

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота

на правах рукопису

**Баранівська Олена Юріївна**

УДК 621.359.4

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Оцінка впливу несиметрії напруги в сільських мережах 0,4 кВ

(тема роботи)

на втрати потужності

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Баранівська О. Ю.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Гончаренко Юрій Павлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри електрифікації,

автоматизації виробництва та інженерної екології

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2020

## АНОТАЦІЯ

Баранівська О. Ю. Оцінка впливу несиметрії напруги в сільських мережах 0,4 кВ на втрати потужності. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2020.

Робота присвячена проблемі виникнення і компенсації несиметрії напруги в сільських мережах 0,4 кВ, а також визначення найбільш ефективних методів її зниження.

В процесі виконання роботи проведено дослідження несиметрії в трифазних мережах і зроблений вибір оптимальних методів компенсації несиметрії.

**Ключові слова:** якість електричної енергії, коефіцієнт несиметрії напруги, несиметрія, втрати електроенергії, симетруючий пристрій, електрична мережа низької напруги.

## ABSTRACT

Baranovska A.Yu. Estimation of influence of unsymmetry of tension in the rural networks of 0,4 kV on the losses of power. Qualifying work on the receipt of educational master's degree after speciality 141 is Electroenergy, electrical engineering and electromechanics is the Polesye national university, Zhytomyr, 2020.

Work is sanctified to the problem of origin and indemnification of unsymmetry of tension in the rural networks of 0,4 kV, and also determination of the most her decline.

In the effective methods of process of implementation of work a study of unsymmetry in three-phase networks and done choice of optimal methods of indemnification of unsymmetry are undertaken.

**Keywords:** quality of electric energy, coefficient of unsymmetry of tension, unsymmetry, losses of electric power, симетруючий device, electric network of low tension.

## ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТА ВПЛИВ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГИ В СІЛЬСЬКИХ МЕРЕЖАХ 0,4 кВ	6
1.1. Види несиметричних режимів сільських мереж 0,4 кВ	7
1.2. Вплив несиметрії напруги на роботу споживачів електроенергії	10
1.3 Вплив несиметрії напруги на показники якості електроенергії	16
Висновки по розділу 1	18
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ СПОСОБІВ І ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ НОРМАЛІЗАЦІЇ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ В СІЛЬСЬКИХ МЕРЕЖАХ 0,4 кВ	20
2.1. Класифікація способів і технічних засобів зниження несиметрії струмів і напруг	20
2.2. Способи зниження несиметрії струмів і напруг в мережах 0,4 кВ	21
2.3. Технічні засоби зниження несиметрії напруги в сільських мережах 0,4 кВ	25
Висновки по розділу 2	32
ВИСНОВКИ	34
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	35

## ВСТУП

Сучасний розвиток України, що характеризується збільшенням потужності навантажень на підприємствах, автоматизацією виробничих процесів, зростанням комунально-побутових навантажень, веде за собою погіршення якості електричної енергії в системах електропостачання і як наслідок до зниження ефективності роботи і скорочення терміну служби як електроприймачів, так і самих систем електропостачання.

Однією з причин погіршення якості електричної енергії є несиметрія напруги в мережі і на затискачах устаткування, яка є наслідком нераціонального розподілу великої кількості несиметричних і нелінійних споживачів.

Збільшення несиметрії веде до збільшення втрат в енергетичному устаткуванні при передачі і споживанні електричної енергії, а також до скорочення терміну служби устаткування. У наслідку цього дослідження виникнення і компенсації несиметрії, а також визначення найбільш ефективних методів її зниження є дуже **актуальним завданням** в електроенергетиці.

**Об'єктом дослідження** є заходи і засоби компенсації несиметрії в мережах 0,4-10 кВ.

**Мета дослідження** - розібратися в причинах виникнення несиметрії в мережах низької напруги, розглянути її вплив на електроустаткування і визначити найбільш ефективні заходи і засоби компенсації несиметрії.

**Предмет дослідження:** в процесі виконання роботи провести дослідження несиметрії в трифазних мережах і зробити вибір оптимальних методів компенсації несиметрії.

**Перелік публікацій автора за темою дослідження :**

1. Гончаренко Ю.П., Баранівська О.Ю., Нелеп О.В. НЕСИМЕТРИЧНІ РЕЖИМИ РОБОТИ СІЛЬСТКИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ 0,4-10(6) кВ.

IV МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ МАТЕРІАЛИ. ЧАСТИНА 2. С. . «Біоенергетичні системи». 29 травня 2020 Житомир, Україна.

2. Гончаренко Ю.П., Баранівська О.Ю., Нелеп О.В. КЛАСИФІКАЦІЯ СПОСОБІВ І ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ЗНИЖЕННЯ НЕСИМЕТРІЇ СТРУМІВ І НАПРУГ СІЛЬСТКИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ 0,4-10(6) кВ.

IV МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ МАТЕРІАЛИ. ЧАСТИНА 2. С. . «Біоенергетичні системи». 29 травня 2020 Житомир, Україна.

3. Баранівська О.Ю. ЗАСТОСУВАННЯ СИМЕТРУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГИ СІЛЬСТКИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ 0,4 кВ.

Студентські читання – 2020: Матеріали науково-практичної конференції факультету інженерії та енергетики «Студентські читання – 2020». 26 жовтня 2020 р. Житомир: Поліський національний університет, 2020.- 400 с.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ТА ВПЛИВ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГИ В СІЛЬСЬКИХ МЕРЕЖАХ 0,4 кВ

За останні роки сталося значне збільшення споживання електричної енергії сільськогосподарськими підприємствами, а також в побуті сільських жителів. За чисельністю і складом електроустановок, вимогам до надійності їх електропостачання і якості електроенергії вони наблизилися до промислових споживачів. Основною відмінною рисою сучасного сільського електропостачання є те, що сільськогосподарські споживачі зосередили на своєму балансі значну кількість ліній електропередачі, трансформаторних підстанцій, електродвигунів і інших виробничих і побутових електроустановок.

Несиметричним режимом роботи багатофазної електричної мережі вважається такий режим, при якому умови роботи фаз неоднакові. Міра несиметрії трифазної чотири провідної системи електропостачання характеризуються коефіцієнтами напруги зворотної і нульової послідовностей, а також коефіцієнтами зворотної і нульової послідовностей струмів. При цьому втрати потужності, обумовлені несиметрією струмів можуть характеризуватися коефіцієнтом втрат потужності, рівним відношенню втрат потужності в несиметричному режимі, до відповідних втрат потужності, обумовлених протіканням струмів прямої послідовності [27-29]. Коефіцієнти несиметрії напруги і втрати потужності в загальному випадку можуть набувати будь-яких чисельних значень, обумовлених мірою несиметрії напруги. Чим вони більші, тим сильніше негативна дія несиметрії мережі на роботу електроустановок.

Причинами виникнення несиметричних режимів роботи електричної системи, практично в усіх випадках, являється нерівномірність розподілу навантажень по фазах і зниження навантажень трифазних споживачів (електродвигунів, потужних трифазних нагрівачів). Якщо 20-25 років тому трифазне навантаження складало більше  $2/3$  загального навантаження мережі 0,4 кВ, то нині її доля менше  $1/3$  [9]. Значною мірою це пов'язано з тим, що в останні роки в сільській місцевості значно збільшилась інтенсивність використання однофазних електроприймачів.

### **1.1. Види несиметричних режимів сільських мереж 0,4 кВ**

У сільських мережах 0,4 Кв можуть два види несиметричних режимів: короткочасні (аварійні) і тривалі (експлуатаційні) [11]. Короткочасні несиметричні режими як правило пов'язані з різними аварійними процесами, як наприклад несиметричні короткі замикання, обриви одного або двох проводів в повітряній лінії із замиканням на землю і так далі. Тривалі несиметричні режими обумовлені несиметрією елементів електричної мережі неповнофазними відгалуженнями (одно-, двофазні відгалуження) або підключенням несиметричних одно-, двох- або трифазних навантажень.

Несиметрію напруги і струмів, яка обумовлена несиметрією елементів мережі, називають подовжньою. Прикладом подовжньої несиметрії є неповнофазні режими повітряних ліній та несиметрія параметрів фаз окремих елементів мережі.

Поперечна несиметрія виникає при підключенні до електричної мережі несиметричних одно та багатофазних навантажень [10]. Причиною такої несиметрії може бути: несиметрія струмів, напруг а також неоднакові активні та реактивні опори окремих фаз.

У діючих мережах 0,4 кВ розподіл однофазних електроприймачів по фазах робиться у край нерівномірно, в силу чого створюється перевантаження одних, і недовантаження інших фаз. Внаслідок чого виходить, так званий "перекіс фаз", або невикладкова несиметрія струмів.

