередачі або несправностями (наприклад, обривом фази).

Вплив на трифазні електроприймачі (асинхронні двигуни).

Дія несиметричного режиму значно відрізняється від симетричного, особливо для поширених трифазних ЕП, таких як асинхронні двигуни (АД) (рис.2.2).

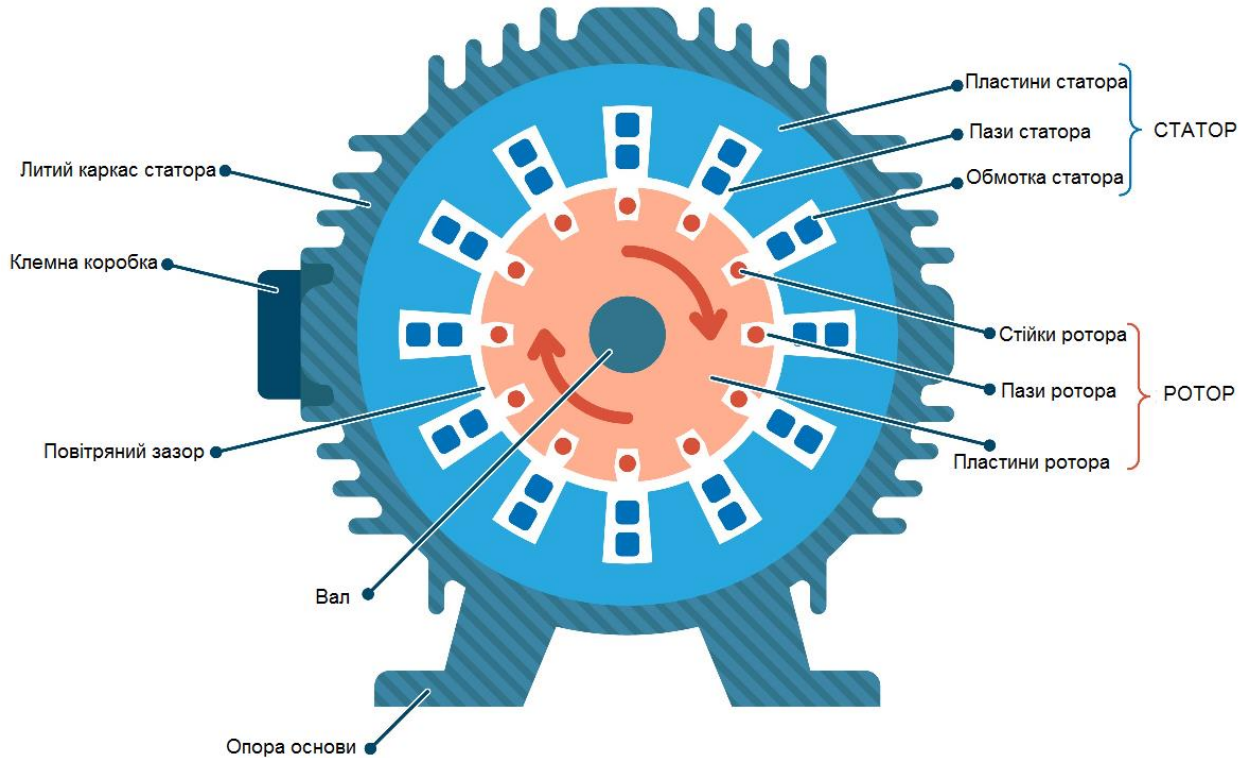


Рис.2.2. Асинхронний двигун

Для них ключове значення має напруга зворотної послідовності U_2 . Електричний опір зворотної послідовності Z_2 у двигунах приблизно дорівнює опору при загальмованому роторі $Z_{зам}$ і, відповідно, в 5–8 разів менший за опір прямої послідовності Z_1 .

$$Z_2 \approx Z_{зам} \ll Z_1$$

Як наслідок, навіть невеликий ступінь несиметрії напруг призводить до виникнення значних струмів зворотної послідовності I_2 . Ці струми I_2 , накладаючись на струми прямої послідовності I_1 , спричиняють додаткове нагрівання обмоток статора та ротора. Це особливо критично для масивних частин ротора і є причиною прискореного старіння ізоляції, що скорочує термін

служби обладнання. Крім того, несиметрія зменшує корисну потужність двигуна (знижує його коефіцієнт корисної дії – ККД):

- при несиметрії напруги 4% термін служби повністю завантаженого АД може скоротитися вдвічі;

- при 5% несиметрії доступна потужність двигуна знижується на 5-10%.

Зміна напруги на виводах двигуна також впливає на його ковзання і, відповідно, на швидкість обертання. Цей фактор є критичним для виробництв, де частота обертання визначає продуктивність машин (наприклад, у житлово-комунальному господарстві, на виробничих лініях, бурових установках). Навіть невеликі відхилення швидкості можуть істотно впливати на кінцеву продуктивність у потокових процесах.

Несиметрія призводить до додаткових збитків через:

1. Втрати активної потужності у АД.
2. Додаткове споживання реактивної потужності.
3. Скорочення ресурсу ізоляції.
4. Зниження продуктивності механізмів.

Вплив на синхронні машини.

У синхронних машинах (генераторах та компенсаторах) несиметрія напруги мережі, окрім додаткового нагріву статора й ротора та втрат реактивної потужності, може викликати небезпечні вібрації. Це відбувається внаслідок появи знакозмінних обертових моментів і тангенціальних сил, що пульсують з подвоєною частотою мережі ($2f$).

При значній несиметрії вібрація може стати критичною, особливо якщо наявні дефекти зварних з'єднань або недостатня механічна міцність. Однак, зазвичай, якщо несиметрія струмів не перевищує 30%, небезпечні перенапруги в елементах конструкцій не виникають.

Правила технічної експлуатації (ПТЕ) електричних мереж і станцій встановлюють обмеження на довготривалу роботу:

- турбогенератори: допускається різниця струмів фаз не більше 10% від номінального струму статора;

- гідрогенератори: допускається різниця струмів фаз не більше 20% від номінального струму статора.

При цьому струми в жодній із фаз не повинні перевищувати номінальних значень. Якщо ці умови не виконуються, необхідно вживати заходів для зменшення несиметрії.

Вплив на інші елементи системи.

Струми нульової та зворотної послідовності.

Струми зворотної та нульової послідовності призводять до збільшення сумарних струмів в окремих фазах мережі, що спричиняє зростання втрат активної потужності та може стати неприпустимим з точки зору нагріву провідників.

Струми нульової послідовності I_0 також протікають через заземлювачі, що спричиняє висушування ґрунту та збільшення опору заземлювальних пристроїв. Це може бути недопустимим для:

- надійної роботи релейного захисту (РЗ);
- підсилення впливу на низькочастотні установки зв'язку;
- пристроїв залізничного блокування.

Вентильні випрямлячі та конденсаторні установки.

Несиметрія напруги значно погіршує режими роботи багатофазних вентильних випрямлячів:

- збільшується пульсація випрямленої напруги;
- погіршуються умови функціонування системи імпульсно-фазового керування тиристорних перетворювачів.

Конденсаторні установки (КУ) за умов несиметрії нерівномірно завантажуються реактивною потужністю по фазах. Це унеможливорює повне використання їхньої встановленої реактивної потужності. Крім того, КУ можуть посилювати існуючу несиметрію, оскільки видача реактивної потужності Q в мережу пропорційна квадрату напруги U^2 на їхніх виводах:

$$Q \sim U^2$$

Тобто, у фазі з найменшою напругою видача Q буде меншою, ніж в інших фазах.

Однофазні електроприймачі та вимірювальні пристрої.

Несиметрія напруги також відчутно впливає на однофазні ЕП. При нерівних фазних напругах:

- наприклад, лампи розжарювання, підключені до фази з вищою напругою, матимуть більший світловий потік, ніж лампи, підключені до фаз із нижчою напругою;

- ускладнюється робота РЗА (релейного захисту та автоматики);
- виникають помилки в роботі електролічильників та інших вимірювальних пристроїв.

Існує декілька ключових технічних рішень та організаційних заходів, спрямованих на мінімізацію несиметрії напруг в системах електропостачання, особливо в розподільчих мережах 0,4 кВ.

1. Симетризація навантаження.

Найбільш ефективний та базовий метод боротьби з несиметрією, спричиненою нерівномірним однофазним навантаженням

- раціональне розподілення споживачів: слід забезпечити максимально рівномірний розподіл потужності однофазних електроприймачів між усіма трьома фазами мережі, це вимагає періодичного контролю та переключення споживачів між фазами, особливо в житлових та невеликих промислових зонах, де навантаження часто змінюється.

- використання симетризуючих пристроїв (СП): спеціалізовані пристрої (наприклад, симетризуючі трансформатори або статичні компенсатори) можуть бути встановлені для перетворення несиметричного навантаження у відносно симетричне; вони працюють шляхом компенсації струмів зворотної та нульової послідовності, які є причиною несиметрії напруг.

2. Технічні заходи в мережі.

Ці заходи спрямовані на зменшення опорів елементів мережі, що призводять до несиметричних падінь напруги:

- збільшення перерізу проводів: використання кабелів та проводів більшого перерізу знижує активний та індуктивний опір лінії. Зменшення опору (R , X) призводить до менших падінь напруги $\Delta U = I \cdot Z$ при протіканні несиметричних струмів I .

- зменшення опору нейтрального проводу: багато несиметрій пов'язано з великим струмом нульової послідовності I_0 , який протікає через нульовий провідник N ; покращення якості нульового провідника (наприклад, використання провідника N з перерізом, рівним фазним провідникам, або його додаткове заземлення) зменшує опір протіканню I_0 та, відповідно, падіння напруги в нульовому проводі.

- роздільне живлення споживачів: для великих однофазних споживачів (наприклад, високопотужних зварювальних апаратів, електротермічних установок) доцільно виділяти окремі лінії живлення з власною системою компенсації, щоб їхній вплив не поширювався на основну мережу загального користування.

3. Регулювання режимів роботи.

Підтримання номінальної напруги - використання регулюючих трансформаторів на підстанціях (наприклад, з перемиканням відгалужень без збудження (ПБЗ) або під навантаженням (РПН)) для підтримання напруги на виводах трансформатора, близької до номінальної, що обмежує загальне відхилення напруги.

Компенсація реактивної потужності (РП) - встановлення конденсаторних установок не лише для покращення коефіцієнта потужності, але й для коректної підтримки рівня напруги в окремих точках мережі. Однак, як зазначалося, самі КУ можуть посилювати несиметрію, тому їхнє включення має бути симетричним або керованим.

3. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ НЕСИМЕТРІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

3.1. Вимірювання несиметрії

Вимірювання симетричних складових напруги та струму в електромережах необхідно здійснювати як для синусоїдальної напруги, так і за умови присутності вищих гармонік. Для визначення симетричних складових напруги і струму застосовують різноманітні підходи, що ґрунтуються на кореляційній обробці сигналів.

Кореляційні методи обробки сигналів, які базуються на дискретному перетворенні Фур'є, забезпечують високий рівень захисту від перешкод. Вони дають можливість вимірювати симетричні складові майже в реальному часі або ж у квазіреальному.

Вимірювання симетричних складових у цьому випадку відбувається на основі розрахунку квадратурних складових прямої, зворотної та нульової послідовностей, використовуючи квадратурні складові фазних напруг.

Основні методи вимірювання.

До методів, що використовують кореляційну обробку сигналів, належать:

- метод, що базується на зміні інтегральних показників кусково-гармонійних напруг;
- пошуковий метод визначення амплітуд та фаз;
- метод, який ґрунтується на обчисленні ортогональних складових напруг;
- метод, заснований на попередньому перетворенні трифазної напруги у двофазну з подальшим обчисленням ортогональних складових цієї двофазної напруги.

Усі зазначені методи можуть бути реалізовані за допомогою схем різної складності та мають різну швидкість дії. При цьому кожен із них має високу стійкість до перешкод при наявності гармонік у мережі, а також пристосованість до коливань основної частоти.

Вибір конкретного методу залежить від вимог, які висуваються до системи контролю несиметрії реальної мережі. Перевага надається критерію швидкодії або простоти схемної реалізації.

Метод із перетворенням трифазної напруги у двофазну.

Останній метод (з перетворенням трифазної напруги у двофазну) реалізується простішою схемою порівняно з іншими. Його спрощеність пояснюється тим, що він використовує кореляційну обробку сигналів після попереднього перетворення початкової системи трифазних величин.

Перетворенню у двофазну підлягає саме трифазна напруга. Вимірюються діючі значення напруг, а потім за ними обчислюються симетричні складові.

Принцип вимірювання (основа методу). 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 n – це вимірювана послідовність напруг або струмів; α – оператор, який здійснює поворот на 120° .

У формулі (3.1) напруги прямої та зворотної послідовностей є сумою фазних напруг, де напруги фаз В і С зміщуються на $\pm 120^\circ$ за допомогою оператора повороту. Перетворивши у вираженні $\alpha = e^{j120^\circ}$ у формулу 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 та зворотної послідовностей напруг (3.2) та (3.3) трифазну напругу перетворюють у двофазну, використовуючи вирази (3.4) і (3.5).

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

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

Шляхом підстановки виразів (3.4) і (3.5) у формули (3.2) і (3.3) отримуються вирази (3.6) і (3.7).

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

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

Для миттєвих значень вирази мають вигляд (3.8) і (3.9):

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

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

Наступним кроком є визначення ортогональних складових двофазної напруги, які описуються формулою (3.10):

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

$V(t)$ і $W(t)$ мають початкові фази, позначені як ψ_v і ψ_w .

Ортогональні складові V_x , V_y , W_x , W_y можуть бути виміряні, наприклад, кореляційним методом. При застосуванні дискретного перетворення Фур'є для цих складових можна записати вирази (3.11):

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

Обчислення прямої та зворотної послідовностей напруг виконується за алгоритмами (3.12) та (3.13), або за спрощеними формулами (3.14) та (3.15).

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

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

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

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

Рисунок 3.1 ілюструє структурну схему, що реалізує цей метод вимірювання.

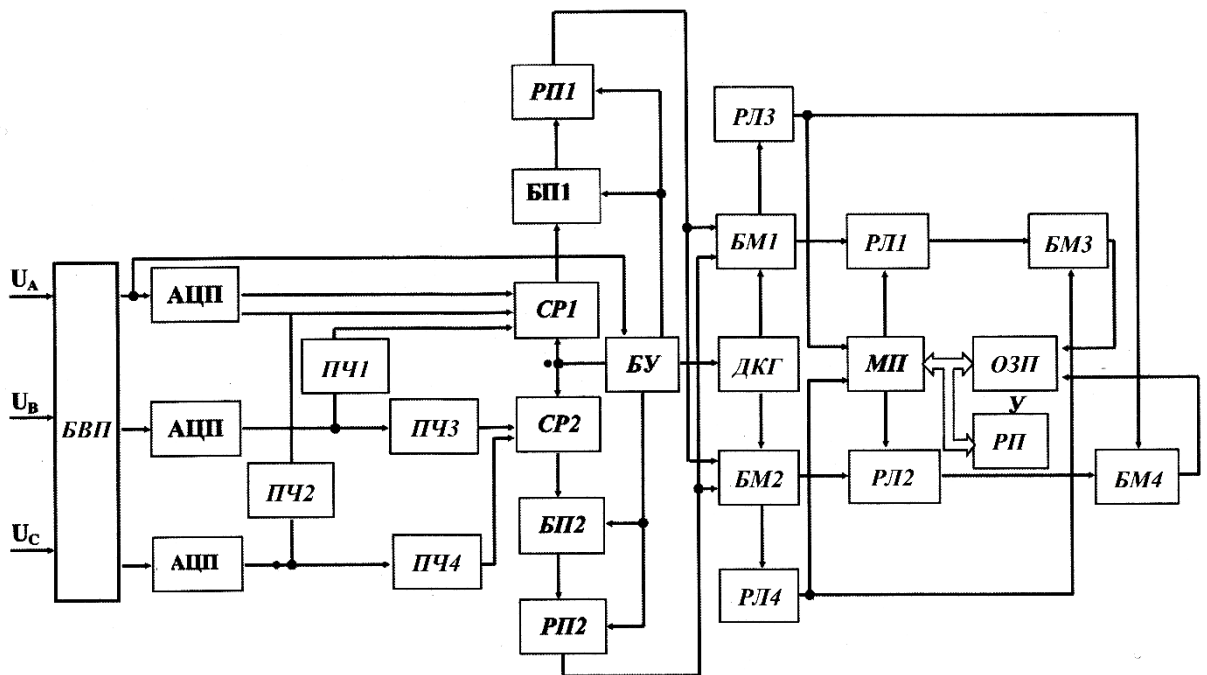


Рис.3.1. Структурна схема цифрового вимірювача.

Цифровий вимірювач прямої та зворотної послідовностей напруги включає такі елементи:

- блок вхідних пристроїв (БВП);
- аналого-цифрові перетворювачі (АЦП);
- подільники частоти (ПЧ1-ПЧ4);
- реверсивні суматори (СР1, СР2);
- блоки перенесення (БП1, БП2);
- регістри пам'яті (РП1, РП2);
- блок управління (БУ);
- блоки множення (БМ1-БМ4);
- датчик кодів гармонік (ДКГ);
- реверсивні лічильники (РЛ1-РЛ4);
- мікропроцесор (МП);
- оперативно-запам'ятовуючий пристрій (ОЗП);
- реєструючий пристрій (РП).

Принцип дії цифрового пристрою.

