**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації

виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота

на правах рукопису

Борисевич Володимир Вікторович

**УДК 620.93**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

Обґрунтування схеми та аналіз роботи регулюємого симетруючого пристрою для сільськогосподарських мереж 0,4 кВ

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

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

**Савченко Л.Г.**

к.і.н., доцент

**Житомир – 2023**

**АНОТАЦІЯ**

**Борисевич Володимир Вікторович. Обґрунтування схеми та аналіз роботи регулюємого симетруючого пристрою для сільськогосподарських мереж 0,4 кВ.** – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”. – Поліський національний університет, Житомир, 2022.

В магістерській роботі розроблено новий спосіб регульованого симетрування струмів і напруг та алгоритм його реалізації. Виконано математичне моделювання роботи електричної мережі 0,4 кВ з регульованим симетруванням і розроблено комп'ютерну програму, що дає змогу визначити втрати електричної енергії в мережі 0,4 кВ у разі використання симетруючого пристрою. Обґрунтовано, що застосування регульованого симетрування дає змогу скоротити втрати електроенергії на 20% і більше і забезпечити підтримання показників якості електроенергії в нормованих межах.

Розроблено новий регульований симетруючий пристрій, що реалізує авторський спосіб і алгоритм регулювання кількості ступенів, що підключаються, який забезпечує зниження втрат електричної енергії, обумовлених несиметричними режимами в електричній мережі 0,4 кВ, порівняно з нерегульованими симетруючими пристроями на 15%.

Виконане експериментальне дослідження показало застосовність розробленого способу регульованого симетрування струмів і напруг, а також працездатність виготовленого експериментального зразка регульованого симетруючого пристрою. Коефіцієнт втрат електроенергії Кр в умовах лабораторного експерименту знизився на 10,6 % при використанні регульованого симетруючого пристрою.

*Ключові слова: струм,напруга, симетрія, енергія, пристрій, втрати.*

**ANNOTATION**

**Borysevych Volodymyr Viktorovych.** Scheme justification and operation analysis of an adjustable symmetrical device for 0.4 kV agricultural networks. – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualification work for a master's degree in the specialty 141 "Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics". - Polissya National University, Zhytomyr, 2022.

In the master's thesis, a new method of regulated symmetry of currents and voltages and an algorithm for its implementation were developed. The mathematical modelling of the 0.4 kV electrical network with regulated symmetry was performed and a computer program was developed to determine the losses of electrical energy in the 0.4 kV network when using a symmetry device. It has been theoretically substantiated that the use of controlled symmetry can reduce power losses by 20% or more and ensure that power quality indicators are maintained within the normalised limits.

A new adjustable symmetry device has been developed, which implements the author's method and algorithm for regulating the number of connected stages, which ensures a 15% reduction in electricity losses caused by asymmetric modes in a 0.4 kV electrical network compared to unregulated symmetry devices.

The experimental study has shown the applicability of the developed method of regulated symmetry of currents and voltages, as well as the performance of the manufactured experimental sample of the regulated symmetry device. The power loss factor Kr in the laboratory experiment decreased by 10.6 % when using the adjustable symmetry device.

*Keywords: current, voltage, symmetry, energy, device, losses.*

**ЗМІСТ**

ВСТУП………………………………………………………………………..………5

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРИЧИН ВИНИКНЕННЯ НЕСИМЕТРІЇ СТРУМІВ І НАПРУГ У СІЛЬСЬКИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ 0,4 КВ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ЯКІСТЬ І ВТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ…………………...….…...………….8

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА СПОСОБУ РЕГУЛЬОВАНОГО СИМЕТРУВАННЯ СТРУМІВ І НАПРУГ У СІЛЬСЬКІЙ ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ 0,4 КВ……...18

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РЕГУЛЬОВАНОГО СИМЕТРУЮЧОГО ПРИСТРОЮ………32

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ……………………………………….…………………..54

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……………………...…………………..55

**ВСТУП**

**Актуальність теми.** Сучасні сільські електричні мережі (СЕМ) повинні забезпечувати надійне електропостачання сільських споживачів і високу якість електроенергії, що постачається їм. Водночас середня довжина по магістралі

сільських ліній електропередачі 0,4 кВ становить понад 750 метрів, середня частка ліній, виконаних самоутримними ізольованими проводами (СІП) у середньому по електромережевих підприємствах, які забезпечують електропостачання центральних регіонів і області, становить приблизно 25-30%, частка ліній із терміном знаходження в експлуатації понад 25 років - понад 60%. Це призводить до того, що втрати електроенергії під час її передачі на рівні напруги 0,4 кВ становлять до 20% за нормованих - до 10%. Високі втрати впливають на зростання вартості електроенергії і, як наслідок, на підвищення собівартості сільгосппродукції, що значно знижує конкурентоспроможність вітчизняних аграрних виробників. Одним із джерел додаткових втрат у сільських електричних мережах є несиметрія струмів і напруг у мережі та на затискачах електроприймачів. Середнє значення коефіцієнта додаткових втрат (*Кр*), на прикладі окремих сільських електричних мереж Житомирської області, становить 1,845. Середнє значення коефіцієнта несиметрії напруг за нульовою послідовністю виходить за межу 2 %, встановлену ДСТУ 32144-2013 при комунально-побутовому навантаженні у 80 %, а за межу 4 % - у 29 % часу. Одним із засобів зниження рівня несиметрії є застосування ємнісно-індуктивних симетруючих пристроїв (СП), що дають змогу нормалізувати показники якості електричної енергії за рахунок зниження несиметрії та зниження втрат електричної енергії на 10-20%. При цьому наявні симетризуючі пристрої цього типу мають низку недоліків: значне власне споживання електроенергії, особливо в разі застосування нерегульованих компенсуючих пристроїв (таких випадків більшість); обмежена ресурсом котушки магнітного пускача кількість перемикань ступенів СП; наявність у конструкції деяких пристроїв нелінійних елементів, які вносять істотне спотворення у форму кривої струму ; відносно висока вартість. Сучасна перетворювальна техніка дає змогу створювати нові симетризувальні пристрої, які мають достатню швидкодію для симетрування змінного несиметричного навантаження різного характеру (активно-індуктивне, активно-ємнісне) і багато в чому позбавлені зазначених недоліків. Тому тема розроблення регульованого симетруючого пристрою (РСП) для сільських електричних мереж 0,4 кВ є актуальною.

**Мета роботи** є зниження несиметрії струмів (напруг) і втрат електричної енергії в сільських електричних мережах 0,4 кВ завдяки розробленню регульованого симетруючого пристрою.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

Виконати аналіз несиметрії струмів (напруг) і втрат електричної енергії в сільських електричних мережах 0,4 кВ, існуючих способів і засобів їх зниження.

Розробити новий регульований симетризуючий пристрій, виконати його імітаційне моделювання та обґрунтувати параметри.

Виконати дослідження експериментального зразка регульованого симетруючого пристрою.

**Об'єкт дослідження**: сільські електричні мережі 0,4 кВ.

**Предмет дослідження**: несиметрія струмів (напруг) і втрати електроенергії в сільських електричних мережах 0,4 кВ у разі використання регульованих симетруючих пристроїв.

**Методологія та методи дослідження.** Для досліджень використовувалися методи теорії електротехніки, теорії лінійних кіл, методи інженерного експерименту. Математичне моделювання проводили із застосуванням сучасних методів і комп'ютерних програмних продуктів, зокрема, інтегрованих пакетів MathCad і MATLAB, лабораторні дослідження проводили на експериментальній установці, що містить трифазний автотрансформатор, модель лінії електропередачі, несиметричне навантаження, симетруючий пристрій, щит керування, блок керування на базі Arduino.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Савчекно Л.Г., **Борисевич В.В.** Аналіз наявних способів зниження несиметрії струмів і напруг, втрат електричної енергії в електричних мережах 0,4 кв. *Проблеми сучасної енергетики і автоматикив системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта): Матеріали наук.-техн конф.* м. Київ 19 жовтня 2023р. С. 31-32.

2. **Борисевич В.В.** Розроблення способу регульованого симетрування струмів і напруг у сільській електричній мережі 0,4 кВ.*Студентські читання–2023: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики.* 25 жовтня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 62-65.

3. Савчекно Л., **Борисевич В.** Розроблення схеми симетруючого пристрою для електричної мережі 0,4 кВ. Матеріали XІV Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки». Кропивницький: ЦНТУ. 2023.С. 409-410.

**Практичне значення одержаних результатів.** Застосування регульованого симетруючого пристрою дасть змогу значною мірою знизити несиметрію і втрати електричної енергії в сільських електричних мережах 0,4 кВ.

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 19 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 57 сторінок комп’ютерного тексту, містить 34 рисунки і 7 таблиць.