На стадії проектування небудь якого сільськогосподарського об'єкту, а також комунально-побутового сектору при розгляді способів розташування схеми розподільної мережі 0,4 кВ необхідно враховувати характер навантаження і встановлену потужність окремих споживачів електроенергії для того, щоб здійснити їх рівномірний розподіл по фазах мережі. Окрім цього, в процесі експлуатації низьковольтної лінії електропередачі 0,4 кВ з розвитком сільськогосподарських об'єктів і комунально-побутового сектору до лінії додатково підключається велика кількість нових електроприймачів, які, у свою чергу, також необхідно підключати з урахуванням рівномірного завантаження фаз.

Багаторічні спостереження в сільських розподільних мережах 0,4 кВ [36, 37, 38, 39, 40] показали що, як правило, симетричне підключення однофазних споживачів, порушуються в 90% випадків.

Слід зазначити, що перерозподіл навантажень робити необхідно, оскільки проведеними дослідженнями встановлено, що втрати електричної енергії, обумовлені невідповідною несиметрією струмів, можуть бути понижені на 15...20% [46]. Перерозподіл навантажень значно покращує основні показники якості (відхилення напруги, коефіцієнт несиметрії зворотної послідовності напруги і коефіцієнт несиметрії нульової послідовності напруги).

Крім того, нерівномірному характеру розподілу однофазних електроприймачів по фазах електричної мережі, як правило, супроводять випадкові включення і відключення цих споживачів електричної енергії. Ці передумови визначають виникнення окрім невідповідної несиметрії струмів, статичної (випадковою) або імовірнісної несиметрії, яка досягає значних величин. Таким чином, несиметричний режим роботи електричної мережі 0,4 кВ є об'єктивно існуючим, оскільки навіть при пофазно рівномірному підключенні навантажень виникає імовірнісна несиметрія струмів.

При імовірнісній несиметрії навантаження кожної фази змінюється в часі незалежно від зміни навантажень інших фаз, тому трифазне регулювання напруги, вживане в сільських електричних мережах 0,4 кВ, не в змозі



забезпечити нормовану напругу на затисках струмоприймачів без застосування додаткових заходів по симетруванню фазних струмів в електричних мережах, оскільки воно припускає рівну дію на всі три фази.

Однофазні електроприймачі розділяються по потужності і характеру роботи на ряд груп з подібними режимними показниками графіків навантажень і співпадаючим порядком потужності електроприймачів в кожній групі. Двома основними навантаженнями з цих груп є виробниче освітлювальне і комунально-побутове, які є головним джерелом несиметричних режимів роботи сільських розподільних мереж 0,4 кВ.

При порушенні симетрії багатозазної системи, останню можна розкласти на три симетричні - систему прямої послідовності і системи зворотної і нульової послідовності, що накладаються на неї [49]. Векторні діаграми систем представлена на малюнку 1.1.



Рисунок 1.1. Векторні діаграми прямої, зворотної та нульової послідовності

Пряму послідовність складають три вектори  $A_1$ ,  $B_1$  і  $C_1$ , які мають однаковий модуль, але при цьому здвинуті один відносно одного на 120 градусів, причому  $A_1$  випереджає  $B_1$ , а  $B_1$  у свою чергу випереджає  $C_1$ . Зворотна послідовність аналогічна прямій, відмінністю є те, що вектор  $A_2$  випереджає  $C_2$ , який випереджає  $B_2$ . Нульова послідовність утворена векторами однаковими як по модулю, так і по напрямку.

Наявність зворотної послідовності призводить до зміни абсолютних значень як фазної, так і лінійної напруги. Накладення ж нульової послідовності приводить до зміщення нейтралі, при якій виникає несиметрія тільки фазної напруги. Обидва випадки представлені на рисунках 1.2 і 1.3 відповідно.

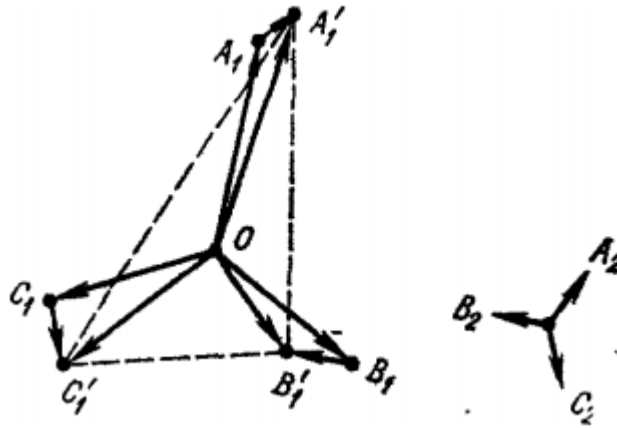


Рисунок 1.2. Накладення зворотної послідовності на пряму

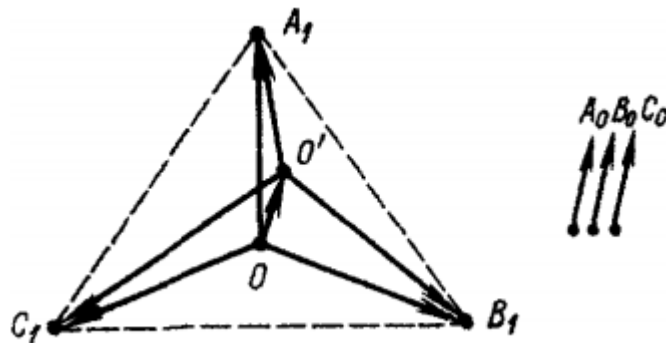


Рисунок 1.3. Накладення нульової послідовності на пряму

Таким чином, несиметрія струмів викликає появу струму в нульовому проводі, і в той же час і напругу зміщення нейтральної точки системи фазної напруги. В результаті цього напруги фаз на затискачах електроприймачів стають неоднаковими.

## 1.2. Вплив несиметрії напруги на роботу споживачів електроенергії

*Асинхронні електродвигуни.* Найбільше поширення в якості приводу в сільському господарстві отримали асинхронні електродвигуни. Несиметричні

струми, викликані несиметричним навантаженням, внаслідок кінцевих значень опорів ліній електропередачі, викликають несиметрію напруги. У асинхронних електродвигунах несиметрія струмів і напруги обумовлює появу додаткового нагріву і, як наслідок, додаткових втрат потужності [34]. Крім того, це призводить до появи протидіючого моменту, що обертає, який зменшує корисний момент. Зменшення корисного моменту за рахунок протидіючого по відношенню до моменту при симетричному навантаженні, може бути визначено за наступним виразом [31] :

$$m = \frac{s}{2-s} \cdot \frac{Z_1^2 \cdot U_2^1}{Z_2^2 \cdot U_1^2} = \frac{s}{2-s} \cdot \frac{Z_1^2}{Z_2^2} \cdot k_U^2, \quad (1.1)$$

де  $s$  – коефіцієнт ковзання;

$Z_1$  і  $Z_2$  – повний опір прямої і зворотної послідовностей;

$K_U$  – коефіцієнт несиметрії напруги.

Для індукційного двигуна в номінальному режимі  $Z_2 \approx 0,16 Z_1$ , а максимальне ковзання при повному навантаженні дорівнює 0,05. Тому [34],

$$m = \frac{0,05}{1,95} \cdot \frac{1}{0,16} \cdot \frac{U_2^2}{U_1^2} \approx k_U^2. \quad (1.2)$$

Таким чином, зменшення обертового моменту дорівнює квадрату коефіцієнта несиметрії напруги. Слід відмітити, що, так як для заторможеного двигуна  $s=1$ , а  $Z_1 = Z_2$  [9,34], то вираз (1.2) справедливий і для пускового режиму.

Оскільки опір зворотної послідовності асинхронних електродвигунів в 5-7 разів менше опору прямої послідовності, то за наявності навіть невеликої за величиною складової напруги зворотної послідовності, виникає струм значної величини. Цей струм обумовлює додаткове нагрівання ротора і статора, внаслідок чого відбувається старіння ізоляції і зменшується номінальна потужність двигуна. Встановлено, що термін служби повністю навантаженого

асинхронного електродвигуна, працюючого при несиметрії напруги в 4%, скорочується в два рази [9, 31, 34].

Сумарні додаткові втрати потужності в асинхронних електродвигунах із-за несиметрії напруги в мережі дорівнюють 37,3%, від сумарних втрат в цих машинах, якби останні працювали при середньому навантаженні і номінальній напрузі [9].

Проведені дослідження [34] показали, що обертового і пускового моментів асинхронного двигуна при несиметрії напруги дорівнює квадрату коефіцієнта несиметрії напруги. При цьому, більше 20% асинхронних двигунів виходять з ладу в результаті їх роботи в несиметричних електричних системах [20, 25]. Встановлено [31], що допустимою величиною несиметрії напруги для асинхронних електродвигунів слід рахувати несиметрію в 2%. Як видно з виразу (1.2), зниження обертового моменту, при цьому буде також незначним. Для збереження терміну служби машини при несиметрії більше 2% потрібно або знижувати потужності на валу двигуна, або збільшувати його номінальну потужності. При коефіцієнті несиметрії напруги рівному 10% існуюча потужність асинхронного двигуна зменшується на 20-50% [34].