1. Напруги U_A, U_B, U_C надходять до АЦП через БВП.
2. Числові коди, які відповідають миттєвим значенням напруг $U_A(t), U_B(t), U_C(t)$ з АЦП, поступають на СР1. З АЦП фази А код йде на додавання, а з АЦП фаз В і С коди йдуть на віднімання (через ПЧ1 і ПЧ2 з коефіцієнтом ділення 0,87).
3. В результаті в СР1 формується код, пропорційний напрузі $v(t)$, згідно з виразом (3.8).
4. З АЦП фаз В і С коди, пропорційні $U_B(t)$ і $U_C(t)$, надходять до СР2 (через ПЧ3 і ПЧ4 з коефіцієнтом ділення 0.5).
5. У СР2 формується код напруги $w(t)$ відповідно до формули (3.9).
6. Коди $v(t)$ і $w(t)$ із суматорів СР1 і СР2 вводяться в РП1 і РП2 через БП1 і БП2 за командою від БУ.
7. Після перенесення кодів $v(t_i)$ і $w(t_i)$ реверсивні суматори СР1 і СР2 обнуляються для запису наступних миттєвих значень.

8. За командою від БУ код напруги $v(t_i)$ надходить на БМ1 і БМ2, де відбувається множення на коди $\cos(\omega t_i)$ та $\sin(\omega t_i)$, які задаються ДКГ.
9. Добуток $v(t_i)\cos(\omega t_i)$ з БМ1 надходить на РЛ1, а добуток $v(t_i)\sin(\omega t_i)$ з БМ2 – на РЛ2.
10. У наступний момент часу код $w(t_i)$ множиться в БМ1 і БМ2 на ті ж ортогональні функції $\cos(\omega t_i)$ та $\sin(\omega t_i)$.
11. Добуток $w(t_i)\cos(\omega t_i)$ з БМ1 йде на РЛ3, а $w(t_i)\sin(\omega t_i)$ з БМ2 – на РЛ4.
12. За період сигналу, після обробки миттєвих значень, в РЛ1–РЛ4 будуть накопичені коди V_x, V_y, W_x, W_y ортогональних складових основної гармоніки напруги.
13. Коди ортогональних складових з лічильників надходять до МП. Квадрати цих кодів вводяться з виходу МП в ОЗП.
14. Коди ортогональних складових з реверсивних лічильників також подаються на входи БМ3 і БМ4. Введення кодів організовано так, щоб на виході отримати коди подвоєних добутків $2V_yW_x$ і $2V_xW_y$.
15. Ці коди з БМ3 і БМ4 із відповідним знаком надходять в ОЗП.
16. Мікропроцесор МП, використовуючи алгоритми (3.12) і (3.13), обчислює симетричні складові.

Запропонований вимірювач дозволяє значно зменшити час вимірювань і виключити похибку, яка виникає при вимірюванні симетричних складових за різними реалізаціями досліджуваної напруги.

Альтернативні реалізації методу. Даний метод може бути реалізований також за допомогою аналого-цифрового та аналогового вимірювачів несиметрії.

Перевага: Простіша схема в порівнянні з цифровим пристроєм.

Недолік: Низька стійкість до перешкод.

Наприклад, аналоговий вимірювач рекомендований для застосування в мережах із низьким рівнем вищих гармонік. У цифрових приладах теж можлива простіша реалізація, якщо до них ставляться занижені вимоги.

Слід також зазначити, що вимірювання симетричних складових методом опорних точок підходить виключно для використання при синусоїдальній напрузі.

3.2. Методика розрахунку несиметричних режимів

Вивчення характеристик несиметричних робочих режимів в електричних енергетичних системах традиційно проводиться за допомогою методу симетричних складових. Цей підхід, який є ключовим для інженерії електричних мереж, дозволяє значно спростити складні розрахунки.

Суть методу полягає у представленні будь-якої несиметричної трифазної системи векторів (наприклад, напруг або струмів) як суми (результату накладення) трьох незалежних симетричних систем:

1. Пряма послідовність (U_1, I_1): характеризується прямим чергуванням фаз (А-В-С) і відповідає робочому режиму системи.
2. Зворотна послідовність (U_2, I_2): має зворотне чергування фаз (А-С-В) і виникає лише за умов несиметрії.
3. Нульова послідовність (U_0, I_0): характеризується збігом векторів усіх трьох фаз за фазою та величиною, присутня лише у разі несиметрії та наявності з'єднання з нейтраллю або землею.

Математична модель ділянки лінії у фазних координатах.

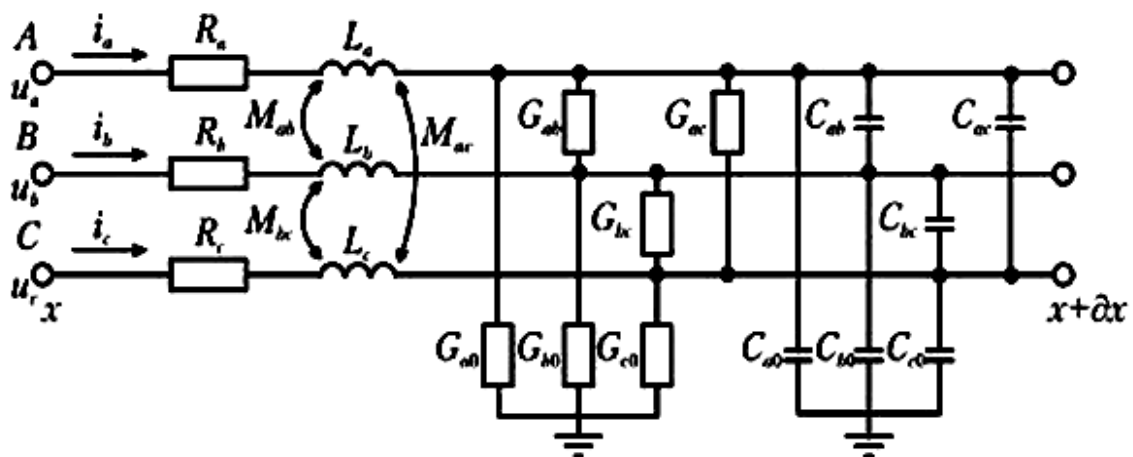


Рис. 3.2. Схема заміщення ділянки лінії у фазних координатах

Розглянемо невелику ділянку dx трифазної лінії електропередачі (рис. 3.2). Згідно з курсом електротехніки, режимні характеристики такої ділянки лінії можна описати за допомогою матричних рівнянь у частинних похідних, які мають вигляд системи (3.16) або в загальній формі (3.16.1).

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

У цих рівняннях використовуються такі миттєві значення: u_a, u_b, u_c – напруги у фазах лінії; i_a, i_b, i_c – струми у фазах лінії.

Параметри лінії включають: активні опори (R_a, R_b, R_c) та коефіцієнти самоіндукції (L_a, L_b, L_c) фазних проводів; коефіцієнти взаємоіндукції між фазами (M_{ab}, M_{ac}, M_{bc}); активні провідності (G_{a0}, G_{b0}, G_{c0}) та ємності (C_{a0}, C_{b0}, C_{c0}) між фазними проводами та землею; активні провідності (G_{ab}, G_{bc}, G_{ac}) та ємності (C_{ab}, C_{bc}, C_{ac}) між відповідними фазними проводами ЛЕП.

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{\partial}{\partial x} U_\phi = R_\phi I_\phi + L_\phi \frac{\partial}{\partial x} I_\phi; \\ -\frac{\partial}{\partial x} I_\phi = G_\phi U_\phi + C_\phi \frac{\partial}{\partial x} U_\phi. \end{array} \right. \quad (3.16.1)$$

Для довгих ліній електропередачі, де вжито заходів щодо забезпечення симетрії, умовно вважається, що фазні параметри окремих фаз лінії є однаковими. За цієї умови матриці фазних параметрів стають симетричними:

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

Аналіз системи (3.16) із врахуванням (3.17) показує, що режим роботи ділянки лінії у фазних координатах описується системою, яка складається з шести рівнянь. Усі матриці параметрів (окрім матриці активних опорів) містять недіагональні елементи, що вказує на взаємний вплив режимних параметрів між окремими фазами. Наприклад, явище взаємоіндукції між сусідніми фазними проводами спричиняє вплив струму однієї фази на струми інших фаз. Аналогічно, взаємні ємності та активні провідності між проводами також впливають на режимні характеристики сусідніх фаз.

Таким чином, математична модель ділянки ЛЕП у фазних координатах має дві сильно зв'язані підсистеми, кожна з яких включає три рівняння. Хоча пряме розв'язання системи (3.16) дозволяє однозначно знайти всі режимні параметри, це пов'язано зі значними труднощами через громіздкість та взаємозалежність рівнянь.

На практиці для спрощення використовують перетворення системи рівнянь у фазних координатах на систему незалежних рівнянь. Таке перетворення досягається множенням векторів фазних струмів та напруг на матрицю відображення S (3.18). Хоча можлива нескінченна кількість таких матриць, найчастіше використовується матриця певного вигляду, що відповідає системі симетричних складових.

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

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

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

Рівняння (3.18) для напруг, з урахуванням вигляду матриці S , набуває вигляду (3.19). Тут індекси 1, 2 і 0 позначають відповідно параметри; прямої послідовності, зворотної послідовності та нульової послідовності. Для системи струмів рівняння аналогічні.

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_0 \end{bmatrix},$$

отже

$$\begin{cases} \dot{U}_a = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0; \\ \dot{U}_b = \underline{a}^2 \dot{U}_1 + \underline{a} \dot{U}_2 + \dot{U}_0; \\ \dot{U}_c = \underline{a} \dot{U}_1 + \underline{a}^2 \dot{U}_2 + \dot{U}_0; \end{cases} \quad (3.19)$$

З аналізу виразів (3.19) випливає, що трифазна система напруг може бути представлена як суперпозиція трьох симетричних систем напруг (рис. 3.3): пряма послідовність (пряме чергування фаз), зворотна послідовність (зворотне чергування фаз), нульова послідовність (напруги збігаються за фазою).

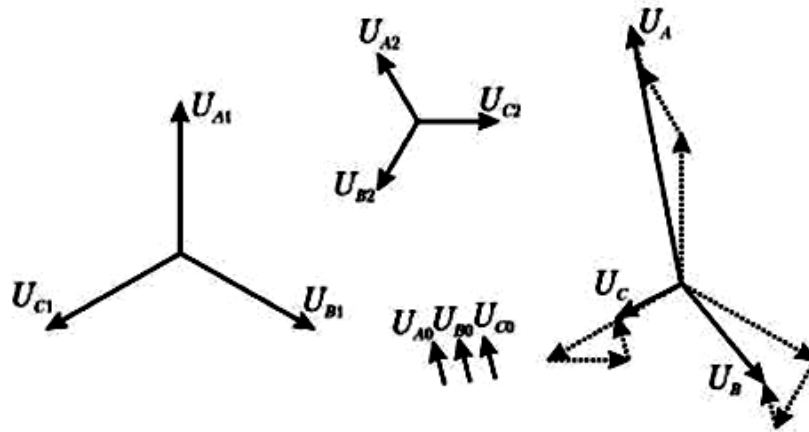


Рис.3.3. Графічна ілюстрація методу симетричних напруг

Зворотне перетворення із системи симетричних складових у систему фазних координат здійснюється за допомогою оберненої матриці відображення S^{-1} (3.39) або (3.20). У разі симетричної трифазної системи напруг (або струмів), параметри зворотної та нульової послідовностей будуть дорівнювати нулю, а параметри прямої послідовності збігатимуться з параметрами фази А у фазній системі координат.

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

Тоді:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix},$$

або

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

Таким чином, матричні рівняння (3.16.1) можуть бути записані у вигляді:

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

Домноживши ліворуч усі складові на матрицю S^{-1} , отримаємо (3.22):

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

де U та I — це вектори напруг і струмів у системі симетричних складових, а R, L, G, C — матриці параметрів схеми заміщення.

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

Матриці параметрів ділянок лінії в симетричних складових є діагональними (3.24). Структура цих матриць (3.24) показує, що параметри окремих симетричних складових є незалежними, тобто не впливають один на одного. Це означає, що система з шести взаємозалежних рівнянь у фазних координатах перетворюється на три незалежні системи, кожна з яких містить по два рівняння для прямої, зворотної та нульової послідовностей.

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

Властивості та використання системи симетричних складових.

Основна властивість системи симетричних складових полягає у незалежності режимних параметрів кожної складової. Завдяки цьому підхід широко використовується для аналізу як несиметричних, так і симетричних режимів роботи електричних систем. При вивченні симетричних режимів, математична модель елементів електромережі скорочується втричі порівняно з моделлю у фазних координатах, що значно спрощує розрахунки. Режимні параметри, визначені для прямої послідовності, повністю відповідають параметрам фази А симетричного режиму. Параметри інших фаз можна легко отримати, змінивши фази на $\pm 120^\circ$.

Для аналізу несиметричних режимів необхідно додатково визначити параметри схем заміщення лінії для зворотної та нульової послідовностей. З виразів (3.24) видно, що параметри схеми для зворотної послідовності повністю збігаються з параметрами прямої послідовності. Слід пам'ятати, що напруги зворотної та нульової послідовностей зазвичай значно менші за напругу прямої послідовності. Тому втрати на корону та поперечні активні провідності є важливими тільки для схем заміщення прямої послідовності.

Параметри схем заміщення для нульової послідовності будуть відрізнятися від параметрів прямої послідовності. Це пояснюється тим, що в контурі нульової послідовності як зворотний провід виступає земля та грозозахисні троси. Це призводить до зростання погонних поздовжніх опорів та поперечних провідностей лінії.

Вплив грозозахисних тросів. При визначенні погонних параметрів ЛЕП для нульової послідовності обов'язково потрібно враховувати вплив грозозахисних тросів. В іншому випадку електромагнітні поля, які створюються струмами нульової послідовності, будуть незбалансовані. У грозозахисних тросах можуть наводитись ЕРС взаємоіндукції, що спричиняє додаткові втрати потужності та негативно впливає на режимні параметри ЛЕП.

Щоб обмежити додаткові втрати потужності у грозозахисних тросах надвисоковольтних електропередач, їх часто ізолюють від опори та розрізають

на окремі відрізки, які заземлюють лише в одному місці. Це виключає вплив тросів на параметри схеми заміщення нульової послідовності.

Погонний активний опір нульової послідовності проводів без врахування впливу грозозахисного троса визначається за формулою (3.25):

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

Збільшення активного опору відносно прямої послідовності на 0,15 Ом/км спричинене тим, що земля, погонний опір якої приблизно 0,15 Ом/км, входить у контур нульової послідовності.

Погонний індуктивний опір лінії нульової послідовності без впливу тросів визначають за формулою:

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

Тут $R_{ce} = \sqrt[3]{r_e D_{cep}^2}$ — середньгеометричний радіус фази, а D_3 — еквівалентна глибина зворотного струму, яка визначається за формулою Карсона:

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

де f - частота змінного струму, γ - питома провідність землі.

В оцінкових розрахунках для рівнинних територій України приймають $D_3=1000$ м.

У двоколовій лінії для розрахунку параметрів нульової послідовності необхідно враховувати взаємодукцію між проводами паралельних кіл. Повний погонний опір нульової послідовності такої лінії без тросів визначається виразом (3.27), де D_{I-II} - середньгеометрична відстань між паралельними колами.

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

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

Повний погонний опір z_0 (з урахуванням впливу тросів):

- використовується, коли грозозахисні троси не розрізаються (наприклад, для високочастотних каналів зв'язку);

- визначається за формулою (3.28), яка враховує погонний опір нульової послідовності лінії $Z_{п(0)}$, опір системи тросів $Z_{т(0)}$ та опір взаємодукації між проводом і тросом $Z_{м(0)}$;

- $Z_{т(0)}$ визначається за співвідношенням (3.29), яке включає індуктивний опір $x_{т(0)}$; для сталевих тросів потрібно враховувати нелінійність сталі (3.31);

- $Z_{м(0)}$ визначається за формулою (3.32), яка містить середньгеометричну відстань між проводами і тросами $D_{п.т.}$.

$$\underline{Z}_{0(0)} = \underline{Z}_{п(0)} + \frac{\underline{Z}_{м(0)}}{\underline{Z}_{т(0)}}, \quad (3.28)$$

$$\underline{Z}_{т(0)} = \frac{r_{т}}{n_{т}} + 0,15 + jx_{т(0)} \quad (3.29)$$

$$x_{т(0)} = 0,435 \cdot \lg \frac{D_3}{\sqrt{r_{т.е} \cdot D_{т}}} \quad (3.30)$$

$$x_{т(0)} = 0,435 \cdot \lg \frac{D_3}{\sqrt{r_{т.св} \cdot D_{т}}} + x_{т.су}, \quad (3.31)$$

$$x_{м(0)} = 0,435 \cdot \lg \frac{D_3}{D_{п.т.}} \quad (3.32)$$

Ємнісна провідність b_0 визначається за співвідношенням (3.33), яке включає коефіцієнт ζ (враховує вплив тросів, $\zeta = 1,1$ для надвисокої напруги), середню висоту підвісу проводу $h_{сер}$ та середньгеометричну відстань між фазними проводами і їхніми дзеркальними відображеннями $D'_{сер}$ (рис. 3.4).

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

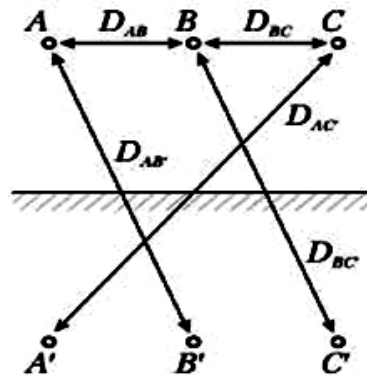


Рис.3.4. Відстань між фазними проводами і їхніми дзеркальними відображеннями

Поперечна активна провідність g_0 відрізняється від провідності прямої та зворотної послідовностей на потроєне значення провідності, яке зумовлене струмами витoku між фазними проводами.

Згідно з виразами (3.24), система симетричних складових вважається незалежною. Однак, ця незалежність (відсутність впливу режимних параметрів однієї послідовності на іншу) можлива лише за умови пофазної симетрії параметрів ЛЕП.

Приклад обчислення несиметричного режиму у фазних координатах наведений у Додатку А.

4. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ЗМЕНШЕННЯ НЕСИМЕТРІЇ

Один із найпростіших способів зменшити несиметрію напруг чи струмів під час експлуатації систем електропостачання (СЕР) — це природне вирівнювання фазних струмів. Його суть полягає у рівномірному розподілі усіх однофазних навантажень між фазами. На жаль, практична реалізація такого підходу майже неможлива. Тому часто доводиться вдаватися до використання спеціальних засобів і методів симетрування трифазних систем.