**РОЗДІЛ 1**

**АНАЛІЗ ПРИЧИН ВИНИКНЕННЯ НЕСИМЕТРІЇ СТРУМІВ І НАПРУГ У СІЛЬСЬКИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ 0,4 КВ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ЯКІСТЬ І ВТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

За останні роки відбулося значне збільшення встановленої потужності електрообладнання сільськогосподарських підприємств, а також у побуті сільських жителів. За чисельністю та складом електроустановок, вимогами до надійності їхнього електропостачання та 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 та інших виробничих і побутових електроустановок.

Симетрична трифазна система напруг являє собою однакові за модулем і фазою напруги в усіх трьох фазах, а за несиметричних режимів напруги у фазах відрізняються.

Несиметричні режими в електричних мережах виникають з таких причин:

1) неоднакові навантаження в різних фазах;

2) неповнофазна робота мережі;

3) різні опори фазних проводів ліній (що може бути пов'язано з різним значенням перехідних опорів на контактах, у місцях з'єднань проводів тощо).

Найчастіше несиметрія напруг виникає через нерівність навантажень фаз і зниження навантажень трифазних споживачів (електродвигунів, потужних трифазних нагрівачів). Якщо 25-30 років тому трифазне навантаження становило понад 2/3 загального навантаження мережі 0,4 кВ, то нині його частка менше ніж 1/3. Значною мірою це пов'язано з тим, що останніми роками в структурі сільських споживачів значно зросла частка побутових і комунальних.

У сільських, зокрема й міських мережах 0,4 кВ, несиметрія напруг є наслідком підключення однофазних освітлювальних і побутових електроприймачів малої потужності. Таких електроприймачів досить велика кількість, тому їх необхідно рівномірно розподіляти по фазах для зменшення несиметрії.

Крім цього, причиною несиметрії можуть слугувати аварійні ситуації в мережах, такі як несиметричні короткі замикання або обриви фаз. Через це відбувається невипадкова несиметрія або "перекіс фаз", який являє собою перевантаження одних фаз і недовантаження інших. Рівномірний розподіл навантажень у мережах нижчих напруг забезпечує зниження втрат у мережах на 15-20%. Однак випадкові вмикання і вимикання однофазних навантажень визначають наявність, крім невипадкової несиметрії, випадкової або ймовірнісної. Таким чином, навіть у мережах із рівномірним розподілом навантажень матиме місце несиметричний режим, основною складовою якої буде ймовірнісна несиметрія.

Однією з найскладніших задач, розв'язуваних під час проєктування та експлуатації електропостачання, є забезпечення якості електричної енергії на затискачах приймачів електроенергії та зниження її втрат під час розподілу. Ступінь несиметрії трифазної чотирипровідної системи характеризується коефіцієнтами несиметрії струмів і напруг за зворотною і нульовою послідовностями. При цьому втрати потужності, зумовлені несиметрією струмів, можуть характеризуватися коефіцієнтом втрат потужності, що дорівнює відношенню втрат потужності в несиметричному режимі, до відповідних втрат потужності, зумовлених протіканням струмів прямої послідовності. Коефіцієнти несиметрії напруг і втрати потужності можуть набувати будь-яких чисельних значень, які обумовлюються ступенем несиметрії напруг. Чим більші коефіцієнти, тим сильніший негативний вплив несиметрії мережі на роботу електроустановок.

Значення показників якості електроенергії регламентує ДСТУ 32144-2013.

Відповідно до ДСТУ, несиметрія трифазної системи напруг оцінюється двома основними показниками якості:

- коефіцієнтом несиметрії напруги за зворотною послідовністю *K2U*, %;

- коефіцієнтом несиметрії напруги за нульовою послідовністю *КOU*, %.

Широке застосування однофазних установок значної потужності різного роду призводить до значного збільшення частки несиметричних навантажень, спричиняючи тим самим несиметрію струмів (появу струмів нульової та зворотної послідовностей). При цьому відбувається зміщення нульової точки системи фазних напруг, обумовлюючи тим самим несиметрію напруг.

Коефіцієнти несиметрії напруги за зворотною та нульовою послідовністю є нормованими показниками якості електричної енергії, до ненормованих показників належать коефіцієнти несиметрії струмів за зворотною та нульовою послідовностями.

Якість електричної енергії за коефіцієнтами несиметрії напруг зворотної та нульової послідовностей вважають такими, що відповідають вимогам стандарту, якщо у 100% часу інтервалу (10 хвилин) в один тиждень ці показники не виходять за межі максимальних (гранично допустимих) значень, а у 95% цього інтервалу вони не перевищують нормальних значень. Нормально допустиме і гранично допустиме значення коефіцієнтів несиметрії напруг за зворотною і нульовою послідовністю в точках передачі електричної енергії 0,4 кВ згідно з ДСТУ дорівнюють 2,0 і 4,0% відповідно.

Норми ПКЕ, встановлені стандартом, є обов'язковими в усіх режимах роботи систем електропостачання загального призначення, крім режимів, зумовлених непередбачуваними обставинами.

Коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною та нульовою послідовністю характеризує трифазну систему напруг основної частоти за відхиленням міжфазної (фазної) напруги від симетрії. При цьому враховується не тільки нерівність діючих значень напруг у трьох фазах мережі, але також і відносне кутове зрушення фази між ними.

Значення коефіцієнтів несиметрії напруг визначаються у відсотках за формулами:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.1) |

де *U2* - комплексне значення напруги зворотної послідовності, В;

*U1* - комплексне значення напруги прямої послідовності, В;

*U0* - комплексне значення напруги нульової послідовності, В.

Коефіцієнти несиметрії струмів зворотної K2I і нульової K0I послідовностей визначають аналогічно:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.2) |

де *I2* - комплексне значення напруги зворотної послідовності, А;

*I1* - комплексне значення напруги прямої послідовності, А;

*I0* - комплексне значення напруги нульової послідовності, А.

У результаті досліджень установлено, що кожному відсотку величини коефіцієнта несиметрії напруг відповідає 1,73% додаткового відхилення напруги.

Відхилення в менший бік фазних напруг у сільських споживачів, підключених до кінця живильної лінії 0,4 кВ, часто не відповідають вимогам стандарту в години пікового навантаження.

При відхиленні напруги -10%, активні втрати двигуна збільшуються на 2%, збільшується струм асинхронного двигуна, що призводить до передчасного старіння ізоляції обмоток і в кінцевому підсумку виходу його з ладу. На кожен відсоток збільшення напруги споживання електроенергії супроводжується збільшенням реактивної потужності двигуна на 3 %.

Підвищення напруги понад номінальну на 1 % для ламп призводить до збільшення споживаної потужності на 1,5 %, світлового потоку на 3,7 %, термін служби скорочується на 15 %. Збільшення напруги на 3 % скорочує термін служби на 30 %. Зниження напруги на 5 % зменшує світловий потік на 18 %, а за його зниження до 20 % запуск люмінесцентних ламп неможливий.

Авторами доведено, що в разі зниження напруги в одній фазі на 10 %, збільшується час розгону на 7 %, робоча швидкість знижується на 0,5 %, а так само спостерігається мінливість електромагнітного моменту і швидкості двигуна. При коливаннях напруги понад 15% може бути порушена номінальна робота електродвигуна з можливим відключенням від мережі. Це зумовлено зміною форми магнітних полів статора і ротора під впливом струмів зворотної послідовності, що призводить до виникнення протидіючого моменту і зниження наявної потужності двигуна.

Щодо сталих відхилень напруги, які в стандарті називаються також "повільні зміни напруги", то допускаються позитивні та негативні відхилення напруги в точці передавання електричної енергії не більш як 10 % від номінального або узгодженого значення напруги протягом 100 % часу інтервалу в один тиждень. Зниження рівня несиметрії струмів і напруг дає змогу нормалізувати ПКЕ, знизити втрати електричної енергії.

За опублікованими даними, втрати електроенергії в лініях напругою 0,4 кВ і живильних трансформаторах 10/0,4 кВ за коефіцієнтів несиметрії струмів за нульовою і зворотною послідовностями, що дорівнюють 25-30 %, зростають порівняно із симетричним режимом роботи мережі на 30-50 %.

Зниження втрат електричної енергії є одним із найважливіших завдань, розв'язання якого потребує розроблення нових технічних засобів для ефективної роботи АПК.

Найбільш значущі наслідки несиметрії струмів і напруг, звичайно, пов'язані з низькою якістю електроенергії. Це, безумовно, так, але не можна забувати і про інші негативні впливи. Струми нульової послідовності, що протікають нейтральним провідником у несиметричному режимі, значно його нагрівають, що може призвести до коротких замикань і умов для виникнення пожеж, а також призводять до збільшення додаткових втрат активної потужності та електричної енергії. Доведено, що додаткові теплові втрати, зумовлені несиметричним електроспоживанням, можуть руйнувати ізоляцію нейтрального і фазного провідників, що є основною причиною коротких замикань і, як наслідок, пожеж.