*Однофазні споживачі.* При сучасному рівні використання побутової електротехніки, якість електроенергії на введенні у споживача значно визначає якість і експлуатаційні параметри побутових електроприладів, їх надійність і довговічність. Дослідження показали, що число побутових споживачів, які одержують неякісну електроенергію, складає в сільській місцевості більше половини усіх абонентів [29, 37]. У сучасному АПК, як в побуті, так і у виробництві, є досить багато однофазних споживачів електроенергії, режим роботи яких сильно залежить від стабільності величини напруги.

Споживачі електричної енергії, підключені на різні фази несиметричної системи, можуть виявитися, або під підвищеною, або під зниженою напругою, причому обидві умови небажані. Особливо це відноситься до елементів з нелінійною вольтамперной характеристикою. Викликані несиметрією струмів

відхилення фазної напруги від номінальних значень, негативно впливають на роботу таких споживачів.

Розглянемо вплив несиметрії напруги на джерела світла. Якщо фазна напруга неоднакова, то ті лампи, які підключені до фази з більш високою напругою, мають менший термін служби, але більш високий світловий потік, на відміну від ламп, підключених до фази з меншою напругою. Результати дослідів показали, що при збільшенні напруги на 5% світловий потік ламп збільшується на 20%, а термін служби зменшується в 2 рази. При зниженні напруги на 5% світловий потік зменшується на 18%, а термін служби збільшується в 2,4 разу. При підвищенні напруги на 10% термін служби люмінесцентних ламп скорочується на 20-30%, а при зниженні напруги (близько 25-30%) запалення газорозрядних ламп взагалі неможливе [31]. Слід також відмітити, що при нерівномірному розподілі ламп по фазах мережі, самі лампи можуть бути причиною появи несиметрії струмів і напруги.

Несиметрія в трифазній чотири провідній системі також негативно впливає на роботу релейного захисту, знижує стійкість електричних систем, систем автоматики, веде до помилок при обліку електроенергії і так далі.

*Лінії електропередачі і трансформатори.* Несиметрія струмів в лініях електропередачі, розподільчих мережах і трансформаторах зменшує пропускну спроможність трифазної системи. Несиметрично розташоване навантаження призводить до того, що одна з фаз працює з перевантаженням, тоді як інші фази недовантажені. При передачі електроенергії по мережах низької напруги втрата потужності, у разі несиметричного розподілу струмів по фазах, може бути в три-чотири рази більше, ніж при симетричному режимі [10, 20, 29]. Дійсно, в симетричному режимі втрати енергії складають  $3 I r^2$ , де  $r$  - активний опір фази лінії. Якщо ж в одній з фаз струм збільшити, а в іншій зменшити на величину  $\Delta I$ , те втрати збільшаться:

$$I \cdot r + (I + \Delta I)^2 \cdot r + (I - \Delta I)^2 \cdot r = 3I^2 \cdot r = 2 \cdot \Delta I^2 \cdot r \quad (1.3)$$

Несиметрія в трансформаторах обумовлена, як несиметрією підведеної напруги, так і несиметрією навантажень, підключенх до ЛЕП. При несиметрії напруги під "корисною" потужністю трансформатора розуміється потужність, що відповідає струму прямої послідовності.

Потужність трансформатора при навантаженні, струмом прямої послідовності, коли в одній з обмоток повний струм досягає номінального значення, прийнято називати номінальною потужністю.

При несиметрії струмів в трансформаторах, що мають великий опір нульової послідовності (наприклад, у разі з'єднання обмоток за схемою "зірка - зірка - нуль"), додаткові втрати від магнітних потоків нульової послідовності можуть досягати 25-35% втрат холостого ходу [29], втрати напруги при цьому складають 15-20%, замість 4% при симетричному режимі [32].

Магнітні потоки, які створюються струмами нульової послідовності, замикаються через бак, дно, кришку і інші феромагнітні частини трансформатора і розігрівають їх. Розігрівання погіршує охолодження активної частини трансформатора, що викликає нагрів ізоляції обмоток понад норму, і трансформатор при завантаженні нижче номінальною може виявитися перевантаженим, що приводить його до виходу із ладу. Ця обставина змушує підвищувати встановлену номінальну потужність трансформаторів на 1...2 східці більше за необхідну. Це дає незначний ефект, але істотно знижує втрати напруги і електроенергії в мережі [21]. Головною ознакою несиметрії навантаження трансформатора є підвищений його шум роботи.

Додаткові втрати потужності в мережі, обумовлені несиметрією струмів, характеризуються коефіцієнтом збільшення втрат потужності  $K_P$  [29]:

$$K_P = \Delta P_{HC} / \Delta P_C = 1 + K_{2l}^2 + K_{0l}^2 \cdot (r_0 / r_1), \quad (1.4)$$

де  $\Delta P_{HC}$  – втрати потужності в мережі при несиметричному режимі;

$\Delta P_C$  – втрати потужності в мережі, які обумовлені протіканням струму прямої послідовності;

$K_{2I}$  – коефіцієнт несиметрії струмів зворотної послідовності;  
 $K_{0I}$  – коефіцієнт несиметрії струмів нульової послідовності;  
 $r_0, r_I$  – опори, відповідно, нульової та прямої послідовностей.

В окремому випадку, для трифазної чотири провідної лінії [29]:

$$K_P = I + K_{2I}^2 + K_{0I}^2 \cdot (1 + r_N / r_\phi), \quad (1.5)$$

де  $r_N, r_\phi$  – активні опори нульового та фазного провідів.

Таким чином, зменшити втрати електроенергії (потужності) в лінії електропередачі можна, зменшуючи величину струму, що протікає по них, або зменшуючи опори цих ліній.

Що стосується несиметрії напруги, то вона не робить істотного впливу на роботу трансформаторів і ліній електропередачі.

*Конденсаторні установки.* Неоднакова ємність конденсаторів трифазної батареї приводить до виникнення несиметрії напруги на її виході, що може викликати ще більшу несиметрію в електричній мережі. Окрім цього, при несиметрії напруги конденсаторні установки нерівномірно завантажуються реактивною потужністю по фазах, їх загальна реактивна потужність змінюється. Потужність втрат при цьому також розподіляється нерівномірно.

Проведений аналіз режимів роботи конденсаторних установок при несиметрії напруги [9, 31] показав, що нормальна експлуатація їх можлива за умови, якщо потужність втрат в кожній фазі не перевищує номінальної величини. Робоча потужність установки  $Q_{роб}$  зменшується в порівнянні з номінальною потужністю  $Q_n$  і визначається по формулі [31]:

$$Q_{роб} = Q_n (1 + k_U) \cdot \left( \frac{U_{роб}}{U_{max}} \right)^2, \quad (1.6)$$

де  $U_{max}$  – напруга найбільш завантаженої фази установки;

$U_{роб}$  – робоча напруга батареї конденсаторів;

$K_U$  – коефіцієнт несиметрії напруги.

Робоча потужність- це верхня межа реактивної потужності трифазної конденсаторної установки. Вона може бути збільшена за рахунок зменшення напруги найбільш завантаженої фази.

*Багатофазні випрямлячі.* Несиметрія напруги негативно впливає на роботу багатофазних випрямлячів. При симетричній нарузі в мостовій схемі струми та їх тривалість однакова на усіх «плечах» випрямляча. При несиметричній нарузі вони можуть значно відрізнятись. В результаті допустима потужність випрямляча знижується, оскільки частина випрямлячів виявляється недовантаженою.

Несиметрія напруги знижує також ефективність роботи 3, 6, 12 - фазних і інших систем випрямлення. При несиметрії напруги з'являються гармоніки (пульсації) подвійної частоти випрямленого за допомогою таких схем струму, амплітуда яких пропорційна коефіцієнту несиметрії напруги. Ці гармоніки, резонують в не розрахованих на їх появу згладжуючих фільтрах, перевантажують конденсатори і виводять їх з ладу.

Таким чином, проведений аналіз впливу несиметрії струмів навантаження на роботу різних електроприймачів показав необхідність проведення заходів по симетризованню режимів роботи мережі 0,4 кВ. Розробка цих заходів, безумовно, повинна базуватися на попередньому аналізі величини несиметрії напруги та струму цієї мережі.

### **1.3. Вплив несиметрії напруги на показники якості електроенергії**

Забезпечення якості електричної енергії на затискачах приймачів електроенергії і зниження її втрат при розподілі - одне з найбільш складних завдань, що вирішуються при проектуванні і експлуатації систем електропостачання.

У ДСТУ:EN 50160-2014 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення» [5] визначені параметри якості



електричної енергії для нормальних режимів експлуатації у точках приєднання споживачів.

Відповідно до ДСТУ [5], несиметрія трифазної системи напруги оцінюється двома основними показниками якості :

- коефіцієнтом несиметрії напруги по зворотній послідовності ,  $K_{2U}$  %;
- коефіцієнтом несиметрії напруги по нульовій послідовності  $K_{0U}$ , %.