Збільшення перерізу проводів та підвищення потужності живильних трансформаторів є одним із шляхів зменшення несиметрії напруг. У чотирипровідних мережах також прагнуть зменшити опір нульового провідника за допомогою різноманітних методів. Ці підходи малоефективні, оскільки вимагають значної перевитрати дорогих матеріалів, і при цьому повністю ліквідувати несиметрію напруги не вдається. Варто також зазначити, що електротехнології останнім часом суттєво змінилися: зросла кількість однофазних споживачів та збільшилася одинична потужність трифазних навантажень.

Більш ефективними вважаються методи усунення несиметрії, засновані на застосуванні спеціальних симетрувальних пристроїв (СП). Вони дають змогу ліквідувати струми нульової і зворотної послідовності.

Методи симетрування можна класифікувати таким чином:

- Перетворювальний метод, що базується на трансформації видів енергії.
- Комутаційний метод, який полягає у циклічній комутації однофазного навантаження до фаз мережі.
- Фільтровий спосіб, заснований на відмінності параметрів щодо складових різних фазових послідовностей.
- Компенсаційний метод, який використовує спеціальні СП для компенсації нульової і зворотної послідовностей струму або напруги.

Компенсаційний метод отримав найбільше поширення в системах електропостачання. Він характеризується вищими технічними показниками,

якщо порівнювати його з іншими підходами. Це включає можливість створення уніфікованих засобів, здатних одночасно знижувати рівні вищих гармонік разом із несиметрією струмів/напруг, а також компенсувати реактивну потужність. Крім того, він забезпечує високі енергетичні показники та дозволяє проводити симетрування із заданою точністю. Синтез параметрів СП відбувається з урахуванням необхідності підтримки несиметрії напруг і струмів у допустимих межах при високому коефіцієнті потужності та мінімальній потужності елементів СП.

Симетрувальні пристрої, які застосовують компенсаційний метод, можуть бути як регульованими, так і нерегульованими. Для їх побудови використовуються електричні чи електромагнітні зв'язки. При незмінній величині симетруючих елементів симетрування гарантується лише для одного значення потужності навантаження. Оскільки в СЕП параметри навантаження постійно змінюються, це здатне призвести до перевищення допустимої несиметрії напруги. Саме тому виникає потреба застосовувати СП зі змінними параметрами.

Вирішуючи питання симетрування, важливо паралельно займатися компенсацією реактивної потужності. З огляду на вищесказане, можна зробити висновок, що оптимальним рішенням для сучасних СЕП є використання уніфікованих симетро-компенсуючих пристроїв. Вони дозволяють усунути несиметрію напруг/струмів і компенсувати реактивну потужність у три- та чотирипровідних мережах, навіть за наявності нелінійних спотворень та випадкових змін навантаження.

4.1. Симетрування трифазної мережі з нульовим проводом

Розгляньмо чотирипровідну трифазну систему (рис. 3.1), де джерело має симетричну систему фазних напруг, але підключене навантаження є несиметричним.

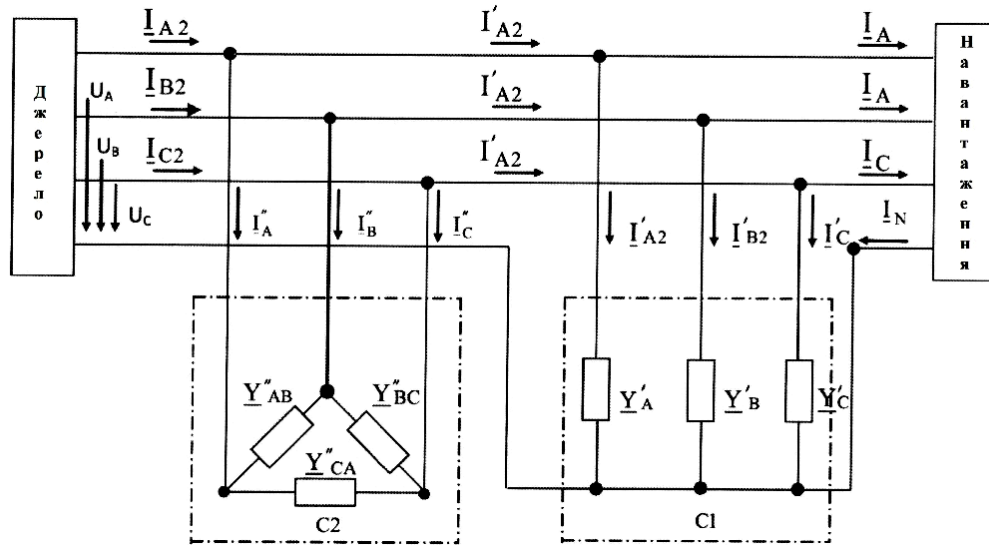


Рис 4.1. Чотирипровідна трифазна мережа з несиметричним навантаженням

У цій ситуації діють певні співвідношення:

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

Коли споживач несиметричний, лінійні струми $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ формують несиметричну систему. Припустимо, що вони містять усі три симетричні складові, головні вектори яких можна знайти за наступним виразом:

$$\underline{I}_r = \frac{1}{3} (\underline{I}_A + a^n \underline{I}_B + a^{2n} \underline{I}_C) \quad (4.1.1)$$

Тут $\alpha = e^{j120^\circ}$ - це оператор повороту на 120° , а n - послідовність напруг і струмів, що вимірюється.

Висловимо струми, що протікають через симетрувальний пристрій C1, через його провідності та фазні напруги генератора:

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

Тоді симетричні компоненти фазного струму C1 будуть наступними:

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

Введемо такі позначення провідностей для спрощення цих виразів:

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

З урахуванням цих позначень отримаємо:

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

Щоб компенсувати струм нульової послідовності споживача, необхідно забезпечити в симетрувальному пристрої С1 струм, який за знаком протилежний струму нульової послідовності навантаження:

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

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

Звідси впливає рівність, яка визначає необхідний склад і параметри СП для усунення струмів нульової послідовності. Хоча елементи СП можуть мати довільний характер, найбільш вигідними та поширеними є пристрої з реактивними елементами. Тому зазвичай провідності фаз СП 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 співвідношення між комплексними провідностями Y'_A, Y'_B, Y'_C та комплексною провідністю Y'_0 , а також зв'язок із струмом нульової послідовності I'_0 . Для цього введемо спряжені комплекси провідностей СП:

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

та спряжений оператор повороту $a = a^2, \quad a^2 = a$.

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

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

що означає $Y'_0 = -Y'_0, \quad Y'_2 = -Y'_1$.

З виразу (4.8) видно, що провідність Y'_0 не залежить від провідності Y'_2 , а отже, і від складової нульової послідовності I'_0 струму навантаження. Таким чином, провідність Y'_0 може бути вибрана довільно, наприклад, $Y'_0 = 0$. Водночас провідність Y'_2 залежить від Y'_0 і дорівнює $Y'_2 = 1/3 Y'_0$.

З урахуванням виразу (4.6) для симетричних складових провідностей пристрою С1 можна записати наступні співвідношення:

$$\left. \begin{aligned} Y'_1 &= \frac{1}{U} I_0^* \\ Y'_2 &= \frac{1}{U} I_0 \\ Y'_0 &= Y_0 \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

Розв'язуючи цю систему рівнянь для провідностей СП, знаходимо:

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

Якщо досягти умови $Y'_0=0$, останній член у формулах (4.10) зникне. Таким чином, СП, параметри якого відповідають рівнянням (4.10), здатний повністю компенсувати струми нульової послідовності в трифазній системі.

Провідності фаз СП можна виразити через дійсні струми споживача, а не тільки через струм нульової послідовності, як це зроблено у формулах (4.10). Підставивши співвідношення (4.1.1) у формули (4.10), 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 розглянемо окремі випадки.

1. Симетрування при однофазному активному навантаженні.

Нехай до фази А чотирипровідної мережі підключено навантаження з провідністю g . Струм споживача становить $I_A = U_A g = U_g$, а струм нульової послідовності дорівнює $I_0 = \frac{1}{3} I_A = \frac{1}{3} U_g$.

Підставляючи цю рівність у вираз (4.10) і припускаючи $Y'_0=0$, визначимо провідності фаз СП:

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

З отриманих співвідношень (4.7) і (4.12) випливає, що провідність СП у фазі А має дорівнювати нулю ($g_A = 0$). Провідності у фазах В і С повинні бути рівні за модулем $|g_B| = |g_C| = \frac{g}{\sqrt{3}}$, але мати протилежний характер: фаза В – виключно індуктивна, фаза С – виключно ємнісна. Схема підключення елементів СП показана на рис. 4.2.

2. Симетрування при двофазному активному навантаженні.

Розглянемо симетрування струмів у чотиріпровідній системі, коли є двофазний активний споживач. Припустимо, до фаз А та В підключені споживачі, провідності яких g_A і g_B показані на рис. 4.3.

Струми в навантаженнях дорівнюють $I_A = U_A g_A = U_{g_A}$; $I_B = U_B g_B = a^2 U_{g_B}$.

Тоді струм нульової послідовності складає: $I_0 = \frac{1}{3}(I_A + I_B) = \frac{U}{3}(g_A + a^2 g_B)$.

Підставляючи це значення у вираз (4.10) за умови $X=0$, 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 виразів (4.7) і (4.13) слідує, що провідності елементів СП пов'язані з провідностями навантажень такими 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, а провідність фази В – індуктивний. Характер провідності фази С залежить від співвідношення провідностей споживачів. Якщо провідності приймачів рівні $g_A = g_B$, то $b_C=0$ (рис.4.3). Якщо провідність навантаження фази А більша за провідність фази В ($g_A > g_B$), до фази С СП слід включити ємнісну провідність. І навпаки, якщо $g_A < g_B$, необхідна індуктивна провідність у фазі С.

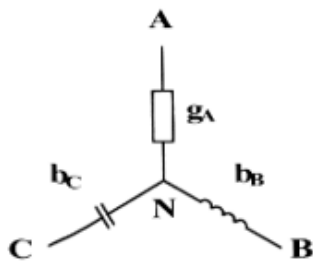


Рис.4.2. Симетрування чотирипровідної трифазної мережі при активному навантаженні

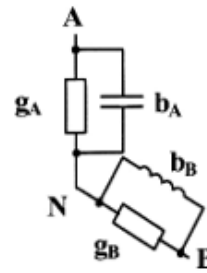


Рис.4.3. Симетрування чотирипровідної трифазної мережі при двофазному активному навантаженні

Схеми СП, отримані для розглянутих вище конкретних випадків (однофазного та двофазного активних навантажень), підтверджують ефективність запропонованої методики. Отримані вирази (4.11) можна застосовувати як у часткових, так і в загальних випадках, для яких відомі формули відсутні.

4.2. Симетрування трипровідних трифазних мереж

Припустимо, лінійні струми джерела I_A , I_B , I_C не містять складових нульової послідовності. Вони або повністю відсутні, або були скомпенсовані симетрувальним пристроєм С1 нульової послідовності, показаним на рис. 4.1. Проте, ці струми мають складові як прямої, так і зворотної послідовностей.

Висловимо основні вектори цих компонентів струмів генератора через основні вектори симетричних складових струмів навантаження та симетрувального пристрою:

$$I_{a1} = I_1 + I'_1; \quad I_{a2} = I_2 + I'_2$$

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

$$\begin{aligned} \underline{I}'_1 &= \underline{I}_1 + UY'_0; \\ \underline{I}'_2 &= \underline{I}_2 + UY'_1 = \underline{I}_2 + I_0^* \end{aligned} \quad (4.14)$$

Очевидно, якщо забезпечити $Y'_0=0$, компенсація струмів нульової послідовності не змінить струму прямої послідовності, тобто $I'_{21} = I_1$.

Струми ліній симетрувального пристрою С2 $\underline{I}''_A, \underline{I}''_B, \underline{I}''_C$ можна виразити через провідності його фаз та фазні напруги джерела (4.15). Припускаючи симетричну систему фазних напруг джерела, підставимо $U_A = U; U_B = a^2U; U_C = aU$ у рівняння (4.15) і після простих перетворень отримаємо (4.16).

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

$$\begin{aligned} I''_A &= U \left[(1 - a^2)Y''_{AB} + (1 - a)Y''_{CA} \right] = U(1 - a)(Y''_{CA} - a^2Y''_{AB}); \\ I''_B &= U \left[(a^2 - 1)Y''_{AB} + (a^2 - a)Y''_{BC} \right] = U(1 - a)(a^2Y''_{AB} - aY''_{BC}); \\ I''_C &= U \left[(a - 1)Y''_{CA} + (a - a^2)Y''_{BC} \right] = U(1 - a)(-Y''_{AC} + aY''_{BC}); \end{aligned} \quad (4.16)$$

Основні вектори струмів прямої \underline{I}''_1 і зворотної \underline{I}''_2 послідовностей СП С2 визначаються так:

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

Врахуємо, що

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

Введемо такі позначення:

$$Y_0'' = \frac{1}{3}(Y_{BC}'' + Y_{CA}'' + Y_{AB}''); \quad (4.17)$$

$$Y_1'' = \frac{1}{3}(Y_{BC}'' + aY_{CA}'' + a^2Y_{AB}'');$$

де Y_0'' та Y_1'' - це нульова та пряма послідовності провідностей СП С2.

Отримаємо:

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

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

Симетричні складові струмів генератора запишемо як суму складових навантаження та СП:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{\sigma 1} &= \underline{I}'_{\sigma 1} + \underline{I}_1'', \\ \underline{I}_{\sigma 2} &= \underline{I}'_{\sigma 2} + \underline{I}_2''. \end{aligned}$$

Підставляючи сюди формули (4.14), (4.18) і (4.19), отримуємо (4.20).

$$\begin{aligned} \underline{I}_{\sigma 1} &= \underline{I}_1 + UY_0' + \underline{I}_1'' = \underline{I}_1 + U(Y_0' - 3Y_0''); \\ \underline{I}_{\sigma 2} &= \underline{I}_2 + I_0^* - 3UY_1''. \end{aligned} \quad (4.20)$$

Для компенсації струмів зворотної послідовності ($I_{2\Gamma} = 0$) отримуємо перше рівняння для параметрів СП С2:

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

Друге рівняння (4.22) знаходимо, підсумовуючи співвідношення $Y_2'' = \frac{1}{3}(Y_{BC}'' + a^2Y_{CA}'' + aY_{AB}'')$, а третє рівняння можна вибрати довільно, задавши провідність Y_0'' (4.23).

$$-Y_2'' = Y_1'' = \frac{1}{3U} \left(\underline{I}_2 + I_0^* \right) \quad (4.22)$$

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

Отримана система рівнянь має вигляд:

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

Враховуючи, що $Y_{BC}'', Y_{CA}'', Y_{AB}''$ є симетричними складовими комплексної провідності, виразимо провідності симетрувального пристрою С2 через Y_1'', Y_2'', Y_0'' :

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

Підставивши (4.24) і виконавши перетворення, отримаємо:

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

Переписавши (4.25) у вигляді:

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

Оскільки компенсація нульової та зворотної послідовностей виконується реактивними елементами, коефіцієнт потужності мережі може змінитися. Вирази (4.26), залежно від вибору, дозволяють досягти симетрування із заданими коефіцієнтами потужності.

Розглянемо випадок, коли разом із симетруванням, здійснюється також компенсація реактивної потужності, тобто $\cos \varphi = 1$. У цьому випадку вираз для (4.26) має бути обраний з умови компенсації реактивної потужності навантаження.

Запишемо комплекс повної потужності \tilde{S} через симетричні складові:

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

Реактивна потужність $Q = J_m \tilde{S} = 3U J_m I_{\varepsilon 1}^*$. Умова компенсації $Q = 0$ дає $J_m I_{\varepsilon 1}^* = 0$. Підставляючи вираз (4.20), маємо $J_m \left[I_1 + U(Y_0' + 3Y_0'') \right] = 0$. Звідки:

$$J_m (Y_0' + 3Y_0'') = \frac{1}{U} J_m I_1$$

Оскільки провідності СП реактивні, їх комплекси уявні, і маємо співвідношення:

$$\begin{aligned} Y_0' + 3Y_0'' &= -\frac{j}{U} J_m I_1; \\ Y_0'' &= -\frac{j}{3U} J_m I_1 - \frac{1}{3} Y_0' \end{aligned} \quad (4.27)$$

Співвідношення (4.27) - це умова компенсації реактивного навантаження.

Підставивши (4.27) у (4.26), запишемо останнє так:

$$\left. \begin{aligned} Y_{BC}'' &= \frac{j}{3U} J_m (2I_2 - I_1) - \frac{2j}{3U} J_m I_0 - \frac{1}{3} Y_0'; \\ Y_{CA}'' &= \frac{j}{3U} J_m (2a^2 I_2 - I_1) - \frac{2j}{3U} J_m a I_0 - \frac{1}{3} Y_0'; \\ Y_{AB}'' &= \frac{j}{3U} J_m (2a I_2 - I_1) - \frac{2j}{3U} J_m a^2 I_0 - \frac{1}{3} Y_0'; \end{aligned} \right\} \quad (4.28)$$

Підставляючи у (4.28) співвідношення, отримані з (4.11), матимемо:

$$\left. \begin{aligned} \frac{2j}{3U} J_m I_0 &= \frac{-Y_A' + Y_0'}{3}; \\ \frac{2j}{3U} J_m a I_0 &= \frac{-Y_B' + Y_0'}{3}; \\ \frac{2j}{3U} J_m a^2 I_0 &= \frac{-Y_C' + Y_0'}{3} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} Y''_{BC} &= \frac{j}{3U} J_m (2I_2 - I_1) + \frac{1}{3} Y'_A - \frac{2}{3} Y'_0; \\ Y''_{CA} &= \frac{j}{3U} J_m (2a^2 I_2 - I_1) + \frac{1}{3} Y'_B - \frac{2}{3} Y'_0; \\ Y''_{AB} &= \frac{j}{3U} J_m (2aI_2 - I_1) + \frac{1}{3} Y'_C - \frac{2}{3} Y'_0; \end{aligned} \right\} \quad (4.29)$$

Ці формули (4.29) повністю вирішують завдання визначення параметрів СП для компенсації струмів зворотної послідовності та реактивної потужності несиметричної трифазної мережі. Для цього необхідні діюче значення фазної напруги, симетричні складові струмів навантаження, а також параметри СП для компенсації нульової складової.