Існуючі способи, спрямовані на симетрування фазних струмів у розподільчій мережі 0,4 кВ, що ведуть до зниження додаткових втрат і поліпшення якості електричної енергії, можна розділити на такі групи [17]:

⎯ Періодичне вирівнювання по фазах трифазної мережі однофазних навантажень (перерозподіл однофазних навантажень);

⎯ Зменшення опору нульової послідовності окремих елементів електричної мережі (трансформаторів споживчих ТП і ліній електропередачі);

⎯ Зменшення опору нульової послідовності окремих електропередачі);

⎯ Застосування замкнутих і напівзамкнутих схем;

⎯ Поперечна компенсація реактивної потужності.

Розглянемо ці способи більш детально.

Перерозподіл однофазних навантажень. Цей спосіб є найпростішим і найбільш доступним в умовах експлуатації електричних мереж. У трифазних чотирипровідних лініях електропередачі однаковість значень струмів забезпечується за рахунок правильного розподілу однофазних навантажень по фазах. Застосування цього способу дає можливість істотно зменшити несиметрію напруг і струмів в електричних мережах з комунально-побутовим та адміністративним (змішаним) навантаженнями [17].

Вирівнювання навантажень фаз найбільш актуальне для міських і сільських електричних мереж 0,4 кВ, оскільки вони характеризуються значним переважанням однофазних споживачів [17].

Спостереження в розподільних мережах 0,4 кВ окремих господарств

Нижегородської області засвідчили, що правила симетричного підключення однофазного навантаження порушуються в 90% випадків. Така недбалість служби електрифікації окремих господарств призводить до того, що господарство зазнає значних збитків від низької якості та додаткових втрат електричної енергії, зумовлених несиметрією напруг і струмів, але не вживає заходів для забезпечення перерозподілу навантажень. Слід зазначити, що деякі господарства не мають навіть засобів контролю розподілу навантаження, простих струмовимірювальних кліщів [17].

Водночас перерозподіл навантажень здійснювати необхідно, оскільки проведеними дослідженнями встановлено, що втрати електричної енергії, зумовлені несиметрією напруг і струмів, можна знизити на 15...20 %. Крім того, значно поліпшується якість електричної енергії і, насамперед, такі основні показники якості, як відхилення напруги, коефіцієнти зворотної і нульової послідовностей напруги [17].

Тому, для мінімізації несиметрію напруг і струмів необхідно проводити такі заходи [17].

1. Періодичний (не рідше одного разу на рік) контроль стану несиметрії струмів і напруг у розподільчій мережі 0,4 кВ, шляхом здійснення замірів цих величин на трансформаторній підстанції (ТП) [17].

2. Заміна неповнофазних відгалужень на повнофазні [17].

3. Складання карти (схеми) розподілу навантажень у мережі та здійснення подальших підключень відповідно до цієї схеми [17].

Використання принципу перерозподілу навантажень по фазах мережі ефективне тільки для зниження систематичної несиметрії, але слабко працює в мережах, де навантаження має випадковий характер і коли немає можливості спрогнозувати або розрахувати величину струму навантаження і їх рівномірність по фазах у конкретний момент часу [17].

Зниження опору нульової послідовності елементів електричної мережі. Скорочення додаткових втрат потужності, зумовлених несиметрією струмів у мережі 0,4 кВ, можливе при зменшенні опору нульової послідовності її окремих елементів. Водночас користуватися цим способом необхідно дуже обережно, оскільки дослідженнями, проведеними в НУБІП України, встановлено, що зменшення опору R0 мережі призводить до збільшення в ній струмів нульової та зворотної послідовностей, тобто до збільшення коефіцієнтів *К0I* і *К2I*. Тому збільшення перерізу нульового проводу понад 0,75 перерізу фазного проводу не призводить до помітного зниження додаткових втрат потужності в сільських розподільчих мережах. Крім того, відомо, що перерізи фазних і нульового проводів вибирають за економічними навантаженнями, які відповідають мінімуму наведених витрат. Перехід на наступний номінал перерізу проводу вимагає додаткових капітальних вкладень, які становлять 6% від вартості мережі 0,4 кВ. Це призводить до невиправданого подорожчання мережі 0,4 кВ [17].

У ННЦ ІМЕСГ України пропонується як інструмент для зниження опору нульової послідовності лінії використовувати ліхтарний дріт, як спосіб збільшення перетину нульового дроту. Однак цей спосіб не можна застосувати для зниження несиметрії струмів із тих самих причин, що й безпосереднє збільшення перерізу нульового проводу. Крім того, підключення освітлювального проводу на паралельну роботу з нульовим проводом можливе тільки в денний час доби, тоді як значна несиметрія навантажень проявляється найбільшою мірою у вечірні години [17].

Зниження опору нульової послідовності мережі 0,4 кВ може бути досягнуто заміною трансформатора зі схемою з'єднання обмоток "зірка-зірка з нулем" на трансформатор зі схемою з'єднання обмоток "зірка-зигзаг з нулем".

У сільських розподільчих мережах 0,4 кВ найпоширенішими нині є трансформатори зі з'єднанням обмоток за схемою "зірка-зірка з нулем". Це зумовлено тим, що вони мають більш просте конструктивне виконання і менші розміри, а, отже, і меншу вартість порівняно з трансформаторами з іншою схемою з'єднання обмоток. До них приєднуються як трифазні, так і однофазні електроприймачі. Однак ці трансформатори мають великий опір струмам нульової послідовності, який у середньому в 10 разів, а іноді й більше, перевищує опір прямої послідовності [17].

У трансформаторах із з'єднанням обмоток за схемою "зірка-зигзаг із нулем" на кожному осерді має місце магнітна рівновага між первинними і вторинними ампервитками при однофазному навантаженні. Опір нульової послідовності вторинної обмотки таких трансформаторів пропорційний потокам розсіювання, створюваним напівобмотками, розташованими на загальному сердечнику. При правильному конструктивному виконанні обмоток цей потік розсіювання може бути зменшений до нуля й індуктивність нульової послідовності теж може бути зведена до нуля [17].

З'єднання обмотки трансформатора "в зигзаг" вимагає великої витрати кольорового матеріалу. Вага обмотки, за інших рівних умов, збільшується приблизно на 7%, а кількість кольорового матеріалу збільшується в 1,16 раза. Тому загальна вага кольорового матеріалу всього трансформатора виходить на 7...8 % більшою, ніж у разі з'єднання обмотки нижчої напруги "в зірку"[17].

Загалом, через додаткову витрату обмотувального дроту, вартість трансформатора зі з'єднанням обмоток за схемою "зірка-зигзаг із нулем" збільшується на 30% порівняно з трансформаторами зі з'єднанням обмоток за схемою "зірка-зірка з нулем" [17].

Трансформатори з малим опором нульової послідовності зі схемою "зірка-зигзаг із нулем" та інші дають змогу істотно знизити у вузлах навантаження напругу нульової послідовності. У зв'язку з цим, їхнє застосування доцільне в сільських мережах 0,4 кВ з комунально-побутовим навантаженням для підвищення якості електричної енергії [17].

Застосування замкнутих і напівзамкнутих схем мережі 0,4 кВ. Зниження несиметрії струмів за рахунок додаткового ефекту вирівнювання навантажень фаз може бути отримано під час переведення мережі 0,4 кВ у режим напівзамкненої або замкнутої мережі. У першому випадку замикається мережа, що живиться від одного розподільного трансформатора (РТ), у другому - від декількох РТ. Найсприятливішим, щодо вирівнювання навантажень за фазами, є замикання ліній, що приєднуються до одного розподільного трансформатора, тому що напруга на клемах трансформатора за цього буде однаковою за величиною та за фазою для всіх ліній. У цьому разі точки струморозділу встановлюються між точками живлення для кожної з фаз лінії. Вирівнювання навантаження буде більшим, чим буде більшим число ліній мережі нижчої напруги, що замикаються [17].

Вирівнювання навантаження фаз у лініях, що замикаються, знижує несиметрію напруг уздовж лінії. Оскільки в кожній із ліній, що замикаються, величини і фази симетричних складових струмів і напруг є випадковими величинами, то математичне очікування напруги зворотної послідовності становить 33% від максимальної в незамкнутих лініях.

Замикання мережі сприятливо позначається на вирівнюванні навантажень фаз і перерозподілі симетричних навантажень між ділянками мережі. Під час замикання мережі підвищується якість напруги, зменшуються втрати за рахунок розвантаження нульового і фазних проводів. Але при цьому необхідно враховувати таке [17]:

- у замкнутій мережі, яка містить у собі кілька розподільчих трансформаторів, неминуче протікатимуть зрівняльні струми, які створюватимуть додаткові втрати потужності та електричної енергії;

- економічна ефективність цього способу зменшується зі збільшенням числа магістралей, що замикаються.

Поперечна компенсація реактивної потужності. Використання конденсаторних установок поперечної компенсації реактивної потужності електричних мереж для зниження несиметрії струмів досить повно розглянуто в багатьох джерелах [17].