Широке застосування різного роду однофазних установок великої потужності призводить до значного збільшення долі несиметричних навантажень, викликаючи тим самим несиметрію струмів (поява струмів нульової і зворотної послідовностей). При цьому відбувається зміщення нульової точки системи фазної напруги, обумовлюючи тим самим несиметрію напруги.

Коефіцієнти несиметрії напруги по зворотній і нульовій послідовності являються нормованими показниками якості електричної енергії, до ненормованих відносять коефіцієнти несиметрії струмів по зворотній і нульовій послідовностей.

Якість електричної енергії по коефіцієнтах несиметрії напруги зворотної і нульової послідовностей вважають такими, що відповідають вимогам діючого стандарту, якщо в 100% часі інтервалу (10 хвилин) в один тиждень ці показники не виходять за межі максимальних (гранично допустимих) значень, а в 95% цього інтервалу вони не перевищують нормальних значень.

Нормальне допустиме і гранично допустиме значення коефіцієнтів несиметрії напруги по зворотній і нульовій послідовності в точках загального приєднання до електричних мереж 0,4 кВ згідно ДСТУ рівні 2,0 і 4,0% відповідно.

Норми показників якості електроенергії (ПЯЕ), встановлені стандартом, є обов'язковими в усіх режимах роботи систем електропостачання загального призначення, окрім режимів, обумовлених непередбаченими обставинами.

Коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній (нульовий) послідовності характеризує трифазну систему напруги основної частоти по відхиленню

міжфазної (фазних) напруги від симетрії. При цьому враховується не лише нерівність діючих значень напруги в трьох фазах мережі, але також і відносне кутове зрушення фази між ними. Значення коефіцієнтів несиметрії напруги визначаються у відсотках по формулах:

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)i}}{U_{1(1)i}} \cdot 100\% ; \quad K_{0U} = \frac{U_{0(1)i}}{U_{1(1)i}} \cdot 100\% , \quad (1.7)$$

де  $U_{2(1)}$  і  $U_{0(1)}$  – відповідно напруга зворотної та нульової послідовності основної частоти три фазної системи напруги в  $i$  –му визначені;

$U_{1(1)}$  – напруга прямої послідовності основної частоти трифазної системи напруги в  $i$  –му визначені.

Коефіцієнти несиметрії струмів зворотної  $K_{2I}$  та  $K_{0I}$  нульової послідовностей визначаються аналогічно:

$$K_{2I} = \frac{I_{2(1)i}}{I_{1(1)i}} \cdot 100\% ; \quad K_{0I} = \frac{I_{0(1)i}}{I_{1(1)i}} \cdot 100\% , \quad (1.8)$$

де  $I_{2(1)}$  і  $I_{0(1)}$  – відповідно струм зворотної та нульової послідовності в  $i$  –му визначені;

$I_{1(1)}$  – струм прямої послідовності в  $i$  –му визначені.

Найбільш точне визначення значень  $U_{1(1)i}$ ,  $U_{2(1)i}$  і  $U_{0(1)i}$  можливо лише при використанні методу симетричних складових [29]. Згідно з цим методом, несиметрична трифазна система може бути представлена у вигляді трьох симетричних, таких, що утворюють пряму  $U_1$ , зворотну  $U_2$  і нульову  $U_0$  послідовностей.

В результаті досліджень встановлено, що кожному відсотку величини коефіцієнта несиметрії напруги відповідає 1,73% додаткового відхилення напруги. У свою чергу відхилення напруги також призводить до додаткових втрат потужності і скорочення терміну служби електроустаткування.

### Висновки по першому розділу

Сільські розподільні мережі напругою 0,4 кВ працюють в умовах значної несиметрії струмів і напруги, обумовлених нерівномірністю розподілу однофазних навантажень по фазах мережі і випадковим характером їх роботи, що призводить до значного погіршення показників якості і супутніх їм додаткових втрат електричної енергії.

Найбільші втрати напруги із-за несиметрії мають трифазні трансформатори у разі з'єднання обмоток за схемою "зірка - зірка - нуль", які можуть складати 15-20%, замість 4% при симетричному режимі.

## РОЗДІЛ 2

### АНАЛІЗ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ СПОСОБІВ І ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ НОРМАЛІЗАЦІЇ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ В СІЛЬСЬКИХ МЕРЕЖАХ 0,4 кВ

#### 2.1. Класифікація способів і технічних засобів зниження несиметрії струмів і напруг

Заходи по зниженню несиметрії напруги зводяться в основному до того, щоб коефіцієнти несиметрії по зворотній і нульовій послідовностям не перевищували допустимих меж.

Нині існує досить багато різних способів і технічних засобів, що знижують несиметрію струмів в трифазних чотири провідних мережах [1, 4, 22, 28,29, 30, 33,41 та ін.].

Необхідно відмітити, що не всяке зниження втрат, обумовлених несиметрією струмів, підвищує економічність роботи енергосистеми в цілому. Відомо [22], що понизити втрати можна і економічно недоцільними способами. В той же час, не кожне підвищення економічності роботи енергосистем супроводжується зниженням втрат в мережах.

Розглянемо способи і технічні засоби зниження несиметрії струмів, потужності, що дозволяють мінімізувати додаткові втрати, і підвищити якість електричної енергії в мережі 0,4 кВ.

Відповідно до виразу (1.5) усі способи і технічні засоби, призначені для зменшення коефіцієнта втрат потужності  $K_P$  можуть бути розділені на групи [39]:

1 група: технічні засоби, призначені для зменшення опору нульової послідовності  $R_0$  ;

2-а: технічні засоби, що зменшують коефіцієнт нульової послідовності струмів  $K_{0I}$  ;

3-я: технічні засоби, що знижують коефіцієнт зворотної послідовності струмів  $K_{2I}$  ;

4-а: комбіновані технічні засоби, призначені для зниження коефіцієнтів  $K_{01}$  і  $K_{21}$ .

Заходи по зниженню несиметрії струмів, що відповідають прийнятій класифікації, представлені на рисунку 2.1.

Розглянемо ці заходи детальніше в наступних розділах.

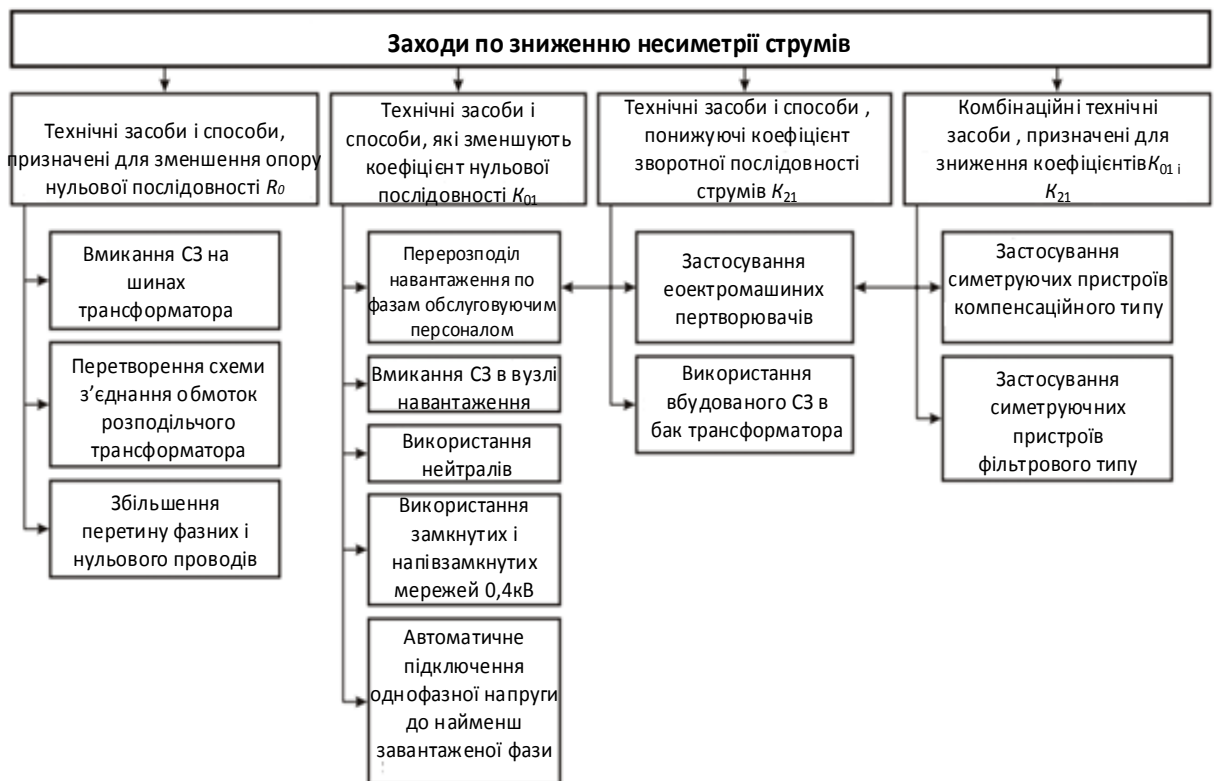


Рисунок 2.1.Класифікація технічних засобів і способів зниження несиметрії струмів

## 2.2. Способи зниження несиметрії струмів і напруг в мережах 0,4 кВ

Застосування замкнених і напівзамкнених схем мережі 0,4 кВ. Зниження несиметрії струмів за рахунок додаткового ефекту вирівнювання навантажень фаз може бути отримане при перекладі мережі 0,4 кВ в режимі напівзамкненої або замкнутої мережі [22]. У першому випадку замикається мережа, що

живиться від одного розподільного трансформатора, в другому - від декількох розподільних трансформаторів. Найбільш сприятливим відносно вирівнювання навантажень по фазах являється замикання ліній, що приєднуються до одного розподільного трансформатора. Напруга на клеммах трансформатора при цьому однаково за величиною і по фазі для усіх ліній. При цьому точки струмового розділу встановлюються між точками живлення для кожної з фаз лінії. Навантаження будуть тим більше вирівнюватися, чим більше буде число ліній мережі нижчої напруги, які замикаються.