Якщо компенсація реактивної потужності не потрібна, параметри не залежать від струму прямої послідовності, і у виразах (4.29) в якості I_1 можна взяти будь-яке комплексне число.

При відсутності нульового проводу $I_0 = 0$, симетрувальний пристрій струмів нульової послідовності не потрібний, тобто можна вважати, що $Y'_A = Y'_B = Y'_C = Y'_0 = 0$. Вирази (4.29) для визначення параметрів СП значно спрощуються, набуваючи вигляду:

$$\left. \begin{aligned} Y''_{BC} &= \frac{j}{3U} J_m (2I_2 - I_1); \\ Y''_{CA} &= \frac{j}{3U} J_m (2a^2 I_2 - I_1); \\ Y''_{AB} &= \frac{j}{3U} J_m (2aI_2 - I_1); \end{aligned} \right\} \quad (4.30)$$

Виразимо провідності фаз СП С2 через лінійні струми споживача. Для цього у вираз (4.29) підставимо співвідношення (4.1.1) і після перетворень, враховуючи $I_0 = 0$, отримаємо, наприклад, для провідності Y''_{BC} .

$$Y''_{BC} = \frac{j}{3U} J_m (a^2 I_B + aI_C + I_0) + \frac{1}{3} Y'_A - \frac{2}{3} Y'_0$$

$$\text{при } \frac{j}{3U} J_m I_0 = \frac{-Y'_A + Y'_0}{6}$$

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

Аналогічні вирази можуть бути отримані для двох інших провідностей СП 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 $Y'_0 = \frac{1}{3}(Y'_A + Y'_B + Y'_C)$ 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 для ілюстрації застосування запропонованої методики.

1. Активне однофазне навантаження.

Нехай активний однофазний приймач з провідністю g увімкнений між фазами А і В, як показано на рис. 4.4. При такому підключенні лінійні струми навантаження рівні: $\underline{I}_A = \underline{I}_B = \underline{U}_{AB} g$; $\underline{I}_C = 0$. Знаходимо основні вектори струмів прямої \underline{I}_1 і зворотної \underline{I}_2 послідовностей.

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

$$\underline{I}_2 = \frac{1}{3}(\underline{I}_A + a^2 \underline{I}_B) = \frac{1}{3}(1 - a^2) \underline{U}_g$$

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

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

Підставивши (4.32) у (4.30), отримуємо провідності фаз СП:

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

Звідси випливає: $Y''_{AB} = 0$, $Y''_{BC} = -j \frac{g}{\sqrt{3}}$ (ємнісний), $Y''_{CA} = -j \frac{g}{\sqrt{3}}$ (індуктивний) характер. Отриманий індуктивно-ємнісний компенсатор зворотної послідовності — це відома схема Штеймеца (рис. 4.4).

2. Двофазне активне навантаження.

Розглянемо синтез параметрів СП для компенсації зворотної послідовності при двофазному активному приймачі без струмів нульової послідовності. Навантаження підключене до трифазної мережі (рис. 4.5).

Провідності фаз приймача позначимо як b_{AB} і b_{BC} . Визначимо параметри СП для компенсації несиметрії, спричиненої цими навантаженнями. Лінійні струми навантаження:

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

Підставляючи (4.34) у формули (4.1.1) для \underline{I}_1 та \underline{I}_2 , та перетворюючи, отримуємо співвідношення:

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

Реактивні провідності фаз СП пов'язані з провідностями навантаження рівняннями:

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

Провідність b_{BC} повинна бути ємнісного характеру, b_{AB} - індуктивного, а b_{CA} залежить від співвідношення провідностей навантаження. Якщо $b_{BC} > b_{AB}$, провідність b_{CA} ємнісного характеру, а якщо $b_{BC} < b_{AB}$ - індуктивного. У випадку рівних провідностей навантажень ($b_{BC} = b_{AB}$), $b_{CA} = 0$. Схеми СП для розглянутих випадків представлені на рис. 4.5.

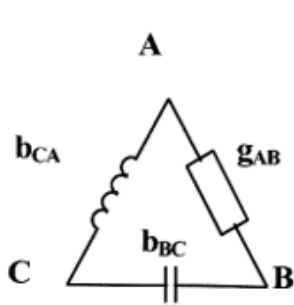


Рис. 4.4. Симетрування трипровідної трифазної мережі з однофазним активним навантаженням

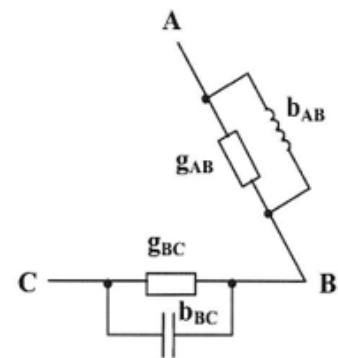
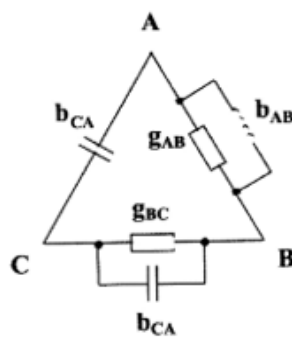


Рис. 4.5. Схеми симетрувального пристрою з двофазним активним навантаженням

3. Чотирипровідна мережа.

Як третій приклад, розглянемо синтез параметрів СП для компенсації струмів нульової та зворотної послідовностей у чотирипровідній трифазній мережі. Припустимо, навантажені дві лінійні та дві фазні напруги активним навантаженням. Лінійні струми через провідності приймачів:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}'_A + \underline{I}_{AB} = \underline{U}_A g_A + \underline{U}_{AB} g_{AB} = U \left[g_A + g_{AB} (1 - a^2) \right]; \\ \underline{I}_B &= \underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB} = (\underline{U}_B - \underline{U}_C) g_{BC} + (\underline{U}_B - \underline{U}_A) g_{AB} = U \left[(a^2 - a) g_{BC} + (a^2 - 1) g_{AB} \right]; \\ \underline{I}_C &= \underline{I}_C - \underline{I}_{AB} = \underline{U}_C g_C + (\underline{U}_C - \underline{U}_B) g_{BC} = U \left[a g_{BC} + (a - a^2) g_{BC} \right]. \end{aligned} \quad (4.36)$$

Підставивши (4.36) у вирази (4.1.1), отримаємо формули для симетричних складових.

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

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

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

Підставляючи ці вирази у формули (3.29), остаточно отримуємо:

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

З виразів (4.37) видно зв'язок провідностей елементів СП з провідностями навантаження. Характер елементів СП залежить від співвідношення провідностей навантаження:

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

Приклади синтезу схем наведені у таблиці 4.1 та на рис. 4.6. Це демонструє спрощення синтезу параметрів СП за розробленою методологією.

Таблиця 4.1. Приклади синтезу схем симетруючого пристрою

№ п/п	Співвідношення провідностей	Характеристика провідностей симетруючого пристрою			Рис.
		Індуктивний	0	Ємнісний	
1	$g_{BC}=g_{AB}=g_A=g_C$	Індуктивний	0	Ємнісний	4.6,а
2	$g_A>g_C=1,5g_{BC}<1,5g_{AB}$	Ємнісний	Індуктивний	Індуктивний	4.6,б
3	$g_A=g_C<1,5g_{BC}>1,5g_{AB}$	Ємнісний	0	Індуктивний	4.6,в
4	$g_{AB}=g_{BC}>g_C>g_A$	Індуктивний	Ємнісний	Ємнісний	4.6,г
5	$g_{AB}=g_{BC}>g_C>g_A$	Індуктивний	Ємнісний	Ємнісний	4.6,д
6	$1,5g_{AB}>g_A=g_C<1,5g_{BC}$	Ємнісний	Індуктивний	Ємнісний	4.6,ж

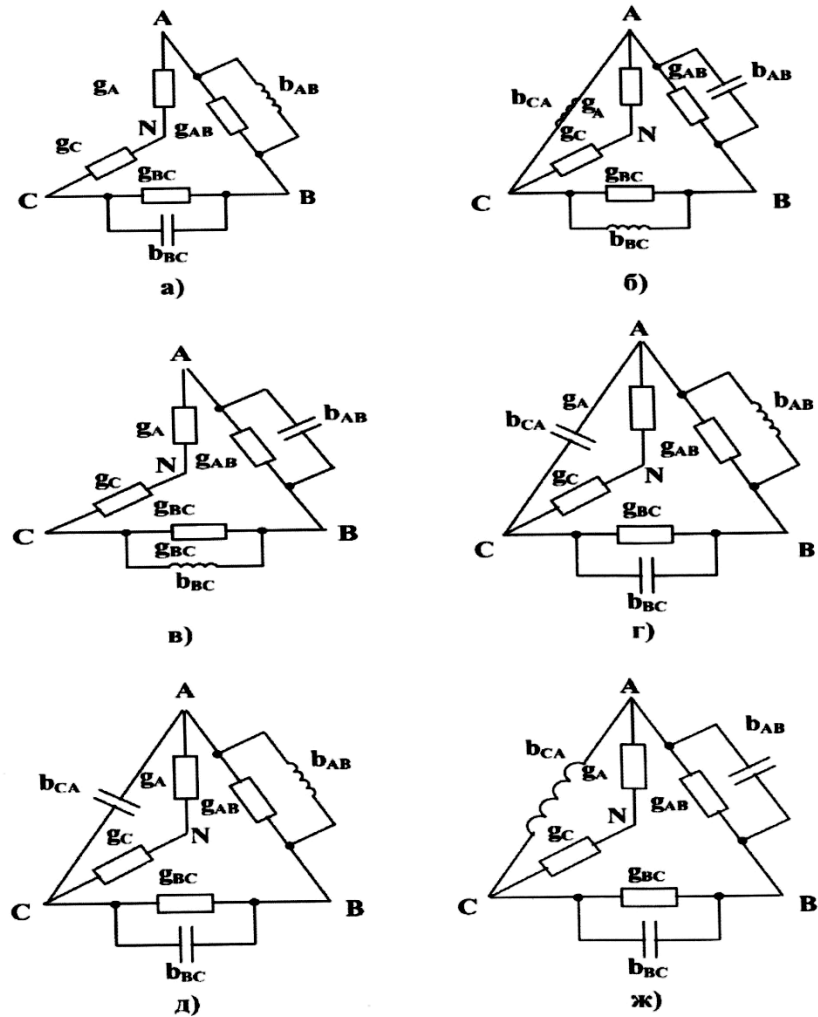


Рис.4.6. Симетрування трифазних мереж при різних співвідношеннях провідностей навантажень

4.3. Методика симетрування трифазних мереж за допомогою фазних потужностей

У попередніх частинах роботи були представлені методи для симетрування трифазних електромереж, які використовували або інформаційні властивості симетричних складових струмів навантаження, або ж їхні діючі значення.

У цьому розділі досліджується можливість балансування систем електропостачання, використовуючи фазні потужності як основні інформаційні параметри.

Компенсація струмів нульової послідовності. Використовуючи вираз (4.11), виведемо формули для комплексних провідностей СП, які компенсують струми нульової послідовності, через комплекси повної потужності фаз навантаження.

Для цього потрібно помножити та розділити на U перші члени правої частини кожного з рівнянь (4.11) і врахувати, що $\text{Im } \dot{I} = -\text{Im } I^*$. Це дає вираз:

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

Переходячи у цих формулах до комплексів повної потужності фаз приймача за допомогою рівняння, отримаємо вираз:

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

Далі, замінивши повну потужність на активну та реактивну, отримаємо такі співвідношення:

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

Рівняння (4.40) дозволяють визначити необхідні параметри симетрувального пристрою, спираючись на активну і реактивну потужності фаз приймача. Вони також дозволяють визначити реактивну потужність фаз самого СП.

Враховуючи, що провідності фаз СП мають суто реактивний характер (4.11), запишемо вираз (4.40) у вигляді (4.41):

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

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

$$Q'_0 = \frac{U^2}{3} (b_A + b_B + b_C) = \frac{1}{3} (Q'_A + Q'_B + Q'_C) - \text{це реактивна потужність вихідної}$$

частини СП з номінальними характеристиками, які змінюються під час процесу симетрування.

Компенсація струмів зворотної послідовності. Шляхом аналогічних перетворень рівнянь (4.31) можливо виразити через потужності фаз навантаження параметри СП, необхідні для компенсації складової зворотної послідовності струмів.

Опустивши проміжні кроки, кінцеві вирази матимуть вигляд:

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

Ці вирази (4.42) також можна записати так:

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

де Q_0'' - це реактивна потужність вихідної частини симетрувального пристрою з номінальними характеристиками, які змінюються під час процесу симетрування.

Випадок відсутності нульової послідовності.

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

Помноживши (4.44) на фазну напругу U

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

Припускаючи, що система фазних напруг джерела є симетричною, можна записати:

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

Звідси отримуємо:

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

Окремим прирівнюванням до нуля дійсної та уявної частин цих виразів ми отримуємо:

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

Шляхом перетворення виразу (4.45) отримаємо наступне для активних та 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 при умові $Q_0' = 0$, отримаємо спрощену умову компенсації струмів зворотної послідовності, виражену через реактивні потужності фаз (4.47).

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

У разі відсутності струму зворотної послідовності $I_2 = 0$ після необхідних перетворень можна записати такі співвідношення для активних і реактивних навантажень:

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

Врахувавши ці співвідношення у формулах (4.41) та (4.42), ми одержимо параметри СП, які забезпечують компенсацію струмів нульової послідовності (4.49).

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

Розглянута методика симетрування трифазних чотирипровідних мереж дозволяє визначити параметри СП за активною і реактивною потужністю навантаження, забезпечуючи компенсацію струмів нульової та зворотної послідовностей.

4.4. Симетрування та компенсація реактивної потужності в трифазних мережах

Якщо параметри навантаження відомі, зручно виразити параметри СП саме через них.

У такому випадку струми зворотної та нульової послідовностей навантаження визначаються аналогічними формулами, вираженими через

параметри навантаження. Підставляючи ці значення струмів у співвідношення (4.11) та (4.26), ми знайдемо:

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

де Δb_A^H та Δb_{BC}^H — це несиметричні частини реактивних провідностей навантаження:

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

Циклічною переставкою індексів A, B, C можна отримати інші параметри.

Для трипровідної мережі маємо $g_A^H = g_B^H = g_C^H = b_A^H = b_C^H = 0$, і тоді

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

Також слід відзначити, що реактивна потужність, яку вносять параметри СП, визначені вище, дорівнює нулю:

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

Отже, СП з обчисленими параметрами не змінює коефіцієнт потужності мережі. Для отримання бажаного коефіцієнта потужності слід застосувати параметри його симетричної частини (провідності нульової послідовності), які визначаються співвідношеннями (4.4) та (4.17). Додавання симетричної частини не порушує умови симетрування, але забезпечує бажаний коефіцієнт потужності. Внесена симетричною частиною реактивна потужність становить:

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

Позначивши як вихідний коефіцієнт потужності $\cos \varphi$, а $\cos \theta$ — потрібний, дістанемо, при активній потужності навантаження P :

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

Формула (4.53) дозволяє отримувати будь-які кутові зсуви в межах $-\frac{\pi}{3} < \theta < \frac{\pi}{2}$, включно з випадком $\theta = 0$, для якого виконується:

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

де Q — реактивна потужність навантаження.

Звідси випливає вираз для визначення симетричної частини СП, що забезпечує $\cos\varphi = 1$. Це співвідношення дає змогу знайти відповідні параметри для трифазної трипровідної лінії з урахуванням необхідного коефіцієнта потужності.

Обравши значення b'_0 і b''_0 , які відповідають умовам (4.52) чи (4.53), одержуємо остаточні формули для 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 провідностей СП.

З формул (4.52) та (4.53) видно, що значення b'_0 і b''_0 не фіксуються однозначно - один із параметрів залишається вільним. Цей ступінь свободи можна використати для задоволення додаткового критерію. Наприклад, можна обрати такі параметри, які задовольняють (4.52), але мінімізують задану цільову функцію.

Цільовою функцією може бути сумарна модульна потужність реактивних елементів, максимальна провідність окремого елемента СП, тривалість перехідних процесів тощо.

Розглянемо один із можливих варіантів: якщо прийняти рівним $b'_0 = -\Delta b_A (-\Delta b_B, -\Delta b_C)$ або $b''_0 = -\Delta b_{BC} (-\Delta b_{CA}, -\Delta b_{AB})$, то схема з шістьма елементами (рис.4.7) спрощується до п'ятиелементної (рис.4.8). Аналогічне твердження справедливе і для чотирипровідної мережі. У трипровідній системі $\Delta b_A = \Delta b_B = \Delta b_C = 0$, тому для симетрування достатньо трьох параметрів (за умови, що $b'_0 = 0$, а b''_0 визначається з (4.52) і (4.53)). Якщо розглядати лише

задачу симетрування без урахування коефіцієнта потужності, то для чотирипровідної лінії при $b'_0 = \Delta b_A, b''_0 = \Delta b_{BC}$ можлива двоелементна схема.

Отже, наведені методи дозволяють, знаючи провідності навантаження, визначити параметри пристроїв симетрування-компенсації, які забезпечують зменшення нульової та зворотної послідовностей струмів разом із компенсуванням реактивної потужності.