Шляхом несиметричного розподілу за фазами потужностей конденсаторних батарей, призначених для компенсації реактивної потужності в електричній мережі, можна одночасно з підвищенням коефіцієнта потужності домогтися компенсації струмів зворотної послідовності в лінії та трансформаторі. Слід зазначити, що цей спосіб можна застосувати в тому разі, коли забезпечується певна стабільність несиметрії навантажень у мережі, що характерно для найбільш нагрітої точки обмотки трансформатора [17].

**РОЗДІЛ 2**

**РОЗРОБКА СПОСОБУ РЕГУЛЬОВАНОГО СИМЕТРУВАННЯ СТРУМІВ І НАПРУГ У СІЛЬСЬКІЙ ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ 0,4 КВ**

Оскільки несиметрія струмів і напруг має випадковий характер і змінюється в часі в значних межах, то симетрування режимів роботи розподільчих мереж з постійною потужністю СП буде недостатньо ефективним. В електричній мережі 0,4 кВ симетризуючі пристрої, як правило, виконуються з нерегульованими параметрами. За досить великих значень струмів нульової послідовності, потужність пристрою може досягати значної величини. У зв'язку з цим струми прямої послідовності можуть створювати додаткові втрати потужності та електричної енергії, що значно знижує економічну доцільність використання симетризувальних пристроїв протягом усього часу доби. З метою підвищення ефективності симетрування пропонується СУ, що дає змогу забезпечити автоматичне регулювання його потужності залежно від навантаження, що змінюється [18].

Під час аналізу літературних джерел і постановки завдань було виявлено, що найбільш суттєві недоліки вже існуючих способів регульованого симетрування струмів і напруг - це високий рівень додаткових втрат електроенергії, складність і дорожнеча реалізації, а також те, що симетрування проходить відповідно до розрахункового значення напруги, а не за фактичною напругою, що негативно позначається на точності проведеного симетрування напруги. Відомий спосіб автоматичного регулювання напруги на електричній підстанції передбачає підтримання в нормі напруги за рахунок використання як контрольованого параметра тільки лінійних напруг, тобто не враховує значень фазних напруг. Водночас саме однофазні споживачі є основними джерелами несиметрії струмів і напруг. До того ж цей спосіб передбачає використання датчиків напруги, кількість яких зростає пропорційно до складності електричної мережі, що веде до збільшення капітальних вкладень на реалізацію способу [18].

Аналіз способів здійснення регульованого симетрування напруги також засвідчив, що способи, які застосовуються на сьогодні, є недостатніми і не можуть повною мірою забезпечити точне, надійне регулювання та підтримання заданої напруги у споживачів [18].

У зв'язку з цим необхідне розроблення нового, високонадійного способу регульованого симетрування струмів і напруг у сільській електричній мережі 0,4 кВ, який дав би змогу не тільки підвищити якість, а й знизити втрати електричної енергії [18].

Даний спосіб повинен забезпечувати можливість регульованого симетрування струмів і напруг завдяки використанню в якості контрольованого параметра несиметрії фазних напруг, а також підвищенню точності симетрування завдяки розширенню функціональних можливостей способу шляхом опитування даних за напругою [18].

Суть пропонованого винаходу пояснюється рис. 2.1, на якому представлена структурна схема, що реалізує спосіб [18].

Схема складається з: ДН1-ДН-3 ⎯ датчики фазної напруги; БУ ⎯ блок управління; ЗП ⎯ симетруючий пристрій; БК ⎯ блок комутації; БС ⎯ блок симетрування [18].

Як пристрій (БС), що безпосередньо здійснює регулювання напруги, застосовується симетризуючий пристрій [18].

Розроблений спосіб передбачає встановлення датчиків фазної напруги (ДН) у найближчому до джерела живлення вузлі навантажень [18].

За допомогою датчиків фазних напруг ДН1-ДН3 здійснюється автоматизоване збирання динамічних даних за напругою. За допомогою задавального пристрою ЗУ задаються діапазони відхилення напруг, що відповідають рівням симетрування. Зібрані дані датчиків фазних напруг ДН1-ДН3 і задавального пристрою ЗУ аналізуються блоком керування БУ на наявність відхилення напруги від номінальних значень [18].

Отримане відхилення напруги обробляється БУ і надходить на блок комутації БК, який впливає на блок симетрування БС [18].

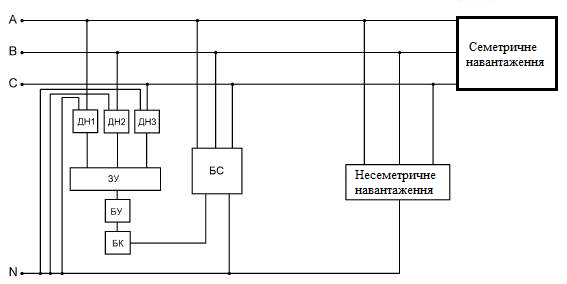


Рис. 2.1. Спосіб регульованого симетрування струмів і напруг у сільській електричній мережі 0,4 кВ.

Роботу регульованого симетрування струмів і напруг у сільській електричній мережі 0,4 кВ забезпечують у такий спосіб [18].

Таким чином, відбувається симетрування струмів і напруг у мережі 0,4 кВ, підтримання в нормі основних параметрів якості та зниження втрат електричної енергії завдяки використанню як керуючого параметра несиметрії фазних напруг [18].

Під час розроблення способу необхідно розробити алгоритм, за якого пристрій, що симетризує, розпізнаватиме величину відхилення фазної напруги, порівнюватиме ці значення із заданими, і на основі порівняння формуватиме керувальний сигнал і подаватиме його на виконавчий пристрій [18].

Номінальні значення напруг у мережах низької напруги регламентує ДСТУ. Згідно з цим документом у трифазних чотирипровідних і трипровідних мережах змінного струму частотою 50 Гц номінальна фазна напруга має становити 230 В, а номінальна лінійна - 400 В. Система 230/400 В є результатом розвитку системи 220/380 В. Подібне підвищення напруги підвищує пропускну спроможність низьковольтних мереж за незмінного перерізу жил живильних кабелів. Усе обладнання, що випускається на цей момент, має розраховуватися на зазначену систему напруг. Однак досі використовується обладнання з номінальною фазною напругою 220 В. У технічних вимогах до такого обладнання, які зазвичай спираються на стандарти якості електроенергії, допустимі відхилення рівня напруги відраховуються саме від цієї напруги, і якщо нижній рівень за номінальної 230 В за ДСТУ складатиме 207 В, що вкладається в діапазон ± 10% від номінальної 220 В, то верхній рівень складатиме 253 В, що виходить за межі діапазону ± 10% від напруги 220 В . Тому під час розроблення способу регульованого симетрування струмів і напруг у мережі 0,4 кВ використовується номінальна напруга 220 В [18].

Велика кількість робіт спрямована на аналіз режимів роботи діючих мереж 0,4 кВ. З аналізу наявних даних щодо максимальних сталих значень відхилення напруги можна зробити висновок, що найбільше число таких відхилень припадає на діапазон напруг ±5 %...±8 %, на діапазон ±8 %...±10 %, а також відхилення напруга спостерігається й вище 10 % [18].

Дослідженнями таких учених, як Попов М.М., Перова М.Б. і багатьох інших доведено, що відхилення напруги більше ніж 5 % призводить до перевитрати електричної енергії, а також спричиняє великі щорічні матеріальні збитки. Так, на кожен відсоток зміни живильної напруги споживана реактивна й активна потужність ламп розжарювання збільшується в середньому на 1,5 і 3%, при цьому знижуючи їхній термін служби [18].

Тому спосіб регульованого симетрування струмів і напруг у сільській електричній мережі 0,4 кВ полягає в тому, що параметри пристрою необхідно змінювати від рівня несиметрії струмів і напруг у мережі 0,4 кВ, що має місце в цей момент часу, тобто необхідно, щоб потужність пристрою автоматично регулювалася у функції рівня несиметрії фазних напруг [18].

Для ефективного зниження втрат електричної енергії та підтримання значень напруг у відповідності до ДСТУ під час використання симетризувального пристрою під час розроблення регульованого способу симетрування необхідно враховувати відхилення напруг тільки в менший бік від номінальної напруги, тому що симетризувальні пристрої є засобом підвищення рівня напруг, а регулювання напруг у разі відхилення понад +10% від значення ДСТУ призведе до ще більшого збільшення відхилення [18].