Вирівнювання навантаження фаз в лініях, що замикаються, знижує несиметрію напруги уздовж ліній. Оскільки в кожних з ліній величини і фази симетричних складових струмів і напруги, що замикаються, є випадковими величинами, те математичне очікування напруги зворотної (нульовий) послідовності складає 33% від максимального в замкнутих лініях [27].

Замикання мережі сприятливо позначається на вирівнюванні навантажень фаз і перерозподілі симетричних навантажень між ділянками мережі. Таким чином, при замиканні мережі зменшуються втрати за рахунок розвантаження нульового і фазних проводів, підвищується якість напруги. Проте в цьому випадку необхідно враховувати, що в замкнутій мережі, що містить в собі декілька розподільних трансформаторів, неминуче протікатимуть зрівняльні струми, що створюють у свою чергу, додаткові втрати потужності і електричної енергії. Тому економічна ефективність цього способу зменшується зі збільшенням числа магістралей, що замикаються.

*Збільшення перерізу фазного і нульового дротів лінії 0,4 кВ.* Дослідженнями встановлено [29], що зменшення  $R_0$  мережі призводить до збільшення в ній струмів нульової і зворотної послідовностей, тобто призводить до збільшення коефіцієнтів  $K_{01}$  і  $K_{21}$ . Тому збільшення перерізу нульового дроту більше 0,75 перерізу фазного дроту не призводить до помітного зниження додаткових втрат потужності в сільських розподільних мережах. Крім того, відомо, що переріз фазних і нульового дротів вибираються по економічних навантаженнях, які відповідають мінімуму приведених

витрат. Перехід на наступний номінал перерізу дроту вимагає додаткових капітальних витрат, які складають 6% від вартості мережі 0,4 кВ. Це призводить до невиправданого дорожчання мережі 0,4 кВ

*Зміна схеми з'єднання обмоток трансформатора.* Цей спосіб може бути реалізований заміною в сільських мережах 0,4 кВ трансформаторів з схемою з'єднання обмоток "зірка-зірка з нулем" на трансформатор з схемою з'єднання "зірка-зигзаг з нулем" [29, 31].

Опори прямої послідовності трансформаторів для усіх схем з'єднання обмоток визначаються як:

$$R_1 = \frac{P_{кз}}{3I_n^2} ; X_1 = \sqrt{Z^2 - R_1^2} ; Z = \frac{U_k \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n} . \quad (2.1)$$

Тоді можна сказати, що опори залежать від  $P_{кз}$  і  $U_k$ , проте якщо звернутися до каталогів, то можна переконатися, що ці величини майже не змінюються від схем з'єднання, а значить і опір прямої послідовності від них не залежить.

На відміну від опорів прямої послідовності значення опорів нульової послідовності відрізняються один від одного залежно від схеми з'єднання обмоток.

Найбільш поширеними нині згідно ДСТУ 2105-92 являються трансформатори із з'єднанням обмоток за схемою "зірка-зірка з нулем". Це обумовлено тим, що вони мають простіше конструктивне виконання і менші розміри, а отже і меншу вартість, в порівнянні з трансформаторами з іншою схемою з'єднання обмоток. Проте ці трансформатори мають великий опір струмам нульової послідовності. Активний опір масляних трансформаторів збільшений в порівнянні з опором обмоток постійному струму із-за втрат в магнітопроводі, баку і різних конструктивних деталях виймальної частини.

Значне збільшення опору нульової послідовності пов'язане з тим, що магнітне поле, що створюється струмами нульової послідовності має дуже складну конфігурацію. Воно замикається не лише в межах магнітопроводу, але і через бак трансформатора. У ряді випадків ця несиметрія складає 50% [46] несиметрії у кінці магістральних ліній. Розрахунками встановлено, що втрата

напруги в таких трансформаторах при несиметричному режимі може доходити до 25...20% замість 4% в симетричному режимі, а кожному значенню (у відсотках) несиметрії напрузі відповідає 1,73% додаткового відхилення напруги [41]. Тому часто потужність таких трансформаторів визначається не потужністю живленого навантаження, а мінімально необхідним струмом короткого замикання.

Теоретичні і експериментальні дослідження показали, що в сільських мережах 0,4 кВ з наявним рівнем несиметрії навантажень неможливо забезпечити зниження втрат електроенергії заміною трансформаторів з схемою "зірка-зірка з нулем" або іншими трансформаторами з малим опором нульової послідовності  $Z_0$  з наступних причин:

- застосування в мережах 0,4 кВ трансформаторів з малим опором нульовий послідовності приводить, в порівнянні з трансформатор з схема "зірка-зірка з нуль", до збільшення в лінії і трансформаторі струму нульової і зворотної послідовності, що призводить до збільшення коефіцієнт  $K_p$ , так же само як і при компенсації;

- еквівалентний опір нульової послідовності мережі з трансформаторами, що мають мале  $Z_0$ , визначаються в основному опором лінії, який на порядок вищий за опір таких трансформаторів;

- у зв'язку зі збільшенням струмів зворотної послідовності в мережі з трансформаторами, що мають мале  $Z_0$ , у вузлах навантаження зростає напруга зворотної послідовності, що негативно впливає на роботу трифазних асинхронних електродвигунів. Тому застосування таких трансформаторів в мережах зі змішаним навантаженням не рекомендується [29].

Проте трансформатори з малим опором нульової послідовності з схемою "зірка-зигзаг з нулем" і деякі інші дозволяють істотно понизити у вузлах навантаження напруга нульової послідовності. У зв'язку з цим, їх застосування доцільне в сільських мережах 0,4 кВ з комунально-побутовим навантаженням для підвищення якості електричної енергії [29].



### 2.3. Технічні засоби зниження несиметрії напруги в сільських мережах 0,4 кВ

*Автоматичне підключення однофазного навантаження до найменш завантаженої фази.* Реалізація цього способу здійснюється шляхом застосування спеціальних симетруючих пристроїв (СП), що включаються в мережі 0,4 кВ [6,7,10,11,12]. За допомогою цих симетруючих пристроїв досягається більш рівномірний розподіл по фазах однофазних навантажень мережі. Це, у свою чергу, призводить до зменшення струму нульової послідовності і додаткових втрат в мережі 0,4 кВ. Проте застосування цього способу в сільських мережах ускладнюється тим, що досить важко підібрати пристрій однофазного автоматичного перемикачання навантаження відповідної потужності. Тому не можливо істотно зменшити несиметрію навантажень і, крім того, при використанні СП цього типу відбувається зниження надійності електропостачання однофазного навантаження.

Слід відмітити, що вимірювальний і комутаційний комплекс цих пристроїв представляється досить складним.

Прикладом найбільш простого пристрою [7] є примітивний трансформатор з пофазним регулюванням, схема якого приведена на рисунку 3.2.

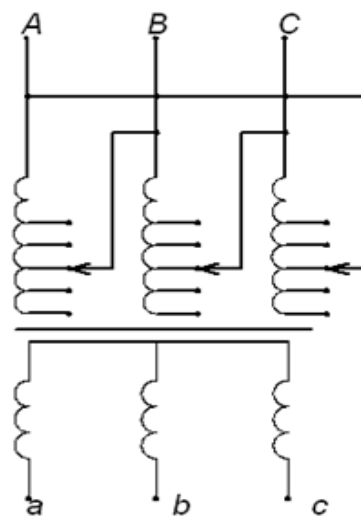


Рисунок 3.2 .Схема з'єднання трансформатора з пофазним регулюванням

Якщо до трансформатора підведена симетрична напруга, то зрушення між фазами складає 120 градусів, при рівних коефіцієнтах трансформації і вторинна система напруги також є симетричною. Якщо ж в якій-небудь фазі змінити коефіцієнт трансформації, то це приведе до зміни фазної напруги на вторинній обмотці трансформатора і, як наслідок, це приведе до перекручення системи лінійної напруги. За допомогою цього можна досягати симетрування мережі. Векторна діаграма такого трансформатора представлена на рисунку 3.3.