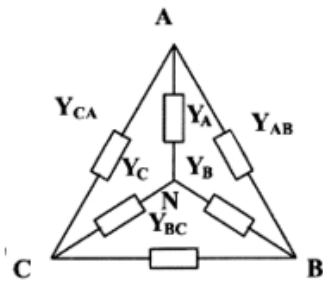


Рис.4.7. Шестиеlementна схема симетрування

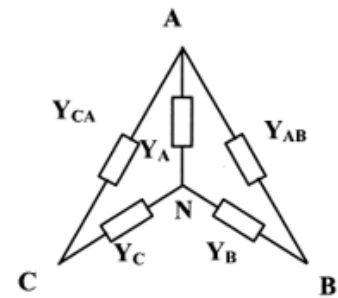
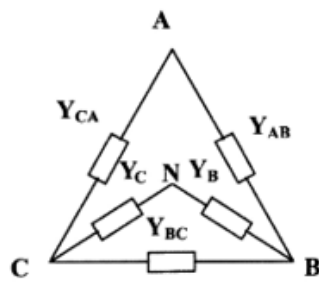


Рис.4.8. П'ятиelementна схема симетрування

4.5. Похибка та стійкість процесу симетрування трифазних електричних мереж

У попередніх розділах, визначаючи параметри симетрувального пристрою (СП), припускалося, що напруги в мережі є симетричними, хоча насправді це не завжди так. Таке спрощення може стати причиною похибок у знаходженні характеристик СП і, відповідно, появи залишкової несиметрії струмів. Якщо ці неточності достатньо значні, то під час багатотактної роботи СП циклічного типу може виникати нестійкість процесу симетрування.

Розглянемо трифазну чотирипровідну мережу, у якій фазні струми містять компоненти прямої, оберненої та нульової послідовностей згідно з (4.1.1). У виразі (4.56) фазні струми подані через напруги та провідності навантаження. У цьому ж рівнянні фазні напруги представимо через складові прямої, оберненої та нульової послідовностей, після чого підставимо їх у (4.1.1). У результаті отримаємо співвідношення (4.57).

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

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

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

Позначення у формулах (4.57)-(4.58):

Y_A^H, Y_B^H, Y_C^H - комплексні фазні провідності навантаження;

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

За нормальних умов лінійні напруги є симетричними, тому у фазній системі можливе існування лише складових прямої та нульової послідовностей. Струм нульової послідовності при цьому описується виразом (4.59). Якщо подати через фазні провідності, то отримаємо (4.60), де Y_N – провідність нейтрального проводу. Тоді згідно з (4.61) одержуємо струм нульової послідовності.

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

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

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

Щоб звести цей струм до нуля, достатньо під'єднати СП паралельно навантаженню таким чином, щоб його провідність дорівнювала $Y'_2 = Y'_{2H}$. Тоді сумарну провідність навантаження зі СП можна розглядати як $Y'_2 - Y'_{2H} = 0$, що забезпечує одночасно і компенсацію струму нульової послідовності $\underline{I}_0 = 0$, і усунення зсуву нейтралі.

Таким чином, за наявності даних про фазні провідності навантаження або хоча б величини Y'_{2H} (4.58), завжди можливо визначити реактивні складові провідностей СП так, щоб виконувались умови $\underline{I} = 0$ та $\underline{U} = 0$ та

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

Значення Y'_{2H} можна обчислити також із формули (4.59), якщо відома сумарна фазна провідність. Вимірявши відповідні величини $\underline{I}_0, \underline{U}_0$, знаходимо

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

У деяких випадках обчислення Y'_{2H} може бути ускладнене — наприклад, якщо в мережі одночасно присутні навантаження, під'єднані як за схемою «зірка з нейтраллю», так і «трикутник» чи «зірка без нейтрального проводу». З рівняння (4.57) видно, що визначити лише зі значень струмів і напруг без додаткової інформації про міжфазні провідності неможливо. Проте формула (4.61) дозволяє отримати наближене значення за виміряним струмом:

$$\tilde{Y}'_{2H} = \frac{\underline{I}_0}{\underline{U}_1} = Y'_{2H} - \frac{Y'_{0H}}{Y'_{0H} + 3Y'_N} \cdot Y'_{2H} \quad (4.63)$$

Тоді для СП маємо співвідношення (4.64), з якого стандартними методами визначаються фазні провідності пристрою. Оскільки обчислюється з певною

похибкою, у системі залишається несиметрія струмів, яку можна оцінити за виразами (4.63)–(4.64). Для величини ΔI_0 отримуємо (4.65), а для залишкової несиметрії напруг — (4.66).

$$Y_2' = -\tilde{Y}'_{2н} = -\frac{I_0}{U_1} \quad (4.64)$$

$$\Delta I_0 = \frac{U_1 Y_{2н}' Y_2'}{Y_0' + 3Y_N'} \left(1 - \frac{Y_{0н}'}{Y_0' + 3Y_N'} \right) = \frac{Y_{0н}'}{Y_{0н}' + 3Y_N'} \cdot I_0. \quad (4.65)$$

$$\Delta U_0 = -\frac{U_1 (Y_{2н}' + Y_2')}{Y_{0н}' + 3Y_N'} \cdot U_0 \quad (4.66)$$

Отже, співвідношення (4.65) і (4.66) описують похибку симетрування. Відносна похибка:

$$\delta_C + \frac{\Delta I_0}{I_0} = \frac{\Delta U_0}{U_0} = \frac{Y_{0н}'}{Y_{0н}' + 3Y_N'} \quad (4.67)$$

Якщо провідність нейтралі значно перевищує провідність навантаження, тобто $Y_N \gg Y_{0н}'$, то неточність симетрування буде незначною (4.68). У такому випадку достатньо виконати лише один цикл симетрування.

$$|\delta_C| \approx \frac{Y_{0н}'}{3Y_N} \ll 1 \quad (4.68)$$

Зменшити похибку можна повторним проведенням симетрування. Після кожного такту залишкова несиметрія зменшується згідно з (4.69). Після N циклів наближена несиметрія дорівнюватиме (4.70).

$$Y_2'^{(n)} = \frac{I_0^{(n-1)}}{U_1} \quad (4.69)$$

$$\delta_C^{(N)} = \frac{I_0^{(N)}}{I_0} = \frac{U_0^{(N)}}{U_0} = \left(\frac{Y_{0н}'}{Y_{0н}' + 3Y_N'} \right)^N \quad (4.70)$$

Із цієї формули впливає умова стійкості симетрування — величина g повинна бути меншою за одиницю (4.71). Чим менше значення g , тим швидше система стає симетричною.

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

Формули (4.70)–(4.71) дозволяють визначити мінімальну кількість ітерацій, необхідних для досягнення заданого рівня точності. Після компенсації струму нульової послідовності та усунення зміщення нейтралі проводиться симетрування струму зворотної послідовності:

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

Отже, у цьому розділі подано способи обчислення похибок симетрування трифазних мереж. Отримані залежності дають змогу встановити потрібне число циклів і визначити умови стійкої роботи симетрувального процесу до досягнення необхідної точності.

4.6. Типові схеми симетрувальних систем у мережах електропостачання

Схеми симетрувальних пристроїв, що застосовуються в електропостачальних системах, розробляють так, щоб забезпечити допустимий рівень несиметрії струмів і напруг, досягти високого коефіцієнта потужності та мінімізувати встановлену потужність елементів пристрою.

Робота симетрувальних систем полягає у компенсації еквівалентної складової зворотної послідовності, яка виникає через несиметричне навантаження. Внаслідок цього усувається і відповідна напруга зворотної послідовності. Залежно від місця монтування таких пристроїв виділяють індивідуальні, групові, централізовані та комбіновані варіанти. Індивідуальні системи встановлюють безпосередньо біля обладнання з несиметричним режимом. Групове симетрування передбачає встановлення кількох пристроїв у різних точках мережі, а кожен з них відповідає за певну ділянку. При централізованому підході застосовується один пристрій на розподільній мережі. Комбінований метод поєднує елементи кількох попередніх способів.

Кожен метод має свої особливості: індивідуальний дозволяє позбутися несиметрії безпосередньо у споживача, але використання потужності елементів є недостатньо ефективним. Централізований спосіб вимагає меншої

встановленої потужності, проте не усуває струмову несиметрію всередині мережі. Груповий варіант поєднує як переваги, так і недоліки двох попередніх підходів. Вибір виконують згідно з типом навантажень та параметрами мережі.

Залежно від специфіки режимів роботи навантаження симетрувальні пристрої можуть бути регульованими або нерегульованими. Існує різноманіття схем із електричними та електромагнітними зв'язками між елементами, кожна з яких має свої плюси й обмеження.

До трансформаторних симетрувальних варіантів належить велика кількість конструкцій. Вони можуть містити кілька трансформаторів або один спеціальний апарат, під'єднаний у певний спосіб між мережею та несиметричним навантаженням. Це дозволяє забезпечити потрібну напругу та часткове вирівнювання фазних струмів. Як приклад можна навести живлення двофазного навантаження від трансформатора Скотта (рис.4.9).

Співвідношення витків трансформаторів підбирають так, щоб вторинні напруги збігалися. Така схема часто застосовується для живлення індукційних печей. Подібні пристрої не регулюються та встановлюються індивідуально; їхні можливості вирівнювання значною мірою залежать від типу навантаження.

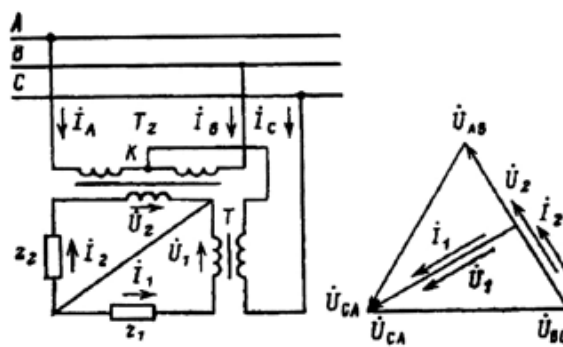


Рис.4.9. Схема і векторна діаграма струмів і напруг при живленні двофазного навантаження від трансформатора Скотта

Пристрої з електромагнітними зв'язками поділяються на автотрансформаторні та трансформаторні схеми. У першій групі потужність пристрою зазвичай дорівнює навантаженню. Регулювання здійснюється, наприклад, перемиканням відпайок. На рис. 4.10 показано схему, що має один

регульований елемент ($\cos \varphi < 0,7$). Інший варіант — двоелементна схема з окремим керуванням індуктивності та ємності (рис.4.11), яка забезпечує кращі характеристики та призначена для ширшого кола навантажень ($\cos \varphi = 1$).

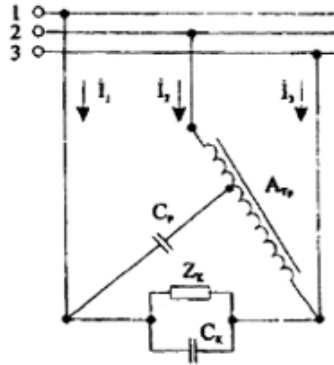


Рис.4.10. Автотрансформаторна схема з регульованим елементом C_r

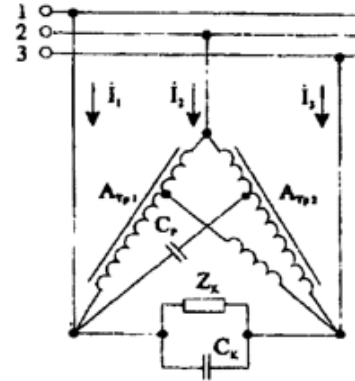


Рис.4.11. Автотрансформаторна схема з регулюючими елементами

Ємнісно-індуктивні симетрувальні системи включають паралельно до несиметричного споживача. Найбільш відомою є схема Штейнметца (рис.4.12). Вона найефективніша, коли коефіцієнт потужності навантаження дорівнює 1. Для активно-індуктивних навантажень паралельно під'єднують додатковий конденсатор, а параметри реактора й основної батареї конденсаторів обирають згідно з відповідними умовами (4.73). За відсутності C_2 пристрій також може вирівнювати навантаження, однак коефіцієнт потужності при цьому зменшується. Потужність елементів у цьому випадку визначають за формулою (4.74).

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

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

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

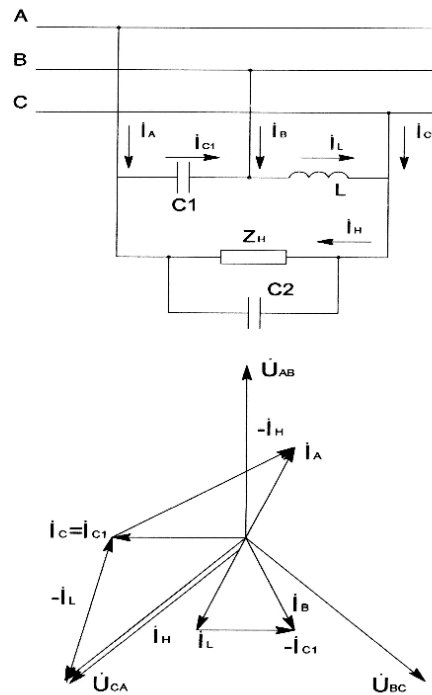


Рис.4.12. Схема Штейнметца і векторна діаграма для цієї схеми

Фіксовані параметри елементів забезпечують симетрування лише при конкретній потужності навантаження. Якщо режим змінюється так, що рівень несиметрії виходить за припустиму межу з імовірністю понад 5%, доводиться застосовувати регульовані системи. Регулювання може бути плавним або ступінчастим (дискретним).

У дискретних системах батареї конденсаторів містять кілька груп: частина з них увімкнена постійно, інші можуть підключатися за допомогою контакторів або тиристорів. Плавне регулювання ємності досягається шляхом під'єднання паралельно конденсаторам керованих реакторів, але це збільшує втрати та встановлену потужність, а також генерує гармоніки. Індуктивний елемент може бути складений із кількох секцій або мати відгалуження. Плавне керування індуктивністю реалізують зміною зазорів магнітопроводу, керованим підмагнічуванням або ковзним контактом. На рисунку 4.13 показано два варіанти керованих систем на базі схеми Штейнметца. Їхній недолік — перевищення встановленої потужності пристрою над потужністю навантаження та обмежений діапазон регулювання.

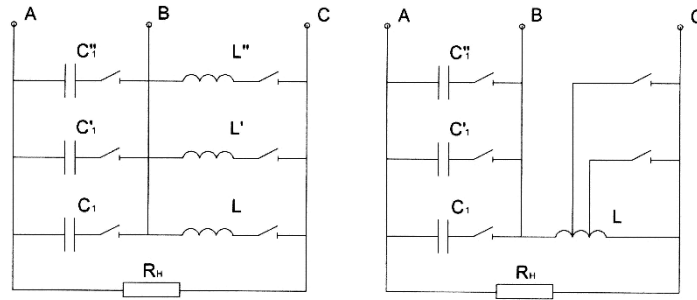


Рис.4.13. Варіанти керованих систем на основі схеми Штейнметца

Для симетрування лінійних напруг при різних типах несиметричних навантажень часто застосовують батареї конденсаторів з різними потужностями фаз (рис. 4.14). Такі пристрої також виконують функцію компенсації реактивної потужності. Повне симетрування, коли обернена послідовність дорівнює нулю, рідко є економічно виправданим, тому зазвичай реалізують часткове вирівнювання, що забезпечує зменшення несиметрії до прийнятних значень.

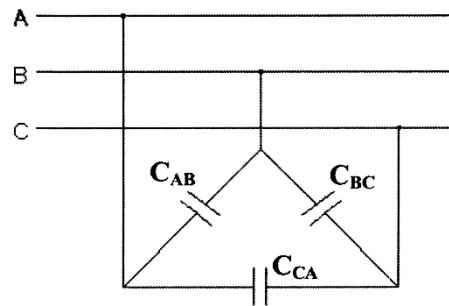


Рис.4.14. Схема симетрування з використанням БК

Умови для часткового симетрування можуть бути виражені через залишковий струм зворотної послідовності та допустиме значення напруги цієї складової. Повне симетрування можливе, коли струм зворотної послідовності пристрою компенсує відповідний струм навантаження. Сумарну потужність конденсаторних установок визначають згідно з вимогами компенсації реактивної потужності. Розподіл по фазах здійснюють таким чином, щоб скомпенсувати обернену складову струму навантаження. У загальному випадку

можна застосувати два ємнісні елементи, під'єднані до лінійних напруг; ефективність залежить від характеру навантаження.

Існують як графічні, так і аналітичні методи визначення параметрів конденсаторів. Аналітичний алгоритм базується на визначенні області, у якій знаходиться аргумент еквівалентного струму зворотної послідовності (рис. 4.15), після чого підбирають схему та значення потужностей БК.

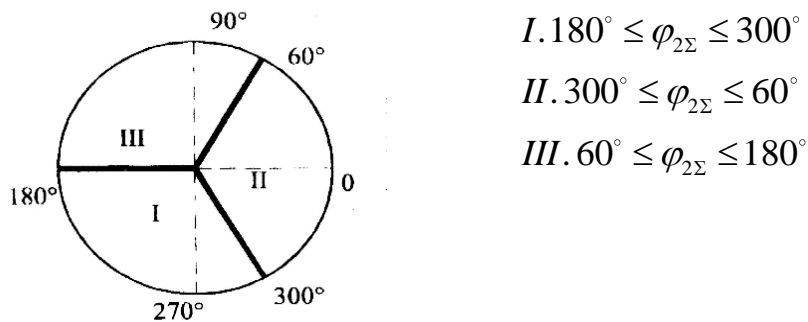


Рис.4.15. Діаграма розподілу аргументу струму зворотної послідовності

У системах електропостачання підприємств, що живлять електротехнологічні агрегати (плавильні печі, ЕШП, індукційні установки тощо), навантаження постійно змінюється, що впливає на величину та фазу зворотної послідовності. Таке обладнання є значним споживачем реактивної потужності. Для таких умов в ІЕД НАН України створені багатофункціональні симетро-компенсуючі пристрої (рис. 4.16), що поєднують функції симетрування та компенсації.