Початок алгоритму передбачає ініціалізацію початкових параметрів. Блок 3 виконує вимірювання напруги *UA(B,C)* і визначення відхилення напруги. Блок 4 виконує порівняння відхилення фазних напруг із номінальним значенням. У разі відхилення хоча б однієї фазної напруги від номінальної в діапазоні *UA(B, С)* > - 5%, сигнал надходить на блок 5 і вмикається 1 ступінь симетрування. У тому разі, якщо умова блоку 4 не виконується, то цикл повертається до блоку 3 для проведення повторних вимірювань. Увімкнення РСУ та перемикання ступенів виконується із затримкою часів і *t* витримки, що відповідає часу перехідного процесу, встановленому блоками 6, 12, 14, 20, 24, 26, 32, 36 і 40. Блок 7 виконує вимірювання напруги *UA(B,C)* і визначення відхилення напруги. Блоком 8 виконується порівняння відхилення фазних напруг із номінальним значенням. У разі відхилення хоча б однієї фазної напруги від номінальної у діапазоні *UA(B, С)* > - 5%, сигнал надходить на блок 13 і вмикається 2 ступінь симетрування [18].

Якщо умова блоку 8 не виконується, то блок 9 виконує вимірювання напруги *UА(B,C)* і визначення відхилення напруги. У такому разі 1 ступінь продовжує працювати доти, доки не виконується умова блока 10 *𝛿𝑈𝐴(𝐵, 𝐶) ≤* - 2%, у разі виконання умови почнеться нова перевірка блоком 8. Якщо умова блоку 10 не виконується, то відбувається вимкнення 1 ступеня і цикл повертається до блоку 3 для нової перевірки. Блоком 16 виконується порівняння відхилення фазних напруг з номінальним значенням.

У разі відхилення хоча б однієї фазної напруги від номінальної в діапазоні 𝛿𝑈𝐴(𝐵, 𝐶) ≥ - 5%, сигнал надходить на блок 25 і вмикається 3 ступінь симетрування. Якщо умова блоку 16 не виконується, то 2 ступінь продовжує працювати доти, доки виконуватиметься умова блоку 18 𝛿𝑈𝐴(𝐵, 𝐶) ≤ - 2% і перевірка блоком 15. Якщо умова блоку 18 не виконується, то відбувається вимкнення 2 ступеня і порівняння відхилення напруги з умовою блоку 22. Якщо умова блоку 22 не виконується, то відбувається вимкнення 1 ступеня, а потім цикл повертається до блоку 3 для нової перевірки. При виконанні умови блоку 23 подається сигнал на початок блоку 7 для нового вимірювання. Блоком 28 виконується порівняння відхилення фазних напруг із номінальним значенням. У разі відхилення хоча б однієї фазної напруги від номінальної у діапазоні 𝛿𝑈𝐴(𝐵, 𝐶) ≥-5% блоком 43 надсилається інформаційне повідомлення

диспетчеру мережі "Відхилення напруги вище - 5%", тим самим інформує про неможливість усунення несиметрії в даний момент часу і повертається до блоку 27 для нової перевірки. Якщо умова блоку 28 не виконується, то 3 ступінь симетрування перебуває в робочому стані, доти, доки буде виконуватиметься умова блоку 30. Якщо умова блоку 30 не виконується, то 3 ступінь відключається, потім блоком 34 визначається, чи потрібно відключати 2 ступінь, якщо ні, то виконується вимірювання блоком 15 і перевірка блоком 16. Після відключення 2 ступеня симетрування блоком 38 виконується порівняння відхилення напруг у заданій умові 𝛿𝑈𝐴(𝐵, 𝐶) ≤ - 2%, якщо умова виконується, то цикл повертається на початок блоку 7 для нової перевірки, у разі невиконання умови, 1 ступінь симетрування вимикається. Якщо не потрібне ручне відключення РСУ, то алгоритм починається заново.

Таким чином, цей алгоритм дає змогу автоматично визначати відхилення напруг для кожної з фаз і так само автоматично визначати необхідний ступінь симетрування для ввімкнення.

Пристрій (рис. 2.2) застосовується для регульованого симетрування струмів і напруг трифазної чотирипровідної мережі під час підключення до неї несиметричного навантаження. Параметри пропонованого пристрою змінюються залежно від рівня несиметрії струмів і напруг у мережі 0,4 кВ, що відбувається в даний момент часу, тому що потужність пристрою автоматично регулюється у функції рівня несиметрії фазних напруг [19].

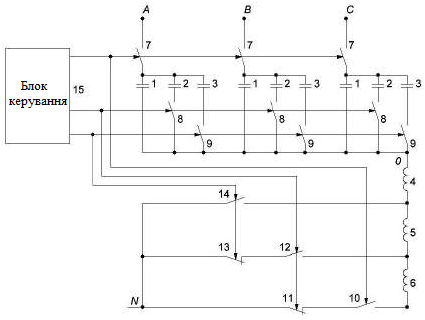


Рис. 2.2. Регульований симетриуючий пристрій для трифазної мережі з паралельним з'єднанням конденсаторів [19].

Регульований симетруючий пристрій для трифазної мережі з нейтральним проводом складається з ємнісних елементів (1-3), з'єднаних у зірку, індуктивних котушок (4-6), контактів, що замикають (7-10, 12, 14), контактів, що розмикають (11, 13), та блока керування пристроєм (15). На першому ступені потужності підключаються три ємності (1) та індуктивні котушки (4-6) [19].

У разі зростання несиметрії струмів і напруг під'єднується другий ступінь потужності, і потужність пристрою збільшується. Це досягається шляхом підключення додаткових ємностей (2) та індуктивних котушок (4, 5) [19].

Індуктивна котушка 6 при цьому відключається, і загальна індуктивність зменшується. У разі більшого зростання несиметрії під'єднується третій ступінь потужності. Пропонований пристрій повністю відключається від мережі при досягненні рівня фазних напруг, заданого алгоритмом його робот [19].

Перевагою даного пристрою є те, що потужність пристрою регулюється залежно від значень відхилень напруг у кожній із фаз мережі [19].

Загальний порядок керування містить перемикання ступенів, регулювання напруги та вимірювання рівня контрольованої напруги [19].

Симметрувальний пристрій, представлений на рис. 2.3, працює у функції рівня несиметрії фазних напруг. Основними елементами цього пристрою є диференціальні дискримінатори і тиристорні двонаправлені ключі та RS-тригери. Функціональна схема, що пояснює принцип керування схеми, наведена на рис. 2.3 [19].

Блок керування складається з трьох диференціальних дискримінаторів ДД1-ДД3, побудованих на схемі 2АБО-НІ, які виробляють на виході логічну одиницю в тому випадку, коли вхідна напруга укладена між двома порогами і дорівнює логічному нулю у всіх інших випадках [19].

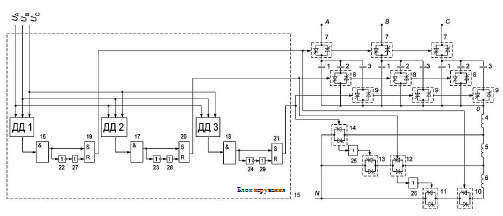


Рис. 2.3. Схема керування регульованим симетруючим пристроєм (СП).

У вихідному стані з виводів диференціальних дискримінаторів ДД1-ДД3 на логічні елементи АБО1- АБО3 16, 17, 18 надходять логічні нулі, на виходах цих елементів також нулі, отже *RS*-тригери 19, 20, 21, перебувають у нульовому (скинутому) стані: напруга на їхніх прямих виходах має низький потенціал, тобто на всіх прямих виходах *RS*-тригерів сигнал дорівнює логічному нулю. Тиристорні двоспрямовані ключі 7-9, 10, 12, 14 перебувають у закритому стані, ключі 11 і 13 - відкриті через інвертувальні елементи НЕ 25 і 26, отже, СП відключено від мережі [19].

У разі відхилення фазної напруги на величину ≥ - 5 від *U*НОМ, з виходу ДД1 на вхід елемента АБО1 (16) надходить логічна одиниця, на виході елемента також отримуємо одиницю. У разі надходження одиничного сигналу на вхід RS-тригера 19 із затримкою часу, заданого елементом 27, на його прямому виході отримаємо високий потенціал, водночас двоспрямовані тиристорні ключі 7 і 10 перейдуть у провідний стан, і увімкнеться перший ступінь регульованої СП [19].

Увімкнення другого і третього ступенів СП можливе за більшого відхилення значень однієї з фазних напруг. У разі більшого відхилення однієї з фазних напруг з виходу ДД2 надходить одиничний сигнал на вхід елемента АБО2 (17), на вхід RS-тригера 20 надходить одиничний сигнал через елемент 28, і в такий спосіб той самий сигнал надходить на тиристорні ключі 8, 12 і 11 через інвертуючий елемент НЕ 26. У схемі СП відбувається таке: під час замикання ключів 8 і 12 під'єднують додатковий ємнісний (2) та індуктивні елементи (4 і 5), водночас від'єднують 11, виводячи з ланцюга СП індуктивність 6. Одиничний сигнал з виходу елемента АБО2 інвертується через елемент НЕ 24, водночас потужність СП "форсується" завдяки збільшенню значень параметрів реактивних елементів. Вмикається другий ступінь СП [19].