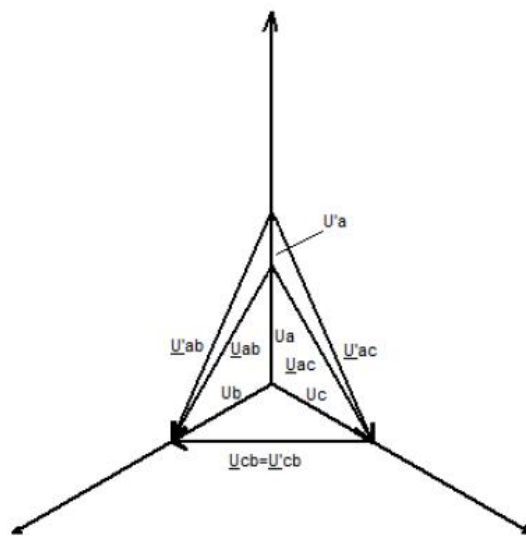


Рисунок 3.3. Векторна діаграма трансформатора с пофазовим регулюванням нпруги

*Застосування СП, вбудованого у бак трансформатора з схемою з'єднання обмоток  $Y/Y_0$ . Найбільш поширеним в мережах 0,4/10 кВ являється трансформатор, що має схему з'єднання "зірка-зірка з нулем", оскільки вони дешеві у виготовленні [8].*

Проте вони зовсім неекономічні при несиметрії навантажень. У обмотці, сполученій в зірку без нульової точки, протікання струмів нульової послідовності не має місця, тому в режимі несиметрії струми цієї послідовності протікають у вторинній обмотці. Згідно з малюнком 3.4 магнітних потоків нульової послідовності замикаються через бак

трансформатора виходячи за межі сердечників, що погіршує охолодження і визначає значний опір нульової послідовності, тобто:  $R_0 \gg R_1$  і  $X_0 \gg X_1$ .

Для усунення несиметрії в трансформаторах з такою схемою з'єднання застосовується вбудований симетруючий пристрій [8], який є обмоткою, накладеною у вигляді бандажа поверх обмоток ВН трансформатора (рис. 3.5). Ці витки сполучені з нейтраллю обмоток нижчої напруги так, щоб магнітні потоки  $\Phi'_0$ , створюваних ними в магнітному ланцюзі трансформатора струмом нульового проводу, були спрямовані зустрічно потокам нульової послідовності  $\Phi_0$ , які створюються струмами робочих обмоток. При рівності магніторушійних сил нульової послідовності робочих обмоток і компенсуючих витків сумарний потік  $\sum \Phi = \Phi_0 + \Phi'_0 = 0$ . Отже, за вказаних умов, опір нульової послідовності  $Z_0$  також можна прийняти рівним нулю. Тоді  $U_0 = I_0 \cdot Z_0 \approx 0$ , тобто спотворення системи фазної напруги на виведеннях трансформатора з нерівномірним навантаженням по фазах практично ліквідується.

Обмотка СП розрахована на навантаження рівну повній номінальній однофазній, тобто на протікання по ній номінального струму.

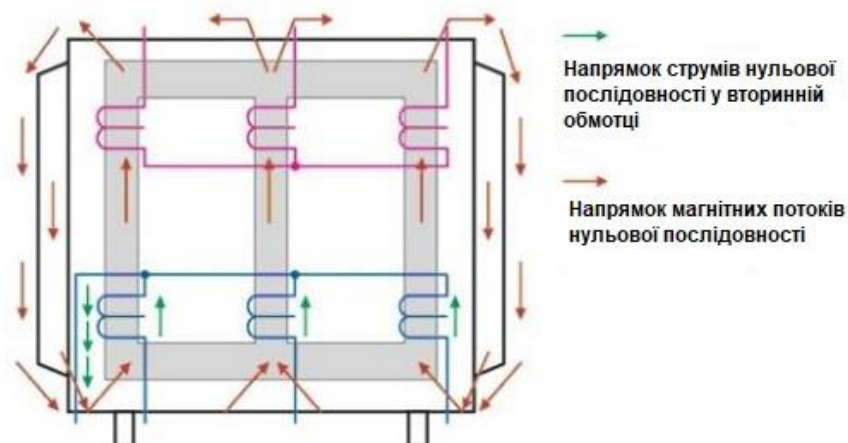


Рисунок 3.4. Напрямок "нульових" струмів і магнітних потоків при схемі з'єднання  $Y/Y_n$

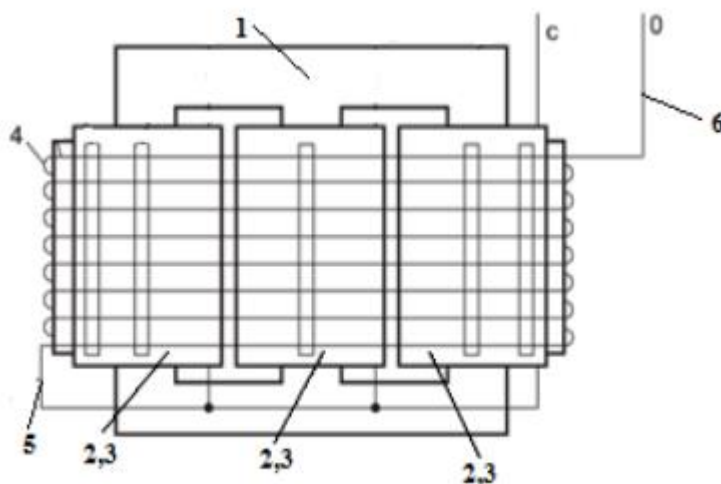


Рисунок 3.5. Трифазний трансформатор з симетруючим пристроєм

На рисунках 3.5; 3.6 зображено: 1 – три стрижневий магнітопровід; 2,3 - обмотки ВН і НН; 4 - компенсаційна обмотка; 5 - кінець компенсаційної обмотки, що підключається до нейтралі; 6 - кінець компенсаційної обмотки, що виводиться.

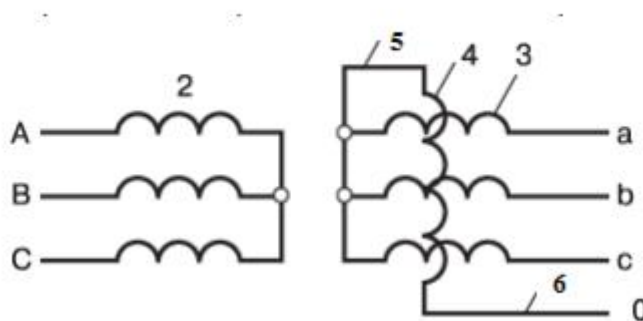


Рисунок 3.6. Схема з'єднання трансформатора  $Y/Y_n$  з обмоткою симетруючого пристрою

Встановлено, що при використанні цих СП компенсуються струми нульової послідовності, при цьому знижуються втрати напруги і енергії в електричній мережі, а також значно покращується форма кривої напруги за наявності в мережі нелінійних навантажень, що украй важливо при живленні багатьох чутливих до цього приладів.

Разом з цим використання цього способу найбільш ефективно для підвищення якості електричної енергії, оскільки відбувається мінімізація коефіцієнтів нульовою і зворотною послідовностей напруги.

*Використання симетруючих пристроїв для компенсації струмів зворотної послідовності.* Цей спосіб симетрування обумовлений застосуванням симетруючих пристроїв, що впливають тільки на струми зворотної послідовності, тобто що знижують коефіцієнт  $K_{2I}$  у виразі 1.5.

Принцип роботи таких пристроїв ґрунтується на тому, що пульсуючі потужності, що створюються індуктивно-ємнісними елементами, співпадають по фазі і компенсують пульсуючу потужність однофазного навантаження.

Розглянемо деякі схеми цих СП.

Симетруючий пристрій [13] зображений на рис.3.7 містить індуктивний елемент 1 з двома магнітозв'язаними обмотками 2 і 3, виведення яких під'єднуються до двох фаз. Загальна точка обмоток через конденсатор 6 під'єднується до третьої фази. Індуктивний елемент додатково забезпечений двома обмотками 4 і 5, кожна з яких включена послідовно з вказаними магнітосвязаними обмотками 2 і 3.