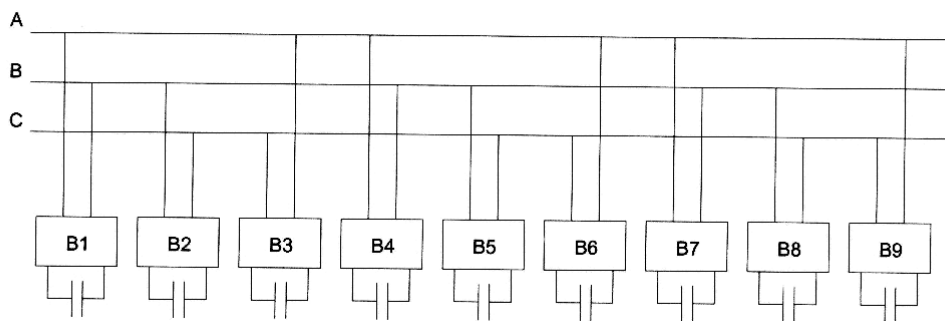


Рис.4.16. Схема симетро-компенсуючих пристроїв

Оцінка рівня несиметрії здійснюється за аргументом пульсуючої потужності трифазної системи, що залежить від симетричних складових напруг і струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей.

Поєднання функцій симетрування та компенсації дає можливість значно знизити необхідну потужність регульованих пристроїв. До нових технічних рішень належать системи на основі трансформаторів з обертовим магнітним полем, які включають трифазний статор і нерухомий ротор з однофазною обмоткою та реактивними елементами. Такі пристрої формують керований струм зворотної послідовності, а комбінація двох апаратів дає можливість регулювати як модуль, так і фазу потрібної складової. На рис.4.17 подано приклади схем L-L та L-C. Закони керування подано у формулах (4.75.1) й (4.75.2).

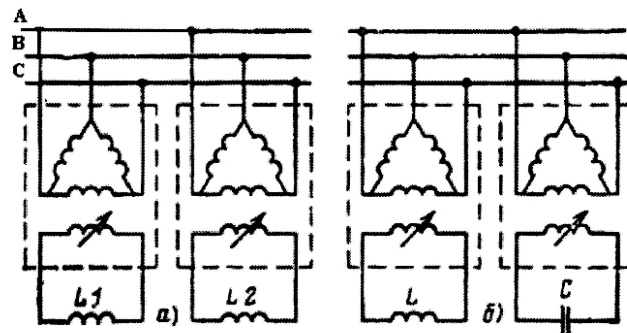


Рис.4.17. Схеми СП типу L-L (а) і L-C (б) з обертовим магнітним полем

$$\alpha_L = 0,5 \left(\pi + \varphi_{2H} - \arcsin \left[\sqrt{3} U_{Л} I_{2H} (Q_L + Q_C)^{-1} \right] \right) \quad (4.75.1)$$

$$\alpha_C = 0,5 \left(\pi + \varphi_{2H} + \arcsin \left[\sqrt{3} U_{Л} I_{2H} (Q_L + Q_C)^{-1} \right] \right) \quad (4.75.2)$$

де 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} .

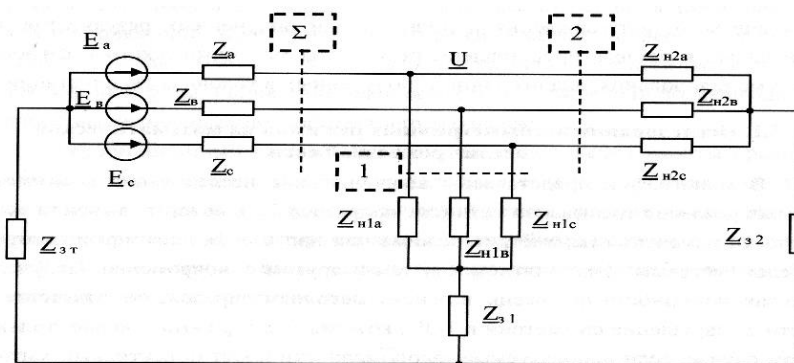
Інший підхід до симетрування полягає у введенні додаткової системи ЕРС, що вмикається послідовно в лінійні проводи. Внаслідок цього складові зворотної послідовності основного джерела та додаткових ЕРС компенсуються, і напруга на споживачі стає симетричною. Джерелами додаткових ЕРС можуть виступати синхронні генератори, трансформатори з послідовним регулюванням або апарати з фазним регулюванням коефіцієнта трансформації.

Критерієм вибору параметрів симетрувального пристрою є мінімізація встановленої потужності. Цей підхід застосовують як для повного, так і для часткового вирівнювання. Потужність таких пристроїв визначають за реактивними складовими елементів або їхніми провідностями. Остаточне рішення приймають порівнянням варіантів з урахуванням асортименту доступного обладнання, комутаційної апаратури, засобів захисту та експлуатаційної надійності.

5. ВПЛИВ УЧАСНИКІВ ПРОЦЕСУ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ПОРУШЕННЯ СИМЕТРІЇ В МЕРЕЖІ

Аналіз наукових робіт, присвячених дослідженню несиметричних режимів, дозволяє зробити однозначний висновок: споживачі істотно впливають на появу несиметрії на збірних шинах за нульовою послідовністю, і цей факт не потребує додаткових доказів. На відміну від нульової, у формуванні зворотної послідовності може брати участь також і мережевий оператор. Саме ця обставина ускладнює визначення вкладу суб'єктів розподільчої мережі в порушення симетрії по зворотній послідовності, якщо використовувати лише значення фазних провідностей навантаження. Через це формули для оцінки ступеня участі сторін у створенні зворотної послідовності є складними, суттєво залежать від причин виникнення несиметрії та не можуть вважатися наочними.

Аналітичні висновки перевіряли за допомогою математичної моделі електричної мережі. Оцінювання внеску суб'єктів у порушення симетрії по зворотній послідовності на межі розподілу балансової належності (МРБН) здійснювали через коефіцієнти участі навантаження $K_{2уч.н}$ та системи $K_{2уч.сист}$, основою для яких виступають коефіцієнти K'_{2U}, K''_{2U} . Метод можна вважати коректним лише за умови, що його положення мають об'єктивний характер.



5.1. Еквівалентна схема

На рис. 5.1 подано еквівалентну схему заміщення трифазної мережі з двома групами споживачів. Джерела напруги $\underline{E}_a, \underline{E}_b, \underline{E}_c$ відображають систему живлення разом із фазними опорами ліній – $\underline{Z}_a, \underline{Z}_b, \underline{Z}_c$. Елементи представляють виділене навантаження $\underline{Z}_{n1a}, \underline{Z}_{n1b}, \underline{Z}_{n1c}$, параметри характеризують залишкові навантаження шин $\underline{Z}_{n2a}, \underline{Z}_{n2b}, \underline{Z}_{n2c}$, а $\underline{Z}_{z1}, \underline{Z}_{z2}, \underline{Z}_{z3}$ описують опори контурів заземлення трансформатора та двох груп споживачів.

Несиметрія в системі може бути створена шляхом зміни амплітуд або фаз живильної напруги. У споживача несиметрія виникає через нерівність фазних опорів. Аналогічно можна змоделювати вплив інших споживачів мережі.

Для моделювання застосовано приклад підключення навантаження через трансформатор 10/0,4 кВ, потужністю 1 МВА, та кабель завдовжки 1 км. Дослідження стосувалися точки загального приєднання (ТЗП) на шинах низької напруги цієї трансформаторної підстанції.

5.1. Вплив фазового зсуву на визначення участі учасників процесу розподілу електричної енергії

Кут фазового зсуву δ_2 між зворотною складовою напруги \underline{U}_2'' , що створюється несиметричним навантаженням, і зворотною складовою системи \underline{E}_2 залежить від багатьох факторів, які складно передбачити наперед: причин виникнення порушення симетрії, розташування джерел несиметрії та параметрів мережі.

Оскільки δ_2 має випадковий характер, однакові чинники можуть спричинити різний рівень несиметрії на МРБН, навіть коли інтенсивність несиметрії з боку системи та навантаження залишається незмінною. Це відбувається тому, що напруга зворотної послідовності на МРБН дорівнює векторній сумі напруг, створених системою і споживачем :

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

Випадковий фазовий зсув може спричинити як збільшення загальної несиметрії, так і часткову компенсацію впливу системи та навантаження.

$$K_{2,уч\Sigma} = \frac{K_{2U}''}{K_{2U}' + K_{2U}''}; \quad K_{2,учC} = \frac{K_{2U}'}{K_{2U}' + K_{2U}''}$$

Принцип розподілу участі ґрунтується на вимозі, щоб кожен суб'єкт ніс відповідальність, пропорційну власному внеску, незалежно від значення δ_2 .

Результати дослідів. У моделі реалізовано серію експериментів, де чинники несиметрії мали приблизно однаковий вплив на показник K_{2U} у точці вимірювання. Несиметрія системи задавалася шляхом зменшення однієї з фазних напруг до $U_\phi = 0,8 \cdot U_{\phi ном}$, а несиметрія навантаження — зменшенням опору фази А до $Z_{нА} = 3 \cdot Z_n$.

Розраховано коефіцієнти зворотної послідовності напруги $K_{2н} = y_2 / y_1$, створювані системою K_{2U}' та навантаженням K_{2U}'' , за відповідними формулами:

$$K_{2U}' = \frac{U_2'}{U_1}; \quad K_{2U}'' = \frac{U_2''}{U_1}$$

У досліді 1.1 (таблиця 5.1) було порушено симетрію лише системою: фазу А знижено до $U_A = 0,8 \cdot U_{\phi ном}$, навантаження симетричне. Розраховані коефіцієнти несиметрії та участі системи і навантаження у створенні зворотної послідовності відповідають очікуваній картині: коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності на МРБН $K_{2U} = 0,071$; коефіцієнт несиметрії навантаження $K_{2н} = 0$; коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності, що створюється системою на МРБН $K_{2U}' = K_{2U} = 0,071$; коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності, створюваний навантаженням на МРБН $K_{2U}'' = K_{2н} = 0$; коефіцієнт участі системи у створенні несиметрії на МРБН $K_{уч сист} = 1$; коефіцієнт участі навантаження у створенні несиметрії на МРБН $K_{уч н} = 0$.

Таблиця 5.1. Участь учасників процесу розподілу ЕЕ в порушенні симетрії при розташуванні факторів несиметрії в фазі А

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

У досліді 1.2 несиметрію створювало лише навантаження, а система залишалася симетричною. Отримані показники демонструють аналогічну відповідність теоретичним очікуванням:

$$K_{2U} = 0,079; K_{2н} = 0,438; K'_{2U} = 0; K''_{2U} = K_{2U} = 0,079; K_{уч\ сист} = 0; K_{уч\ н} = 1$$

У досліді 1.3 фактори несиметрії присутні з обох боків МРБН. Кожне джерело впливає аналогічно тому, як і при окремому навантаженні, а участь визначається пропорційно відповідним коефіцієнтам:

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

Досліди 1.1 -1.3 демонструють відповідність одержаних результатів критеріям порушень симетрії при різному розміщенні джерел несиметрії.

Розглянемо вплив фазового зсуву між \underline{U}_2'' і \underline{E}_2 на визначення участі учасників процесу розподілу. Для цього змінимо аргумент вектору \underline{E}_2 , зберігши без змін аргумент вектору \underline{U}_2'' . Введемо несиметрію по фазах В і С, таку, як у дослідях 1.1-1.3 використовувалася у фазі А. Несиметрія по фазі В забезпечується умовою $U_B = 0,8 \cdot U_{ф\ ном}$ (таблиця 5.2), по фазі С – $U_C = 0,8 \cdot U_{ф\ ном}$ (таблиця 5.3).

Таблиця 5.2. Участь учасників розподілу в порушенні симетрії при розташуванні фактору несиметрії системи в фазі В, фактору несиметрії навантаження в фазі А

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

Таблиця 5.3. Участь учасників розподілу в порушенні симетрії при розташуванні фактору несиметрії системи в фазі С, фактору несиметрії навантаження в фазі А

Номер досліджу	Фактори несиметрії	K_{2U}	$K_{2н}$	K'_{2U}	K''_{2U}	$K_{уч сист}$	$K_{уч н}$
3.1	$U_C = 0,8 \cdot U_{ф ном};$ $Z_{нА} = Z_n$	0,071	0	0,071	0	1	0
3.2	$U_C = U_{ф ном};$ $Z_{нА} = 0,3 \cdot Z_n$	0,079	0,438	0	0,079	0	1
3.3	$U_C = 0,8 \cdot U_{ф ном};$ $Z_{нА} = 0,3 \cdot Z_n$	0,088	0,438	0,071	0,079	0,474	0,526

Порівняння випадків, коли порушення симетрії в системі вводилося у фазах А, В і С, показало різні значення K_{2U} на МРБН (0,143; 0,075; 0,088 відповідно). Це пояснюється різним ступенем компенсації між впливом системи та навантаження відповідно до значення δ_2 .

Головний висновок: коефіцієнти зворотної послідовності K'_{2U} і K''_{2U} , а також коефіцієнти участі системи $K_{уч сист}$ та навантаження $K_{уч н}$, не залежать від фазового зсуву δ_2 . Отже, їхнє значення визначається лише реальним внеском сторін у появу несиметрії.

5.2. Вплив похибки у визначенні опору зв'язку з системою

Для оцінки участі учасників розподілу ЕЕ у створенні несиметрії на шинах необхідно враховувати опір зв'язку (Z_C) між МРБН та ЕРС системи. Оскільки це розрахунковий параметр, певна неточність його визначення неминуча.

Проведені моделювання дозволили оцінити вплив похибки ΔZ_C на такі показники:

- коефіцієнт несиметрії напруги K_{2U} на МРБН;
- коефіцієнти несиметрії напруги, створювані системою та навантаженням на МРБН K_{2U}' , K_{2U}'' ;
- коефіцієнти участі системи та навантаження у створенні несиметрії на МРБН $K_{2\text{уч сист}}$ і $K_{2\text{уч н}}$.

Щоб порівняти результати між дослідями, забезпечено сталість суми коефіцієнтів K_{2U}'' і K_{2U}' ($K_{2U}'' + K_{2U}' = 0,3$). Для створення несиметрії в системі змінювали амплітуду фазної напруги U_A , а у споживача — модуль опору фази А— $Z_{нА}$. Врегулювання чинників несиметрії в моделі проводиться через коефіцієнти f та k :

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

Похибку введено через коефіцієнт d - $\Delta \underline{Z}_C = d \cdot \Delta \underline{Z}_C$. Діапазон похибки - $\pm 50\%$.

Як показано у таблиці 5.4 та на рис.5.2, коефіцієнти участі суттєво залежать від точності задання ΔZ_C^* . Похибку коефіцієнта участі системи зведено до суми коефіцієнтів за формулою (5.2), аналогічно — для складових за формулою (5.3). Розрахунки свідчать, що при зміні похибки від -50% до $+50\%$ значення $\Delta K_{2\text{уч сист}}$ змінюється в діапазоні від $-23,2\%$ до $+30,7\%$ (рис. 5.3).

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

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

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

$K_{2\text{уч сист}}(0)$	Параметри	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	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	0,3	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	0,02
	$\Delta K_{2\text{уч сист}}$	0,936	0,948	0,961	0,974	0,987	1,0	0,987	0,974	0,962	0,95	0,938	0,938
	$\Delta K_{2\text{уч}\Sigma}$	0,064	0,052	0,039	0,026	0,013	0,0	0,013	0,026	0,038	0,05	0,062	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	0,289
	K'_{2U}	0,201	0,207	0,212	0,216	0,221	0,225	0,229	0,233	0,236	0,24	0,243	0,243
	K''_{2U}	0,094	0,09	0,086	0,082	0,079	0,075	0,071	0,068	0,064	0,06	0,057	0,057
	$\Delta K_{2\text{уч сист}}$	0,682	0,696	0,71	0,724	0,737	0,75	0,762	0,775	0,787	0,799	0,81	0,81
	$\Delta K_{2\text{уч}\Sigma}$	0,312	0,304	0,29	0,276	0,263	0,25	0,238	0,225	0,213	0,201	0,19	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	0,293
	K'_{2U}	0,093	0,106	0,119	0,13	0,14	0,15	0,159	0,167	0,175	0,182	0,189	0,189
	K''_{2U}	0,166	0,163	0,16	0,156	0,153	0,15	0,147	0,143	0,14	0,137	0,134	0,134
	$\Delta K_{2\text{уч сист}}$	0,359	0,395	0,426	0,454	0,478	0,5	0,52	0,538	0,555	0,57	0,585	0,585
	$\Delta K_{2\text{уч}\Sigma}$	0,641	0,605	0,574	0,546	0,522	0,5	0,48	0,462	0,445	0,43	0,415	0,415

Продовження таблиці 5.4.

$K_{2\text{уч сист}}(0)$	Параметри	ΔZ_c^*										
		-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
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}	0,022	0,004	0,023	0,042	0,059	0,075	0,089	0,102	0,114	0,125	0,135
	K''_{2U}	0,239	0,236	0,233	0,231	0,228	0,225	0,222	0,22	0,217	0,214	0,212
	$\Delta K_{2\text{уч сист}}$	0,084	0,018	0,091	0,155	0,207	0,25	0,286	0,317	0,344	0,368	0,389
	$\Delta K_{2\text{уч}\Sigma}$	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}	0,138	0,103	0,072	0,045	0,021	0,0	0,019	0,037	0,053	0,067	0,08
	K''_{2U}	0,311	0,308	0,306	0,304	0,302	0,3	0,298	0,296	0,294	0,292	0,289
	$\Delta K_{2\text{уч сист}}$	0,307	0,25	0,191	0,13	0,066	0,0	0,061	0,111	0,152	0,187	0,217
	$\Delta K_{2\text{уч}\Sigma}$	0,693	0,75	0,809	0,87	0,934	1,0	0,939	0,889	0,848	0,813	0,783

Таблиця 5.5. Похибка параметрів, які характеризують несиметрію, в залежності від ΔZ_c^*

$K_{2\text{уч сист}}(0)$	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	$\Delta K'_{2U}, \%$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	$\Delta K''_{2U}, \%$	7,0	5,33	4,0	2,67	1,33	0,0	0,67	2,67	4,0	5,33	6,67
	$\Delta K_{2\text{уч сист}}, \%$	6,4	5,2	3,9	2,6	1,3	0,0	1,3	2,6	3,8	5,0	6,2
0,75	$\Delta K'_{2U}, \%$	-8,0	-6,0	-4,33	-3,0	-1,33	0,0	1,33	2,67	3,67	5,0	6,0
	$\Delta K''_{2U}, \%$	6,33	5,0	3,67	2,33	1,33	0,0	-1,33	-2,33	-3,67	-5,0	-6,0
	$\Delta K_{2\text{уч сист}}, \%$	-6,8	-5,4	-4,0	-2,6	-1,3	0,0	1,2	2,5	3,7	4,9	6,0

Продовження таблиці 5.5.