У разі більшого відхилення однієї з фазних напруг (UA, UB, UC) під'єднують третій ступінь регульованої СП. З ДД3 надходить логічна одиниця, що сигналізує про більше відхилення напруги за однією, двома або трьома фазами. На вхід 21 надходить позитивний логічний сигнал із затримкою часу, заданого елементом 29, водночас на виході зазначеного RS-тригера (21) генерується логічна одиниця – під'єднується третій щабель СП, замикається ключ 14 і через інвертувальний елемент НЕ 25 розмикається ключ 13 – у такий спосіб на другому та третьому щаблях потужності СП зберігається умова резонансу напруг, бо це є однією з засадничих для зниження несиметрії та втрат, зумовлених несиметричними режимами [19].

Програмування ДД1-ДД3 дає змогу керувати моментами ввімкнення-вимкнення ступенів регульованого СП [19].

Вимкнення СП відбувається при зниженні рівня несиметрії фазних напруг у зворотній послідовності. За відсутності несиметрії схему приводять у вихідний стан і вона готова до нового ввімкнення, після якого процеси повторяться в уже викладеній вище послідовності [19].

Підтверджувальним фактором правильності та адекватності результатів досліджень, проведених з використанням імітаційної моделі, є фізичний експеримент і розробка прототипу запропонованого пристрою. Створення повноцінного прототипу та проведення експериментальних досліджень дають змогу достатньою мірою оцінити доцільність застосування регульованого симетричного пристрою.

Розрахунок регульованого симетруючого пристрою для фізичної моделі мережі 0,4 кВ проведено відповідно до відомої методики. На основі проведених розрахунків створено фізичну модель СУ, представлену на рис. 2.4.

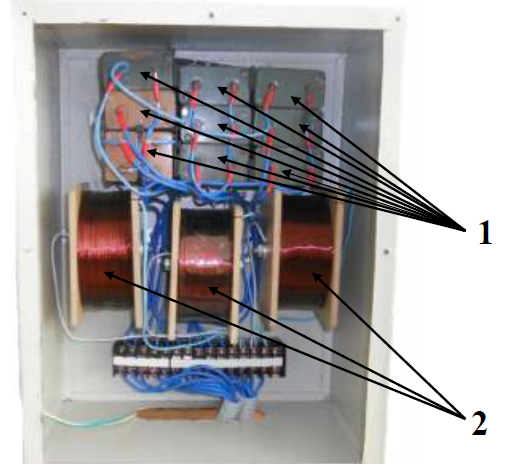


Рис. 2.4. Модель симетричного пристрою: 1 – конденсатори; 2 – індуктивні котушки

Індуктивні котушки на квадратному осерді 20\*20\*50 мм виконані проводом ПЕТВ-2 0,93 мм з кількістю витків 3371 і мають кожна такі параметри: індуктивність L = 0,282 Гн, опір постійному струму R = 19,313 Ом, металізовані паперові герметизовані одношарові конденсатори МБГО-1 4 мкФ 400 В.

Блок керування складається з трьох цифрових датчиків змінної напруги ZMPT101B і чотирьох ACS712 датчиків струму з гальванічною розв'язкою 20А (рис. 2.4), чотирьох понижувальних реле напруги, GSM модуль SIM900R із сім-картою (рис. 2.5) і апаратної платформи на базі мікроконтролера ATmega328 (платформа Arduino).

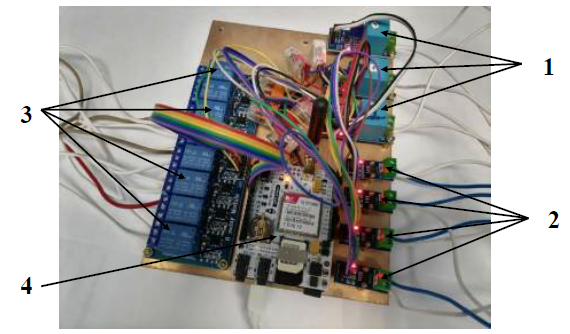


Рис. 2.5. Блок керування: 1 – цифрові датчики змінної напруги; 2 – датчики струму; 3 – реле напруги; 4 – GSM модуль із сім-картою.

Платформа має 14 цифрових входів/виходів (6 з яких можуть використовуватися як виходи ШІМ), 6 аналогових входів, кварцовий генератор 16 МГц, роз'єм USB, силовий роз'єм, роз'єм ICSP і кнопку перезавантаження.

За допомогою датчика ZMPT101B можна вимірювати змінну напругу в побутовій мережі 220В і безпечно передавати показання на вхід будь-якого мікроконтролера з вбудованим АЦП. Arduino модуль вимірювання напруги, заснований на малопотужному трансформаторі. За рахунок, якого показання не спотворюються і повністю повторюють форму сигналу на виході сенсора. Датчик безпечний, оскільки має гальванічну розв'язку від високовольтного входу. Для калібрування показань вимірюваної напруги, на модулі є підлаштування резистора, за допомогою якого можна досить точно налаштувати показання. З огляду на вартість датчика, на сьогодні аналогів йому немає.

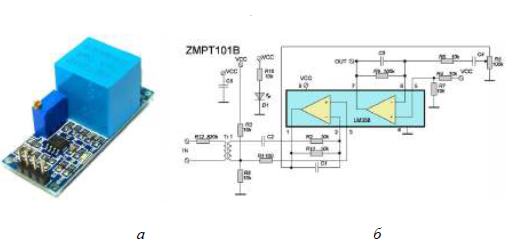


Рис. 2.6. Датчик змінної напруги ZMPT101B: а – модуль датчика напруги ZMPT101B; б – розташування виводів інтегрального датчика ZMPT101B.

Таблиця 2.1 - Характеристики Arduino модуля ZMPT101B.

|  |  |
| --- | --- |
| Характеристика | Значення |
| Вимірювана напруга | 0…1000 В |
| Напруга ізоляції | 4500 В |
| Струм обмоток | 2 мА |
| Напруга живлення | 4 …12 В |
| Індикація живлення | світлодіод |
| Робоча температура | -40 … +80°C |
| Розміри плати | 49,5 2.4 мм |

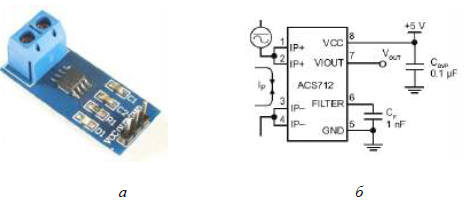


Рис. 2.7. ACS712 Датчик струму з гальванічною розв'язкою 20 А: а - модуль датчика струму ACS712; б – розташування виводів інтегрального датчика ACS712.

ACS712 Датчик струму з гальванічною розв'язкою 20 А, без використання шунта, заснований на ефекті Холла, тому поблизу модуля не рекомендується встановлювати потужні магніти, соленоїди, реле, електромотори та інші предмети, що випромінюють магнітне поле, бо воно може спотворювати показання. Датчик ACS712 може вимірювати змінний і постійний струм. Датчик живиться від напруги +5 В. Мікросхема ACS712 має вивід, до якого під'єднано фільтрувальний конденсатор, що дає змогу зменшити шумові характеристики та збільшити точність вимірювання.

Таблиця 2.2 – Характеристики Arduino модуля ACS712 20А.

|  |  |
| --- | --- |
| Характеристика | Значення |
| Максимальний вимірюваний струм | 20А |
| Чутливість | 100 мВ/А |
| Температурний діапазон | -40 … +95°С |
| Струм споживання не перевищує | 11 мА |
| Опір внутрішнього шунта | 1,2 мОм |
| Гальванічна розв'язка, пробивна  напруга | 2,1 кВ |
| Розмір | 31 13 мм |

Так само має низький опір вимірювального шунта, а значить незначні втрати. Реле струму і напруги заведені на аналогові виходи плати (мікроконтролера). Понижувальні реле напруги під'єднані на цифрові виходи мікроконтролера. Підключення здійснюється через понижувальні реле напруги, які перетворюють вхідну напругу з 220В до 30В і підключаються до кнопкового посту. Для роботи платформа під'єднується до комп'ютера за допомогою кабелю USB, можна так само подати живлення за допомогою адаптера AC/DC або батареї.

Модульність Arduino дає змогу створювати на базі цієї платформи проєкти різної спрямованості та функціональності. Існує можливість об'єднання плати і модулів зв'язку практично будь-якого стандарту і протоколу, зокрема, для підключення до стільникової мережі.



Рис. 2.9. GSM модуль SIM900R.