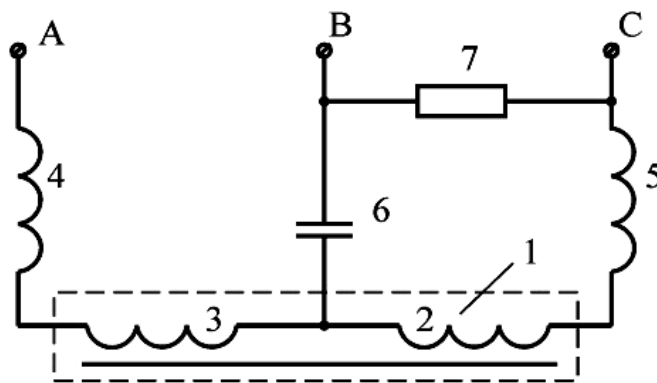


Рисунок 3.7. Симетруючий пристрій фільтруючого типу

Умовою симетрування є наступний вираз:

$$S_n = \sum Q_L + Q_C$$

де  $Q_C$  – потужність конденсаторної батареї;

$\sum Q_L$  - сумарна потужність елементів пристрою;

$S_H$  – потужність навантаження.

Використання цього пристрою дозволяє отримати високий  $\cos\varphi$  на вході мережі симетрування. Недоліком цього пристрою є недостатня ефективність фільтрації.

Цей недолік усувається в пристрої [14] зображеному на рис. 3.8, завдяки використанню додаткового конденсатора, створюються додаткові фільтрові ланки, збільшуючи ефективність фільтрації вищих гармонійних складових в трифазній лінійній напрузі мережі.

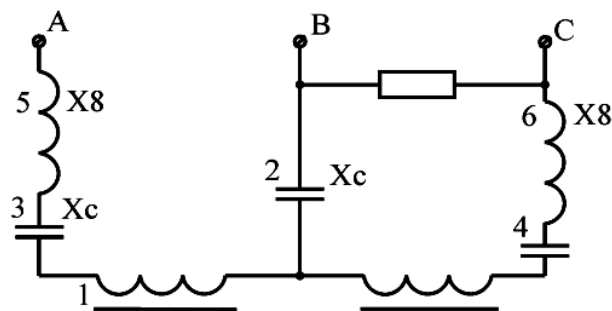


Рисунок 3.8. Симетруючий пристрій фільтруючого типу

*Застосування комбінованих симетруючих пристроїв.* До цих пристроїв відносяться пристрої що дозволяють компенсувати струми зворотною і нульовою послідовностей [16,17,18]. Симетруючі пристрої цього типу можуть знижувати струми зворотною і нульовою послідовностей мережі, відрізняючись один від одного, або встановленою потужністю, або функціональними можливостями. Розглянемо одно з таких пристроїв зображений на рис. 3.9.

З метою зниження встановленої потужності і розширення діапазону симетрування введений трансформатор, первинна обмотка якого підключена до двох фаз мережі, середнє виведення вторинної регульованої обмотки підключене до третьої фази. Виводи конденсатора 1 і дроселя 2 підключені до

різних виходів вторинної обмотки трансформатора, а другі їх затискачі сполучені один з одним і приєднані до нульового проводу.

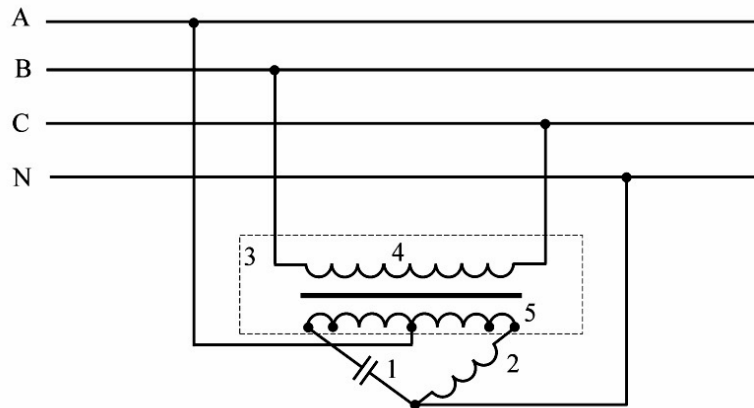


Рисунок 3.9. Комбінований симетруючий пристрій

Компенсація струмів нульовій послідовності забезпечується при компенсації струму навантаження струмом симетруючого пристрою, який дорівнює векторній сумі струмів реактивних елементів. При практично можливому діапазоні зміни фазового кута навантаження  $-\frac{\pi}{2} \leq \varphi_n \leq \frac{\pi}{2}$ , діапазони зміни фаз напруги на конденсаторі і дроселі наступні:  $0 \leq \psi_k \leq 90^\circ$ ;  $270^\circ \leq \psi_{op} \leq 360^\circ$ . Отже, цей пристрій забезпечує симетрування в досить широкому діапазоні фазових кутів навантаження.

*Застосування симетруючих пристроїв фільтрового типу.* До цього виду схем можна віднести так звані, шунто-симетруючі пристрої (ШСП) [16,19,22,23], характерною особливістю яких є те, що вони мають мінімально можливий опір струму нульової послідовності. Завдяки цьому велика частина струмів нульової послідовності мережі 0.4 кВ замикається на ділянці, де ШСП підключається до мережі і самим пристроєм. Іншими словами, ці пристрої як би замикають на себе (шунтують) струми нульової послідовності і майже не пропускають їх на інші ділянки лінії 0,4 кВ. Крім того, шунтосимметрирующие пристрої дозволяють здійснювати широкосмугову

фільтрацію струмів вищих гармонік прямої, зворотної і нульової послідовностей.

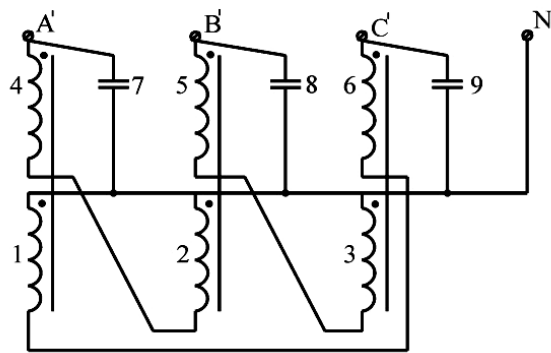


Рисунок 3.10. ШСП електромагнітного типу

На рисунку 3.10 зображено ШСП електромагнітного типу [35]. Цей пристрій містить трифазний електромагнітний апарат, обмотки якого сполучені за схемою зустрічний зигзаг, що має три фазні виведення і один нейтральний, причому кожне фазне виведення призначене для підключення до фазних дротів мережі, а нейтральний до нульового дроту, а також воно забезпечене трьома конденсаторними батареями, для підвищення якості електричної енергії.

У даному пристрої симетрування фазної напруги мережі забезпечується за рахунок наявності трифазного електромагнітного апарату, обмотки якого сполучені за схемою зустрічний зигзаг.

### Висновки по другому розділу

Нормалізація якості і енергетичних втрат в сільських мережах 0,4 кВ при несиметричному навантаженні може бути досягнута застосуванням різних способів і технічних засобів, що дозволяють зменшити струм нульової послідовності мережі.

Найбільш ефективним технічним засобом зниження несиметрії струмів є застосування спеціальних СП, що мають мінімально можливий опір струмам нульової послідовності, зокрема шунтосиметруючі пристрій на індуктивно-ємнісних елементах з автоматичним регулюванням потужності для



електричних мереж, що містять змішане навантаження і для електричних мереж, що містять тільки комунально-побутове навантаження, - на основі електромагнітного пристрою також з автоматичним управлінням його робота.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В результаті виконання роботи було визначено, що в мережі низької напруги може виникати як невідповідна несиметрія, так і імовірнісна. Перша викликана великою кількістю нераціонально розподілених несиметричних навантажень, друга - нелінійних навантажень. В цілому цими навантаженнями можуть виступати комунально-побутові навантаження, а також устаткування на підприємствах, симетричне виконання яких неможливе або економічно недоцільно.

Також було виявлено, що несиметрія негативно впливає на роботу асинхронних двигунів, трансформаторів, конденсаторних батарей, випрямлячів і лінії електропередачі. Цей вплив зводиться до додаткових нагрівів і зменшення продуктивності, що є причиною зменшення ефективності роботи і скорочення терміну експлуатації устаткування.

Розглянувши причини виникнення і вплив несиметрії був проведений аналіз методів її компенсації при якому було виявлено, що для усунення невідповідної симетрії досить раціонального розподілу навантажень на стадії проектування. Для усунення імовірнісної складової несиметрії доцільним можна рахувати використання трансформаторів, що мають схему з'єднання "зірка-зигзаг з нулем", але оскільки велика частина використовуваних трансформаторів має схему з'єднання "зірка-зірка з нулем", то в даному випадку необхідно передбачити установку СП в нульовому проводі.

Разом з тим так само ефективно застосувати шунто-симетруючі пристрої з малим опором струмам нульової послідовності, проте їх використання при динамічному навантаженні зв'язана з додатковими втратами в самому пристрої.

## ВИКОРИСТАНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ДЖЕРЕЛА

1. Бибко, И.А. Снижение потерь электрической энергии в сельском хозяйстве / И.А. Бибко, С.Я. Меженных, В.Г. Стафийчук, В.Ю. Юрчук. – Киев: Урожай, 1981. – 120 с.
2. Бородин, И.Ф. Мероприятия по управлению качеством электроэнергии в системах электроснабжения сельского хозяйства / И.Ф. Бородин, А.В. Виноградов, А.В. Шпаков // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: тр. международ. науч.-практ. конф. – М.: ВИЭСХ, 2008. – Т. 1. – С. 200-205.
3. Бородин, И.Ф. Основные направления сбережения электрической энергии в сельском хозяйстве / И.Ф. Бородин // Энергосбережение в сельском хозяйстве. – М.: ВИЭСХ. – 2000. – Ч.1.
4. Бородин, И.Ф. Потери электроэнергии в сельских сетях и пути их снижения / И.Ф. Бородин, А.П. Сердешнов. // Техника в сельском хозяйстве. – 2002. – №1. – С. 23-26.
5. ДСТУ:EN 50160-2014 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення»//Електронний ресурс <http://www.loe.ant.lviv.ua/home/dokumenty/akist-elektroenergiie>
6. Будзко, И.А. Электроснабжение сельского хозяйства / И.А. Будзко, Т.Б. Лещинская, В.Н. Сукманов. – М.: Колос, 2000. – 560 с.
7. А.С. №1026234 СССР. Устройство для автоматического переключения однофазных нагрузок в низковольтных распределительных сетях / А.К. Шидловский, В.А. Невский, Г.А. Москаленко. – Оpubл. в Б.И., 1983. – № 24.
8. А.С. №1506487 СССР. Симметрирующий трансформатор / А.И. Арбузов. – Оpubл. в Б.И., 1989. – № 29.
9. Висящев, А.Н. Качество электрической энергии и электромагнитная совместимость в электрических системах: учебное пособие / А.Н. Висящев. – Иркутск, 1997. – 187 с.

10. Воротницкий, В.Э. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем / В.Э. Воротницкий, Ю.С. Железко, В.Н. Казанцев и др.; под ред. В.Н. Казанцева. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 368 с.
11. Ганелин, А.М. Экономия электроэнергии в сельском хозяйстве / А.М. Ганелин. – М.: Колос, 1983. – 141 с.
12. Горюнов, И.Т. Проблемы обеспечения качества электрической энергии / И.Т. Горюнов, В.С. Мозгалев, В.А. Богданов // Электрические станции. – 2001. – №1. – С. 16-20.
13. Скороходов, В.А. Методы и технические средства повышения качества электроэнергии и компенсации / В.А. Скороходов. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 152 с.
14. А.С. №955361 СССР. Устройство для симметрирования режима трехфазной сети / Н.А. Мельник, Д.Б. Налбандян. – Оpubл. в Б.И., 1982. – № 32.
15. А.С. №862313 СССР. Симметрирующее устройство для трехфазной четырехпроводной электрической сети / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов, И.В. Мостовяк, А.В. Самков. – Оpubл. в Б.И., 1981. – № 33.
16. А.С. №961043 СССР. Устройство для симметрирования трехфазных сетей / М.Я. Минц, В.Н. Чинков, О.Г. Гриб, В.Н. Анохин. – Оpubл. в Б.И., 1982. – № 35.
17. А.С. №801187 СССР. Устройства для симметрирования токов в трехфазной сети с нулевым проводом / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов, И.В. Мостовяк, А.В. Самков. – Оpubл. в Б.И., 1981. – № 4.
18. А.С. №801187 СССР. Устройства для симметрирования токов в трехфазной сети с нулевым проводом / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов, И.В. Мостовяк, А.В. Самков. – Оpubл. в Б.И., 1981. – № 4.
19. А.С. №961042 СССР. Устройство для симметрирования токов в четырехпроводных сетях / А.К. Шидловский, А.Д. Музыченко, О.Г. Денисенко, А.П. Трофименко. – Оpubл. в Б.И., 1982. – № 35.

20. Железко, Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.

21. Коваленко, П.В. Анализ потерь мощности при несимметрии токов в сетях и электроприемниках с изолированной нейтралью / П.В. Коваленко // Известия вузов. Электромеханика. – 2008. – №4. – С. 61-63.

22. А.С. №980211 СССР. Фальтросимметрирующее устройство / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов, И.В. Мостовяк, Г.А. Москаленко, В.Б. Данилюк. – Оpubл. в Б.И., 1982. – № 45

23. Zhelezko, Yu.S. Power in electrical networks depending on weather conditions / Yu.S. Zhelezko, V.A. Kostyushko, S.V. Krylov, E.P. Nikiforov, O.V. Savchenko, L.V. Timashova, E.A. Solomonik // Power Technology and Engineering. – 2005. – Т. 39. – №1. – С. 51-56.

24. А.С. №1023524 СССР. Устройство для регулирования и симметрирования напряжений в трехфазной сети с нулевым проводом / А.И. Игнаткин, В.А. Новский. – Оpubл. в Б.И., 1983. – №22.

25. Железко, Ю.С. Расчет, анализ и нормирование потерь в электрических сетях: руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко, А.В. Артемьев, О.В. Савченко. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. – 280 с.

26. Коваленко, П.В. Основные показатели несимметрии напряжений в электрических сетях / П.В. Коваленко // Известия вузов. Электромеханика. – 2008. – №3. – С. 62-65.

27. Наумов, И.В. Симметрирующее устройство для трехфазной четырехпроводной сети с регулируемыми параметрами / И.В. Наумов, Д.А. Иванов // Вестник КрасГАУ. – 2007. – №4. – С. 191-194.

28. Косоухов, Ф.Д. Методика расчета потерь электроэнергии в сельских сетях 0,38 кВ при распределенной несимметричной нагрузке / Ф.Д. Косоухов, А.Г. Гущинский, М.В. Коломыщев // Известия СПбГАУ. – 2012. – №27. – С. 312-320.

29. Косоухов, Ф.Д. Несимметрия напряжений и токов в сельских распределительных сетях: монография / Ф.Д. Косоухов, И.В. Наумов. – Иркутск, 2003. – 257 с.
30. Кулагин, С.А. Способы и средства повышения качества электрической энергии в сельских распределительных сетях 0,38 кВ при несимметричной нагрузке: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / Кулагин С.А. – Л.: ЛСХИ, 1990. – 190 с.
31. Левин, М.С. Качество электрической энергии сельских районов / М.С. Левин, А.Е. Мурадян, Н.Н. Сырых. – М.: Энергия, 1975. – 224 с.
32. Лещинская, Т.Б. Электроснабжение сельского хозяйства: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 110302 «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства» / Т.Б. Лещинская, И.В. Наумов. – М.: КолосС, 2008. – 655 с.
33. Лукина, Г.В. Применение электрической энергии в сельском хозяйстве: учеб. пособие / Г.В. Лукина, М.Ю. Бузунова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Иркутск: ИрГСХА, 2001. – 210 с.
34. Майер, В.Я. Исследование влияния симметричного и несимметричного отклонения напряжения на эксплуатационные характеристики асинхронного двигателя / В.Я.Майер // Промышленная энергетика. – 1993. – № 9. – С. 30-34.
35. А.С. №1205523 СССР. Устройство для симметрирования токов и напряжений в электрических сетях / В.И. Федулов, А.Х. Хамидов, Н.Г. Ганихаджаев, Д.О. Османов, В.Г. Васильев. – Оpubл. в Б.И., 1986. – № 2.
36. Наумов, И.В. Качество электрической энергии и снижение дополнительных потерь мощности в электрических сетях / И.В. Наумов, С.В. Подъячих, Д.А. Иванов // Вестник ИрГСХА. – 2009. – №37. – С. 83-88.
37. Наумов, И.В. Методика расчета показателей несимметрии токов и напряжений в сети 0,38 кВ с симметрирующим устройством / И.В. Наумов, Г.В. Лукина, С.В. Сукьясов, С.В. Подъячих // Ползуновский вестник. – 2001. – № 2. – С. 49-56.

38. Наумов, И.В. Несимметрия токов как причина дополнительных потерь мощности и снижения качества электрической энергии в сельской распределительной сети 0,38 кВ / И.В. Наумов, Г.В. Лукина, С.В. Сукьясов, С.В. Подъячих // Ползуновский вестник. – 2001. – № 2. – С. 35-38.

39. Наумов, И.В. Оптимизация несимметричных режимов системы сельского электроснабжения / И.В. Наумов. – Иркутск: Изд-во «На Чехова», 2001. – 217 с.

40. Наумов И.В. Организационно - технические мероприятия в сельских распределительных сетях напряжением 0,38 кВ / И.В. Наумов, Г.В. Лукина, С.В. Сукьясов, С.В. Подъячих // Электротехника. – 2002. – № 3. – С. 56-57.

41. Косоухов, Ф.Д. Зависимость потерь мощности от несимметрии токов в силовых трансформаторах от их сопротивления нулевой последовательности /Ф.Д. Косоухов, Н.В. Васильев, Н.Ю. Криштопа // Известия СПбГАУ. – 2014. – №35. – С. 319-325.