$K_{2,уч\ сист}(0)$	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
0,5	$\Delta K'_{2U}, \%$	-19,0	-14,7	-10,3	-6,7	-3,3	0,0	3,0	5,7	8,3	10,7	13,0
	$\Delta K''_{2U}, \%$	6,3	4,3	3,3	2,0	0,1	0,0	-0,1	-0,23	-3,3	-4,3	-5,3
	$\Delta K_{2,уч\ сист}, \%$	-14,1	-10,5	-7,4	-4,6	-2,2	0,0	2,0	3,8	5,5	7,0	8,5
0,25	$\Delta K'_{2U}, \%$	-17,6	-23,6	-17,3	-11,0	-5,33	0,0	4,67	9,0	13,0	16,7	20,0
	$\Delta K''_{2U}, \%$	4,67	3,67	2,67	2,0	1,0	0,0	-1,0	-1,67	-2,67	-3,67	4,33
	$\Delta K_{2,уч\ сист}, \%$	-16,6	-23,2	-15,9	-9,5	-4,3	0,0	3,6	6,7	9,4	11,8	13,9
0	$\Delta K'_{2U}, \%$	46,0	34,3	24,0	15,0	7,0	0,0	6,33	12,3	17,7	22,3	26,7
	$\Delta K''_{2U}, \%$	3,67	2,67	2,0	1,33	0,67	0,0	-0,67	-1,33	-2,0	-2,67	3,67
	$\Delta K_{2,уч\ сист}, \%$	30,7	25,0	19,1	13,0	6,6	0,0	6,1	11,1	15,2	18,7	21,7

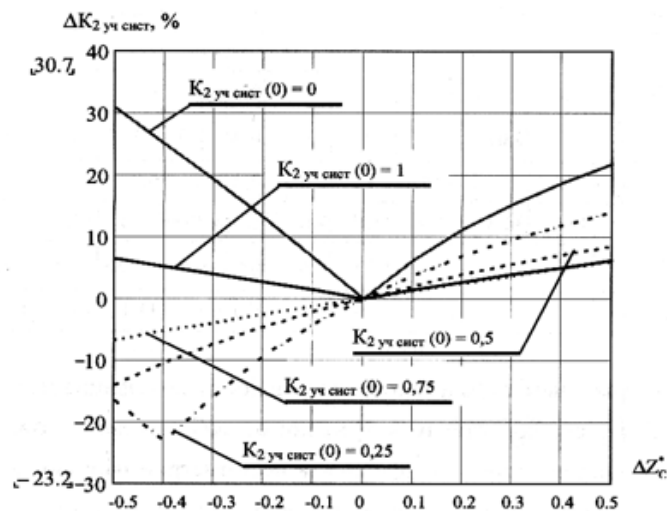
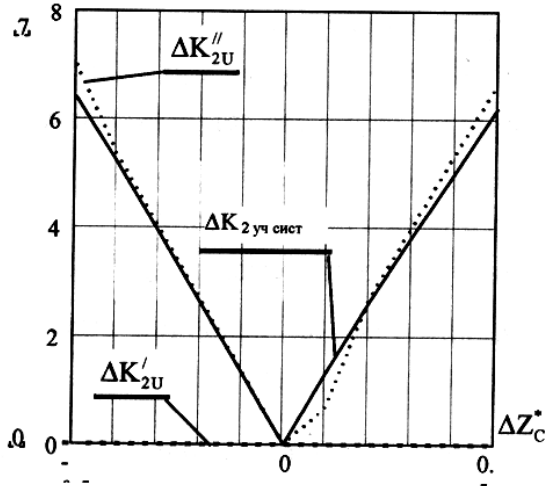
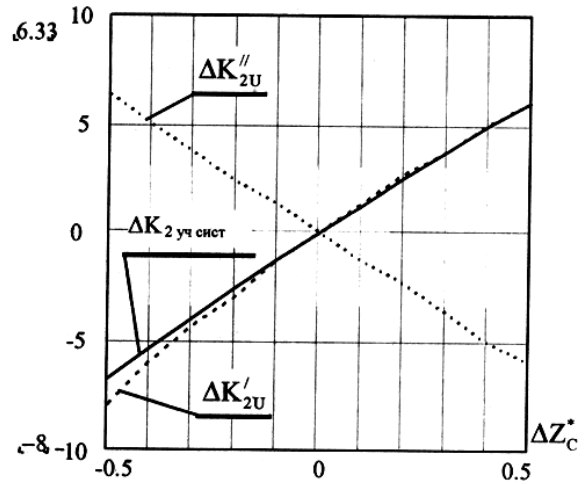


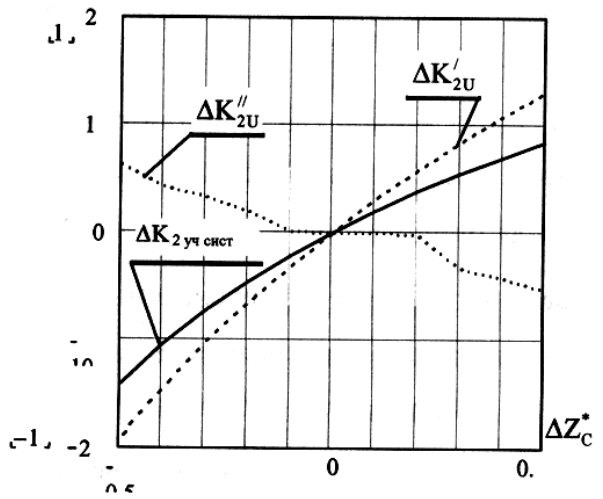
Рис.5.3. Залежність похибки розрахунку коефіцієнтів участі від помилки завдання опору зв'язку



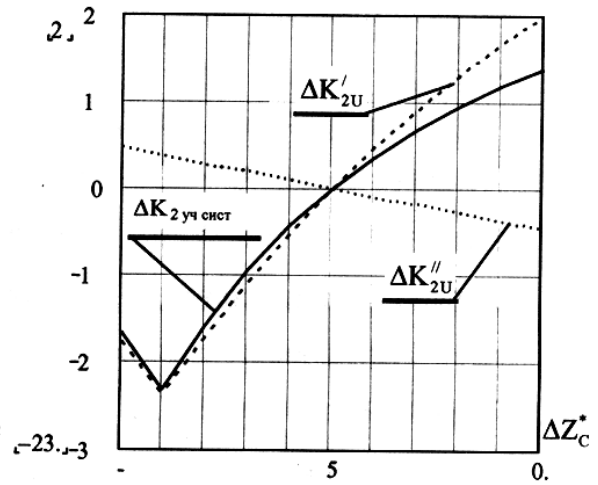
а)



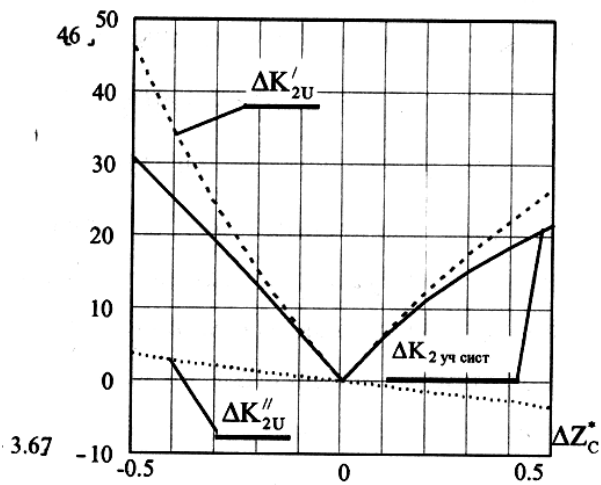
б)



в)



г)



д)

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 – $K_{2 \text{ уч сист}}(0) = 0$.

Проаналізуємо, чим визначаються похибки коефіцієнтів участі (рис.5.4). Для цього можна порівняти у функції від ΔZ_C^* зміни $\Delta K_{2\text{ уч сист}}$ зі змінами похибок коефіцієнта несиметрії напруги зворотної послідовності, створеного системою в ТЗП $\Delta K'_{2U}$, і коефіцієнта несиметрії напруги зворотної послідовності, створеного навантаженням в ТЗП $\Delta K''_{2U}$. З графіків випливає, що похибки зростають в міру збільшення внеску навантаження у порушення симетрії за зворотною послідовністю. Характер зміни похибки $\Delta K_{2\text{ уч сист}}$ визначається, в основному, похибкою коефіцієнта несиметрії напруги зворотної послідовності, створеного 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. Водночас, при симетричному навантаженні характер зміни $\Delta K_{2\text{ уч сист}}$ визначається виключно похибкою коефіцієнта несиметрії напруги зворотної послідовності, створеного навантаженням $\Delta K''_{2U}$ (рис.5.4, а). У даному випадку проявляються ознаки порушення симетрії за зворотною послідовністю при симетричному навантаженні.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження в роботі підтверджує, що проблема низької якості електричної енергії, спричинена несиметрією напруг та струмів, є однією з ключових технічних та економічних проблем для систем електропостачання України. Згідно з аналізом (розділ 1), основними причинами виникнення несиметричних режимів залишаються:

- нерівномірне розподілення однофазних навантажень (особливо в мережах 0,4 кВ);
- виникнення несиметричних коротких замикань;
- нерівність параметрів фаз ліній електропередач та трансформаторів.

У розділі 2 було детально вивчено та обґрунтовано механізм впливу несиметрії на роботу електрообладнання. Зокрема, встановлено, що наявність зворотної послідовності напруги призводить до: різкого зростання додаткових втрат потужності; перегріву обмоток асинхронних двигунів, що скорочує їхній ресурс в геометричній прогресії; зниження вихідної потужності обладнання та погіршення якості технологічних процесів.

На основі розділу 3, підкреслено необхідність регулярного та точного вимірювання несиметрії. Доведено, що застосування конкретної методики розрахунку несиметричних режимів дозволяє не лише діагностувати проблему, але й ідентифікувати її джерела та обґрунтувати необхідні коригувальні заходи. Це створює надійну аналітичну основу для прийняття технічних рішень.

Центральна частина роботи (розділ 4) присвячена систематизації та оцінці методів зменшення несиметрії. Було проаналізовано особливості симетрування трифазних мереж - з нульовим проводом та трипровідних. Особливу увагу приділено методиці симетрування за допомогою фазних потужностей, яка є найбільш гнучкою для адаптації. Розглянуто комплексний підхід, що поєднує симетрування та компенсацію реактивної потужності для досягнення максимального економічного ефекту. Проаналізовано важливі аспекти похибки

та стійкості процесу симетрування та типові схеми симетрувальних систем, що забезпечує практичну застосовність запропонованих рішень.

Аналіз у розділі 5 підкреслив, що несиметрія має не лише технічний, але й регуляторний аспект. Вплив несиметрії (зокрема, фазового зсуву) на визначення участі учасників процесу розподілу електричної енергії є критичним. Зроблено висновок, що точне визначення цих показників, попри вплив похибки у визначенні опору зв'язку, є необхідним для справедливого розподілу відповідальності та втрат між постачальником та споживачем.

Результати розрахунку, що приведені в додатку А на конкретному прикладі електричної мережі ПЛ-0,4 кВ практично підтвердили значний рівень несиметрії при типовому навантаженні. Таким чином, робота комплексно вирішила поставлене завдання, надавши як теоретичну базу, так і практичні рекомендації щодо впровадження технічних рішень для симетрування, що в кінцевому підсумку підвищить енергоефективність, надійність та безпеку роботи електроустановок, а також знизить експлуатаційні витрати підприємств.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Постанова 12.06.2018 № 375 «Про затвердження Порядку забезпечення стандартів якості електропостачання та надання компенсацій споживачам за їх недотримання». /Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг
2. ДСТУ 3466-96 Якість електроенергії. Терміни та визначення.
3. ДСТУ 2843-94. Електротехніка. Основні поняття. Терміни та визначення.
4. ДСТУ 2815-94 Електричні та магнітні кола та пристрої.
5. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності: ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). — К.: Держстандарт України, 2014. — 27 с.
6. Дідур В.А. Сучасна енергетика: стан, проблеми, перспективи розвитку /В.А. Дідур, О.В. Лисенко, С.В. Адамова // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету / ТДАТУ. — Мелітополь, 2016. — Вип. 16, т. 2. — С. 113-119.
7. В.І. Сенько, К.В. Трубіцин, В.І. Чибеліс Силова перетворювальна техніка// НТТУ «КПІ» імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»/ Київ КПІ ім. Ігоря Сікорського,- 2022-340 с.
8. Рябенський В.М., Ушкаренко О.О., Островерхов М.Я., М.С. Махмуд АльСуод. Програмна реалізація методів розрахунку та аналізу електричних кіл: Навчальний посібник. — Київ: Ліра-К, 2021. — 462 с.
9. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання : навч. посіб. / А. Ю. Орлович, П. Г. Плешков, О. А. Козловський [та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. — Кропивницький: Лисенко В.Ф., 2019. — 272 с.
10. Шкрабець, Ф. П. Основи електропостачання : навч. посіб. / Ф. П. Шкрабець, П. Г. Плешков. - Кіровоград : РВЛ КНТУ, 2010. - 408 с.

- 11 Електротехнічні системи електроспоживання : [навч. посіб.] / П. Г. Плешков, В. В. Зінзура, Н. Ю. Гарасьова [та ін.]; за заг. ред. П. Г. Плешкова. - Кропивницький : ЦНТУ, 2021. – 208 с.
12. Кирик В.В., Рибка О.О. Аналіз стану та технічної відповідності електричних мереж ОЕС України вимогам ENTSO-E Гідроенергетика України, 3—4/2021, ISSN 18129277
13. Кирик В.В. Електричні мережі та системи: підручник /В. В. Кирик. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. – 324 с. ISBN 978-966-990-031-9
14. Кирик В.В. Розподільні електричні мережі напругою 20 кВ та ефективність їх роботи / В.В.Кирик, Б.В. Циганенко, О.С. Яндутьський.-К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2018.-228с. ISBN 978-966-622-910-9
15. Правила улаштування електроустановок. Відокремлений підрозділ «Науково-проектний центр розвитку Об'єднаної енергетичної системи України» державного підприємства «Національна енергетична компанія «Укренерго» (НПЦР ОЕС України). Наказ Міністерства енергетики України від 21.07.2017 №476, 2017. – 617 с.
16. Лежнюк П.Д. Електроощадні технології в електричних мережах енергосистем / Любов Наумівна Добровольська, Володимир Володимирович Кулик, Петро Дем'янович Лежнюк // Під редакцією Лежнюка П.Д. – Луцьк: ІВВ Луцького НТУ, 2018. – 328 с.
17. 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів».

ДОДАТКИ

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ПЛ-0,4 кВ ПРИ НЕСИМЕТРИЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Вихідні дані:

ORIGIN := 1

Схема електричної мережі 10/0,38 кВ



I - ідеальне джерело 3-ф напруги 10 кВ;
 T - 3-ф трансформатор 10/0,4 кВ ТМ-160 зі схемою з'єднання обмоток D/Yn-0;
 ЛЕП - чотирихпровідна ПЛ-0,38 кВ, виконана проводом А-50, з розташуванням фаз і нульового провода в вершинах правильного чотирикутника (квадрата) зі стороною 60 см;
 Н - несиметричне навантаження, задане сталими потужностями фаз.

ПЛ-0,38 кВ:

$$U := 380 \quad D_{ij} := 60 \cdot 10^{-2}$$

$$r := 4.5 \cdot 10^{-3} \quad r_N := r$$

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

$$\mu := 1 \quad \omega := 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314.159$$

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

$$i := 1..4 \quad j := 1..4$$

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.

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

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

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

$l := 0.2$ - 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 **TM160**

$$Z_T := 10.55 + j \cdot 28 \text{ k} := \frac{10}{0.4} = 25$$

$$Z_{T1} := Z_T \quad Z_{T2} := Z_T \quad Z_{T0} := Z_T$$

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

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

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

$$s_{aa} := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Матриця переходу від координат симетричних складових до системи фазних координат}$$

$$k_s := \begin{pmatrix} e30 & 0 & 0 \\ 0 & \overline{e30} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Матриця переходу для фазних струмів и напруг вторинної обмотки до первинної для 11-ой групи з'єднання обмоток}$$

Матриця фазних опорів трансформатора:

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

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:

$$E_{0abc} := E \cdot s_s = \begin{pmatrix} 219.393 \\ -109.697 - 190i \\ -109.697 + 190i \end{pmatrix} \quad E_{3abc} := E_3 \cdot s_s = \begin{pmatrix} 6.062 \\ -3.031 - 5.25i \\ -3.031 + 5.25i \end{pmatrix}$$

Навантаження:

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

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

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

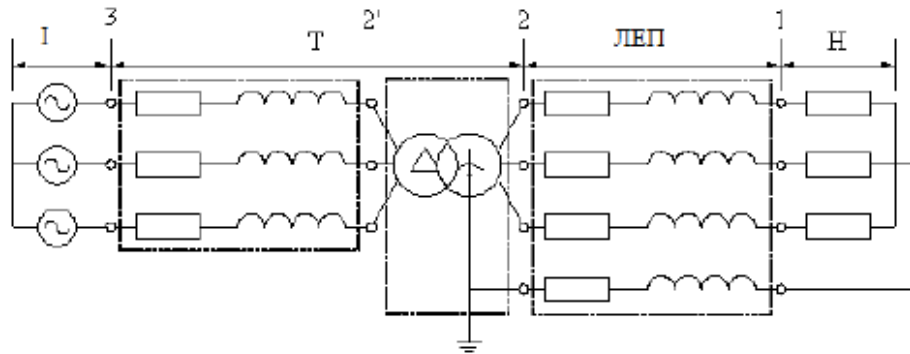
$$S_{abc} := P_{abc} + j \cdot Q_{abc}$$

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

$$P_{\Sigma} := \sum P_{abc} = 90$$

$$Q_{\Sigma} := \sum Q_{abc} = 43.589$$

Схема заміщення електричної мережі:



Розрахунок несиметричного режиму в фазних координатах.