Таблиця 2.3 – Характеристики GSM модуля SIM900R.

|  |  |
| --- | --- |
| Характеристика | Значення |
| Діапазон робочої частоти | GSM 900 / 1800 МГц |
| Клас передавання даних GPRS | multi-slotclass 10/8 |
| CSD | до 14.4 кбіт/с |
| Вбудований стек | TCP/IP, UDP/IP |
| Напруга живлення | 3,2 ... 4,8 В |
| Робочий температурний діапазон: | -30 °C ... +80 °C |
| Розмір | 24\* 24 \* 3 мм |

GSM модуль SIM900R (рис. 2.9) для Arduino дає змогу здійснювати з'єднання з будь-яким віддаленим пристроєм за допомогою мобільної мережі - скрізь, де є покриття. Це дає змогу віддалено керувати симетризувальним пристроєм, надсилати команди керування на пристрій і приймати інформацію від нього за допомогою SMS-команд або через інтернет-підключення через GSM/GPRS, а також отримувати потрібні дані, контролювати стан СУ і керувати його роботою.

**РОЗДІЛ 3**

**МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РЕГУЛЬОВАНОГО СИМЕТРУЮЧОГО ПРИСТРОЮ**

Основна мета експериментальних досліджень - підтвердження заявлених можливостей регулюючого симетруючого пристрою для трифазної мережі 0,4 кВ з нульовим проводом і зниження втрат електричної енергії під час його увімкнення на різні потужності, обумовлених несиметрією струмів та напруг, шляхом зміни навантаження в кожній з фаз.

Суть методики дослідження – зміна навантаження у фазах для створення несиметричних режимів роботи мережі 0,4 кВ і реєстрація експериментальних даних для визначення рівня несиметрії струмів і напруг та рівня втрат, зумовлених несиметрією струмів і напруг.

Тому до програми досліджень увійшли такі питання:

1. Загальне експериментальне дослідження адекватності конструктивних та електричних параметрів елементів регульованого СП;

2. Дослідження зміни коефіцієнта втрат *Кр* при зміні рівня несиметрії;

3. Дослідження зміни коефіцієнта втрат *Кр* при зміні рівня несиметрії під час увімкнення ступенів потужності СП;

4. Дослідження зміни показників якості електричної енергії, що відносяться до несиметрії;

5. Дослідження залежностей втрат електричної енергії під час увімкнення СП від рівня несиметрії та ступенів потужності СП.

Експериментальні дослідження регульованого симетруючого пристрою проведено в лабораторних умовах на базі кафедри.

Для живлення стенда використовувалася трифазна напруга 380 В. Правильність показань датчиків контролювали за допомогою аналізатора якості електричної енергії CIRCUTOR AR.5L.

Порядок проведення експерименту полягає в постановці завдань експериментальних досліджень і складанні програми, згідно з якою планується проводити експеримент.

Завданнями проведення досліджень є:

- збір та обробка експериментальних даних;

- на підставі експериментальних даних підтвердити ефективність впровадження регульованого симетруючого пристрою.

Лабораторні дослідження проводилися для режимів мережі 0,4 кВ:

- за відсутності СП;

- у разі встановлення СП у вузлі навантажень.

Для досліду I змінювалося навантаження у фазі А; для досліду II - у фазі А і В; для III досліду - у трьох фазах.

Несиметричні режими роботи моделі мережі 0,4 кВ створювали зміною опору навантажувальних реостатів РПШ - 5 15 Ом 5А і РПШС - 10 7,5 Ом 10А, підключенням ламп ДРЛ 125 Вт і 250 Вт у фази А, В і С.

Вимірювання проводили, починаючи із симетричного режиму роботи мережі, за якого було ввімкнено тільки симетричне навантаження. Потім, одночасно збільшуючи потужність фаз, відповідно до таблиць 3.1 - 3.3, реєструвалися значення струмів і напруг. Проведено розрахунок для різних значень коефіцієнта несиметрії та додаткових втрат потужності.

Таблиця 3.1 – Значення потужностей навантажень за трифазного симетричного й однофазного навантажень.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № досліду | *Р*а, *Вт* | *Р* в, *Вт* | *Р* С, *Вт* | Коефіцієнт несиметрії |
| 1 | 5800 | 5600 | 5600 | 1 (симетричне навантаження) |
| 2 | 6850 | 5600 | 5600 | 1,574 |
| 3 | 7600 | 5600 | 5600 | 1,81 |
| 4 | 8200 | 5600 | 5600 | 2,017 |
| 5 | 9800 | 5600 | 5600 | 2,99 |
| 6 | 10900 | 5600 | 5600 | 3,671 |

Таблиця 3.2 – Значення потужностей навантажень при трифазному симетричному і двофазному навантаженнях.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № досліду | *Р*а, *Вт* | *Р* в, *Вт* | *Р* с, *Вт* | Коефіцієнт несиметрії |
| 1 | 5800 | 5800 | 5800 | 1 (симетричне навантаження) |
| 2 | 6990 | 8200 | 5800 | 1,753 |
| 3 | 7600 | 8900 | 5800 | 1,927 |
| 4 | 8200 | 9800 | 5800 | 2,14 |
| 5 | 9800 | 12200 | 5800 | 2,756 |
| 6 | 10900 | 13800 | 5800 | 3,222 |

Таблиця 3.3 – Значення потужностей навантажень при трифазному симетричному і трифазному навантаженнях.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № досліду | *Р*а, *Вт* | *Р* в, *Вт* | *Р* С, *Вт* | Коефіцієнт несиметрії |
| 1 | 5800 | 5800 | 5800 | 1 (симетричне навантаження) |
| 2 | 6850 | 6250 | 6750 | 1,177 |
| 3 | 7600 | 6400 | 7150 | 1,257 |
| 4 | 8200 | 6600 | 7600 | 1,354 |
| 5 | 9800 | 6950 | 8600 | 1,619 |
| 6 | 11800 | 7150 | 9300 | 1,808 |

На рис. 3.1 представлена експериментальна установка з несиметричним навантаженням.

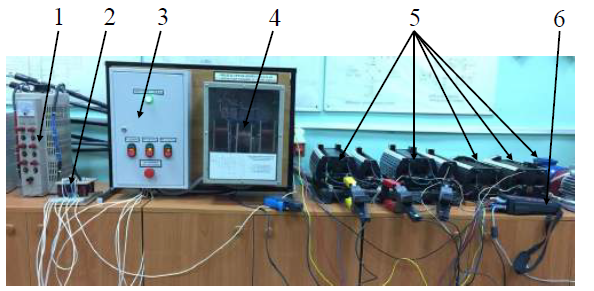


Рис. 3.1. Проведення експерименту:1 – трифазний автотрансформатор; 2 - модель лінії електропередачі; 3 – щит керування; 4 – симетризуючий пристрій; 5 – несиметричне навантаження; 6 – аналізатор якості електричної енергії CIRCUTOR AR.5L.

На рис. 3.2 – 3.6 представлено графіки зміни коефіцієнта втрат *Кр* від рівня несиметрії Кнес відповідно до умов дослідів під час експериментального дослідження. Для математичних обчислень і розрахунку коефіцієнта втрат використовувалася програма RASPOT-1 і дані, зареєстровані блоком керування.

Таблиця 3.4 – Результати лабораторного експерименту. Трифазне симетричне та однофазне навантаження (без СП).

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № досліду/  Параметр | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Ua | 210,3 | 207,9 | 205,4 | 203,7 | 199,5 | 197,7 |
| Ub | 210,3 | 211,5 | 212,1 | 212,7 | 214,1 | 215 |
| Uc | 210,4 | 210,9 | 210,9 | 211,2 | 211,9 | 212,2 |
| а | -0,9294 | -1,229 | -1,353 | -1,505 | -1,977 | -2,112 |
| b | -120,9 | -121,2 | -121,4 | -121,5 | -121,9 | -122,2 |
| b | 119,1 | 119,5 | 119,7 | 119,9 | 120,5 | 120,9 |
| Ia | 27,27 | 31,07 | 33,11 | 35,47 | 41,39 | 45,2 |
| Ib | 27,27 | 27,4 | 27,47 | 27,53 | 27,7 | 27,91 |
| Ic | 27,27 | 27,32 | 27,34 | 27,37 | 27,43 | 27,49 |
| I1 | 27,27 | 27,93 | 29,74 | 29,45 | 31,5 | 32,92 |
| I2 | 0 | 1,772 | 2,37 | 3.192 | 5,234 | 7,555 |
| I0 | 0 | 1,49 | 2,11 | 2.933 | 4,77 | 5,937 |
| 1 | -0,923 | -0,9971 | -1,035 | -1.095 | -1,235 | -1,347 |
| 2 | -97,97 | -2,2 | -2,341 | -2,435 | -2,927 | -3,072 |
| 0 | 77,24 | -4.319 | -4,449 | -4,592 | -4,979 | -5,207 |
| U1 | 210,3 | 209,7 | 209,5 | 209,2 | 209,4 | 207,9 |
| U2 | 0,01721 | 0,7551 | 0,9347 | 1,249 | 2,057 | 2,575 |
| U0 | 0 | 2,319 | 3,307 | 4,441 | 7,304 | 9,147 |
| 1 | -0,923 | -0,9907 | -1,005 | -1,032 | -1,1 | -1,142 |
| 2 | -97,97 | -171,1 | -171 | -172,1 | -172,2 | -172,5 |
| 0 | -32,44 | -174,2 | -174,4 | -174,5 | -174,9 | -175,1 |
| K2U | 0 | 0,003 | 0,004 | 0,007 | 0,01 | 0,012 |
| KОu | 0 | 0,011 | 0,017 | 0,021 | 0,035 | 0,044 |
| K2I | 0 | 0,07 | 0,093 | 0.109 | 0,177 | 0,2 |
| K0I | 0 | 0,053 | 0,074 | 0.097 | 0,149 | 0,179 |
| Kp | 1 | 1,015 | 1,029 | 1,049 | 1,115 | 1,177 |

Таблиця 3.5 – Результати лабораторного експерименту. Трифазне симетричне й однофазне навантаження (під час увімкнення СП).