Початкове наближення для U_1

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

Перша ітерація

1. Розрахунок 4-х провідної лінії

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

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

$$I_{abcN} := \begin{pmatrix} J_{abc1} \\ J_{abc2} \\ J_{abc3} \\ J_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 45.58 - 22.076i \\ -125.724 - 85.308i \\ -18.361 + 252.557i \\ 98.505 - 145.174i \end{pmatrix} \quad \text{ток в фазах ВЛ и нулевом проводе линии, А}$$

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

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

$$\Delta S_{abcN} := \overrightarrow{I_{abcN} \cdot \Delta U_{abcN}} \cdot 10^{-3} = \begin{pmatrix} 0.282 + 0.132i \\ 2.57 + 1.576i \\ 7.686 + 4.228i \\ 3.639 + 1.956i \end{pmatrix}$$

втрати потужності в провадах
лінії, кВт

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

2. Розрахунок трансформатору (точка 2 и 2' - обмотка низького напруги, 3 - високої)

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

струм у фазах вторинної обмотки (Н)
трансформатора, А

$$U_{2abc} := U_{1abc} + \text{submatrix}(\overrightarrow{|\Delta U_{abcN}|}, 1, 3, 1, 1) = \begin{pmatrix} - \\ \overrightarrow{|\Delta U_{abcN}|} \\ - \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 225.548 \\ 239.143 \\ 253.994 \end{pmatrix}$$

Напруга в точці 2', в кВ $k = 25$

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

$$\overrightarrow{|U_{2'abc}|} = \begin{pmatrix} 6.011 \\ 5.795 \\ 6.167 \end{pmatrix}$$

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

Струм в точку 2', А:

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

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

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

Падіння напруги в трансформаторі:

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

$$\overrightarrow{|\Delta U_{Tabc}|} = \begin{pmatrix} 0.196 \\ 0.127 \\ 0.246 \end{pmatrix}$$

$$U_{3.abc} := U_{2'abc} + \Delta U_{Tabc} \quad \overrightarrow{|U_{3.abc}|} = \begin{pmatrix} 6.189 \\ 5.862 \\ 6.327 \end{pmatrix}$$

Втрати потужності в трансформаторі:

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

Потужність на стороні високої напруги трансформатора

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

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

3. Розрахунок режиму напруг

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

$$\overrightarrow{|I_{2'abc}|} = \begin{pmatrix} 6.649 \\ 4.078 \\ 8.545 \end{pmatrix}$$

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

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

$$U_{2'abc} := E_{3abc} - \Delta U_{\text{Tabc}} = \begin{pmatrix} 5.87 \\ -3.08 \\ -2.5 \end{pmatrix} \overrightarrow{|E_{3abc}|} = \begin{pmatrix} 6.062 \\ 6.062 \\ 6.062 \end{pmatrix}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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).

Res :- for $i \in 1..5$

$$J_{abc} \leftarrow \text{diag}(\overline{U_{1abc}})^{-1} \cdot \overline{S_{abc}} \cdot 10^3$$

$$J_N \leftarrow \sum J_{abc}$$

$$I_{abcN} \leftarrow \begin{pmatrix} J_{abc1} \\ J_{abc2} \\ J_{abc3} \\ J_N \end{pmatrix}$$

$$\Delta U_{abcN} \leftarrow Z_{abcN} \cdot I_{abcN}$$

$$\Delta S_{abcN} \leftarrow \overrightarrow{(\overline{I_{abcN}} \cdot \Delta U_{abcN})} \cdot 10^{-3}$$

$$S_{2,abc0} \leftarrow \begin{pmatrix} S_{abc1} \\ S_{abc2} \\ S_{abc3} \\ 0 \end{pmatrix} + \Delta S_{abcN}$$

$$I_{2abc} \leftarrow \text{submatrix}(I_{abcN}, 1, 3, 1, 1)$$

$$U_{2abc} \leftarrow U_{1abc} + \text{submatrix}(\Delta U_{abcN}, 1, 3, 1, 1)$$

$$U_{2'abc} \leftarrow \frac{k \cdot s \cdot \overline{k_s} \cdot s^{-1} \cdot U_{2abc}}{1000}$$

$$I_{2'abc} \leftarrow \frac{1}{k} \cdot s \cdot \overline{k_s} \cdot s^{-1} \cdot I_{2abc}$$

$$\Delta U_T \leftarrow \frac{Z_{Tabc} \cdot I_{2'abc}}{1000}$$

$$U_{3,abc} \leftarrow U_{2'abc} + \Delta U_T$$

$$\Delta S_T \leftarrow \overrightarrow{(\overline{I_{2'abc}} \cdot \Delta U_T)}$$

$$S_3 \leftarrow \overrightarrow{(\overline{I_{2'abc}} \cdot U_{3,abc})}$$

$$I_{2'abc} \leftarrow \text{diag}(\overline{E_{3abc}})^{-1} \cdot \overline{S_3}$$

$$\Delta U_T \leftarrow \frac{Z_{Tabc} \cdot I_{2'abc}}{1000}$$

$$U_{2'abc} \leftarrow E_{3abc} - \Delta U_T$$

$$U_{2abc} \leftarrow 1000 \cdot \frac{1}{k} \cdot s \cdot \overline{k_s} \cdot s^{-1} \cdot U_{2'abc}$$

$$I_{2abc} \leftarrow k \cdot s \cdot \overline{k_s} \cdot s^{-1} \cdot I_{2'abc}$$

$$U_N \leftarrow \sum U_{2abc}$$

$$I_N \leftarrow - \left(\sum I_{2abc} \right)$$

$$U_1 \leftarrow \begin{pmatrix} U_{2abc1} \\ U_{2abc2} \\ U_{2abc3} \\ U_N \end{pmatrix} - Z_{abcN} \begin{pmatrix} I_{2abc1} \\ I_{2abc2} \\ I_{2abc3} \\ I_N \end{pmatrix}$$

$$U_{1abc} \leftarrow \text{submatrix}(U_1, 1, 3, 1, 1)$$

$$\text{return} \left(\sum \Delta S_{abcN} + \sum \Delta S_T \quad U_{1_1} \quad U_{1_2} \quad U_{1_3} \quad U_{1_4} \right)$$

Результати розрахунку режиму лінії:

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

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

Фазні напруги:	Лінійні напруги:	Напруга на нейтралі:
$ T_2 = 223.162$	$ T_2 - T_3 = 392.258$	$ T_5 = 0.488$
$ T_3 = 219.423$	$ T_3 - T_4 = 360.95$	
$ T_4 = 204.877$	$ T_4 - T_2 = 368.26$	

$$\Delta P_{\text{mp}} := \text{Re}(\text{Res}^T)_1 = 17.883 \quad - \text{втрати потужності в ПЛ і Т}$$

ОХОРОНА ПРАЦІ В УМОВАХ НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК

Загальні положення та небезпека

Несиметричні режими роботи електроустановок виникають внаслідок різних факторів, таких як обрив фази, нерівномірне навантаження фаз, замикання на землю та інші пошкодження. У цих режимах значно зростає небезпека ураження людини електричним струмом.

Основна небезпека пов'язана з тим, що несиметрія призводить до:

- Підвищення напруг на елементах електроустановки та навколишніх провідних об'єктах відносно землі.
- Виникнення недопустимого підвищення крокової та дотичної напруг в зоні електроустановки, особливо навколо місця пошкодження або біля заземлювальних пристроїв.

Крокова та дотична напруги

Крокова напруга (U_k) — це напруга між двома точками поверхні землі, розташованими на відстані кроку (приблизно 0,8 м), на яких одночасно стоїть людина.

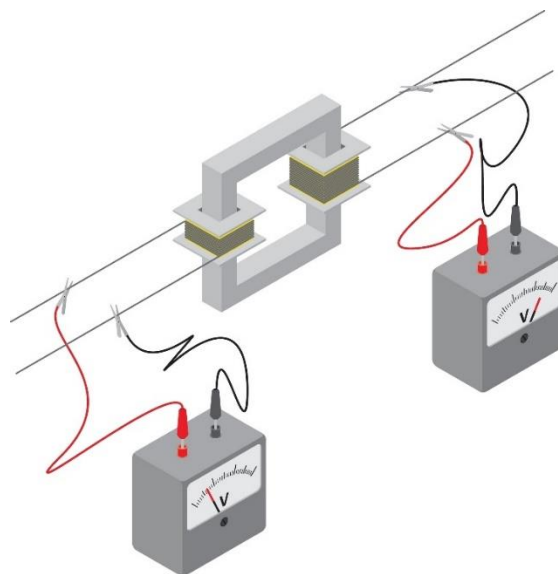


Рис.Б.1. Схематичне зображення крокової напруги

Дотична напруга (U_d) — це напруга між двома точками: точкою, де знаходиться людина (наприклад, стоїть на землі), і точкою дотику до струмопровідної частини або об'єкта (наприклад, корпус обладнання, огороження).

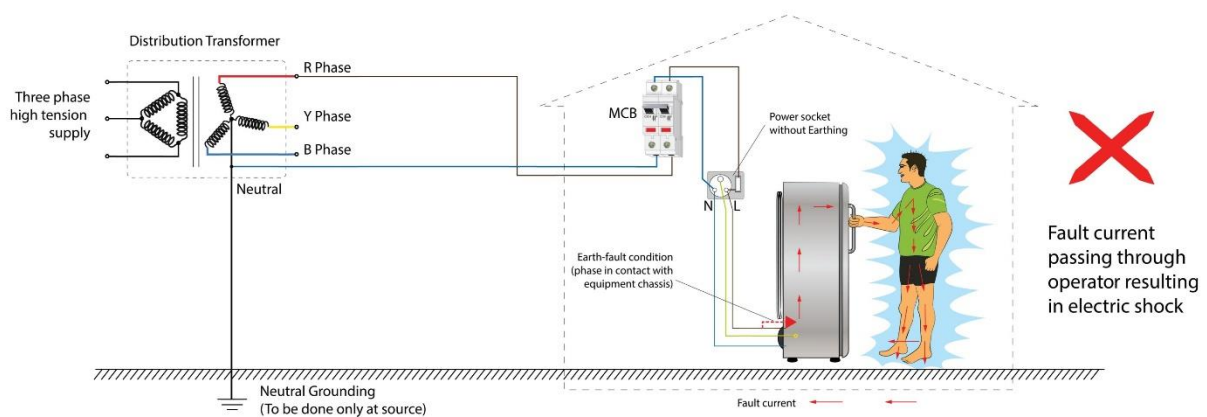
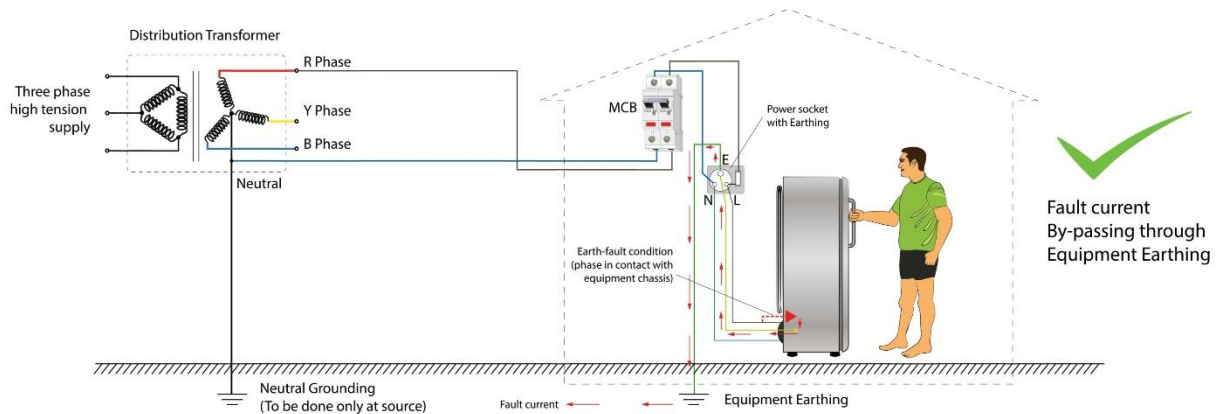


Рис.Б.2. Схематичне зображення дотичної напруги

У разі несиметрії (наприклад, однофазного замикання на землю), потенціал землі в зоні розтікання струму може значно зрости, що критично збільшує ці напруги вище гранично допустимих значень згідно з чинними нормативними документами.

Заходи контролю та обмеження несиметрії

Для забезпечення безпеки експлуатації електроустановок та мінімізації ризиків, пов'язаних з несиметрією, необхідно здійснювати постійний контроль та вживати заходів для її обмеження:

А. Технічні та експлуатаційні заходи:

- Систематичний контроль навантаження фаз: регулярний моніторинг і перерозподіл однофазних навантажень для забезпечення рівномірного струму у всіх фазах (особливо в мережах 0,4 кВ).
- Контроль опору ізоляції: у мережах з ізолюваною нейтраллю (наприклад, 6-35 кВ) постійний контроль опору ізоляції фаз відносно землі для своєчасного виявлення та усунення пошкоджень, що можуть призвести до несиметрії.
- Використання спеціальних пристроїв: застосування пристроїв компенсації ємнісного струму (дугогасні реактори) та автоматичного регулювання для обмеження струмів замикання на землю та зменшення потенціалу на землі.
- Надійне заземлення та захисні заходи: підтримання належного стану захисного заземлення обладнання та занулення (в мережах з глухозаземленою нейтраллю) для забезпечення швидкого спрацювання захисту.

Б. Організаційні заходи:

- Постійний моніторинг параметрів мережі: використання систем релейного захисту та автоматики, які фіксують та реагують на порушення симетрії.
- Своєчасне обслуговування та ремонт: негайне усунення виявлених несправностей, які можуть спричинити несиметрію (пошкодження ізоляції, обриви проводів тощо).
- Навчання персоналу: регулярне проведення інструктажів та навчання оперативного і ремонтного персоналу щодо дій у разі виникнення несиметричних режимів (особливо при замиканні на землю).

Дії персоналу в умовах несиметрії

У разі виявлення ознак несиметрії (наприклад, спрацювання захисту, сигнали приладів, нетиповий шум), персонал зобов'язаний:

1. Негайно повідомити відповідального керівника або диспетчера.

2. Визначити джерело або причину несиметрії (за можливості та безпечності).

3. Вжити заходів для відновлення нормального симетричного режиму роботи відповідно до експлуатаційних інструкцій.

4. При замиканні на землю, не наближатися до місця пошкодження ближче, ніж на 8 метрів у закритих та 10 метрів у відкритих розподільчих пристроях (якщо не використовуються засоби індивідуального захисту від крокової напруги), і залишати небезпечну зону "гусячим кроком" (не відриваючи ступні від землі).

Дотримання цих вимог є критично важливим для запобігання нещасним випадкам і забезпечення безпечної експлуатації електроустановок.

Основна законодавча база

1. Закони України

- Закон України «Про охорону праці»

Встановлює загальні правові, соціально-економічні та організаційно-технічні засади для забезпечення безпеки, збереження здоров'я і працездатності людини у процесі трудової діяльності. Він є основою для всіх нормативно-правових актів з охорони праці у сфері електробезпеки.

2. Нормативно-правові акти з охорони праці (НПАОП)

Це найбільш важливі документи, що містять конкретні вимоги:

- НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів»

Ці Правила встановлюють вимоги безпеки для персоналу, який обслуговує діючі електроустановки. Вони містять прямі вимоги щодо захисту від крокової та дотичної напруг, включаючи:

- Допустимі значення цих напруг в різних режимах роботи (у тому числі в аварійних, спричинених несиметрією, наприклад, при замиканні на землю).

- Вимоги до заземлювальних пристроїв, які мають забезпечувати необхідний захист і обмеження напруги.

- Порядок дій персоналу при виявленні замикання на землю або інших аварійних режимів, що генерують високу крокову напругу (наприклад, пересування "гусячим кроком").

- НПАОП 40.1-1.01-97 «Правила безпечної експлуатації електроустановок» (застосовуються у сфері енергетики)

Аналогічний документ, що регулює безпеку в електроустановках, які належать енергопостачальним організаціям.

3. Технічні нормативи та стандарти

- Правила улаштування електроустановок (ПУЕ) (Наказ Міністерства енергетики України № 476 від 24.07.2017)

ПУЕ є основним технічним документом, що встановлює вимоги до проектування та будівництва електроустановок.

Саме ПУЕ містить детальні вимоги до заземлення та занулення, які є першочерговими технічними заходами для мінімізації небезпеки крокової та дотичної напруг у разі аварійної несиметрії (наприклад, замикання на землю).

ПУЕ також визначає допустимі рівні несиметрії напруг в нормальних режимах роботи мереж (наприклад, вимоги до якості електричної енергії), що опосередковано впливає на електробезпеку.

Таким чином, вимоги щодо безпеки в умовах несиметричних режимів (які призводять до підвищення U_k і U_d) регулюються через:

1. Технічні вимоги ПУЕ до конструкції заземлення та систем захисту, які мають забезпечити безпеку в аварійних режимах.

2. Експлуатаційні вимоги НПАОП, які встановлюють гранично допустимі напруги, регламентують використання захисних засобів (наприклад, діелектричні боти), а також чітко визначають дії персоналу в зоні високих потенціалів.