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № досліду/  Параметр | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Ua | 210,3 | 209,6 | 209 | 206,1 | 204,9 | 203,5 |
| Ub | 210,3 | 211 | 211,2 | 211,5 | 212,2 | 212,6 |
| Uc | 210,4 | 209,6 | 209,4 | 209,1 | 209,1 | 206,5 |
| а | -0,9294 | -1,356 | -1,513 | -1,609 | -2,199 | -2,502 |
| b | -120,9 | -120,9 | -120,9 | -120,6 | -120,5 | -120,4 |
| b | 119,1 | 119,1 | 119,1 | 119,2 | 119,2 | 119,3 |
| Ia | 26,26 | 30,13 | 31,69 | 33,61 | 39,63 | 41,96 |
| Ib | 26,26 | 26,44 | 26,53 | 26,63 | 26,96 | 26,21 |
| Ic | 26,26 | 26,34 | 26,91 | 29,36 | 29,69 | 30,64 |
| I1 | 26,26 | 26,96 | 29,69 | 29,51 | 31,65 | 33,05 |
| I2 | 0 | 1,666 | 2,4 | 3,236 | 5,369 | 6,693 |
| I0 | 0 | 0,663 | 0,9629 | 1,299 | 2,159 | 2,622 |
| 1 | -0,923 | 0,02946 | -0,04491 | -0,1349 | -0,3995 | -0,5601 |
| 2 | -96,96 | -2,411 | -2,599 | -2,651 | -3,293 | -3,49 |
| 0 | 66,24 | 43,02 | 42,96 | 42,66 | 42,19 | 41,96 |
| U1 | 210,3 | 209,9 | 209,5 | 209,2 | 209,4 | 206,9 |
| U2 | 0,01621 | 0,6631 | 0,9499 | 1.269 | 2,115 | 2,66 |
| U0 | 0 | 1,055 | 2,509 | 2.036 | 3,394 | 4,266 |
| 1 | -0,923 | -1,032 | -1,056 | -1,094 | -1,153 | -1,196 |
| 2 | -96,96 | -160,6 | -160,6 | -161,2 | -162,5 | -163,2 |
| 0 | -32,44 | -116,9 | -116,1 | -116,2 | -116,6 | -119 |
| K2U | 0 | 0,003 | 0,005 | 0,006 | 0,01 | 0,013 |
| KОu | 0 | 0,005 | 0,012 | 0,01 | 0,016 | 0,021 |
| K2I | 0 | 0,06 | 0,094 | 0,11 | 0,16 | 0,205 |
| K0I | 0 | 0,024 | 0,034 | 0,044 | 0,069 | 0,092 |
| Kp | 1 | 1,006 | 1,012 | 1,02 | 1,046 | 1,069 |

З рис. 3.2 видно, що за режиму роботи мережі 0,4 кВ зі встановленим СП у вузлі навантажень на різних потужностях коефіцієнт втрат *Кр*, обумовлений несиметричним навантаженням, знизився з 1,166 до величини 1,069, що становить 9,7 %.

|  |  |
| --- | --- |
| Коефіцієнт втрат, Кр, % |  |
| Коефіцієнт несиметрії, Кнес |

Рис. 3.2. Графік зміни коефіцієнта втрат від рівня несиметрії для трифазного симетричного й однофазного навантаження.

|  |  |
| --- | --- |
| Коефіцієнт несиметрії  напруг за зворотною послідовністю, К2U, % |  |
| Коефіцієнт несиметрії, Кнес |

Рис. 3.3. Графік зміни коефіцієнта несиметрії напруг за зворотною послідовністю від рівня несиметрії для трифазного симетричного й однофазного навантаження.

З рис. 3.3 видно, що коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю в умовах цього експерименту має незначне збільшення.

|  |  |
| --- | --- |
| Коефіцієнт несиметрії  напруг за зворотною послідовністю, К0U, % |  |
| Коефіцієнт несиметрії, Кнес |

Рис. 3.4. Графік зміни коефіцієнта несиметрії напруг за нульовою послідовністю від рівня несиметрії для трифазного симетричного й однофазного навантаження.

На рис. 3.4 представлено графік зміни коефіцієнта несиметрії напруг за нульовою послідовністю від рівня несиметрії для трифазного симетричного й однофазного навантаження. Коефіцієнт К0u, для максимального коефіцієнта несиметрії цього досліду, під час увімкнення СУ знизився з 0,044 до величини 0,021, тобто на 2,3 %.

|  |  |
| --- | --- |
| Коефіцієнт несиметрії  напруг за зворотною послідовністю, К2і, % |  |
| Коефіцієнт несиметрії, Кнес |

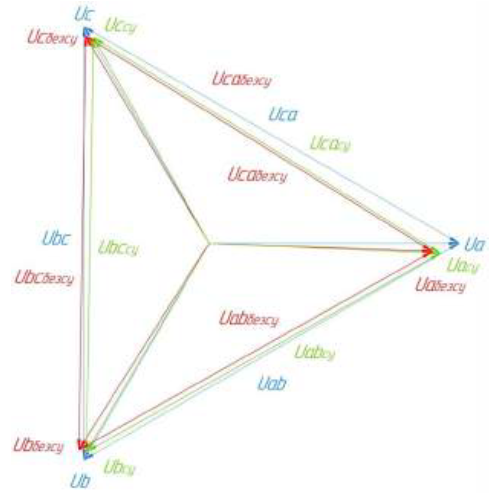
Рис. 3.5. Графік зміни коефіцієнта несиметрії струмів за зворотної послідовності від рівня несиметрії для трифазного симетричного та однофазного симетричного й однофазного навантаження.

Коефіцієнт несиметрії струмів за зворотною послідовністю має незначне збільшення.

|  |  |
| --- | --- |
| Коефіцієнт несиметрії  напруг за зворотною послідовністю, К0і, % |  |
| Коефіцієнт несиметрії, Кнес |

Рис. 3.6. Графік зміни коефіцієнта несиметрії струмів за нульової послідовності від рівня несиметрії для трифазного симетричного та однофазного симетричного й однофазного навантаження.

Коефіцієнт несиметрії струмів за нульовою послідовністю при увімкнення СП знизився з 0,178 до величини 0,082, тобто на 9,6 %.



|  |  |
| --- | --- |
|  | Векторна діаграма напруг без увімкнення СП  Векторна діаграма напруг при ввімкненні СП  Векторна діаграма напруг симетричної трифазної мережі |

Рис. 3.7. Векторна діаграма напруг для максимального рівня несиметрії для трифазного симетричного й однофазного навантаження.

|  |  |
| --- | --- |
| Коефіцієнт втрат, Кр, % |  |
| Коефіцієнт несиметрії, Кнес |

Рис. 3.8. Графік зміни коефіцієнта втрат від рівня несиметрії для трифазного симетричного та двофазного навантаження.

На рис. 3.8 представлено графік зміни коефіцієнта втрат від рівня несиметрії для трифазного симетричного і двофазного навантаження. За графіком видно, що Кр знижується з величини 1,174 до 1,068, що становить 10,6 %.

|  |  |
| --- | --- |
| Коефіцієнт несиметрії напруг  за зворотною послідовністю, К2U, % |  |
| Коефіцієнт несиметрії, Кнес |

Рис. 3.9. Графік зміни коефіцієнта несиметрії напруг за зворотною послідовністю від рівня несиметрії для трифазного симетричного і двофазного навантаження.

З рис. 3.9 видно, що коефіцієнт несиметрії напруг за зворотній послідовності в умовах цього експерименту незначно зменшується.

|  |  |
| --- | --- |
| Коефіцієнт несиметрії напруг  за зворотною послідовністю, К0U, % |  |
| Коефіцієнт несиметрії, Кнес |

Рис. 3.10. Графік зміни коефіцієнта несиметрії напруг за нульовою послідовністю від рівня несиметрії для трифазного симетричного і двофазного навантаження.

|  |  |
| --- | --- |
| Коефіцієнт несиметрії струмів за  зворотної послідовності, К2i, % |  |
| Коефіцієнт несиметрії, Кнес |

Рис. 3.11. Графік зміни коефіцієнта несиметрії струмів за зворотною послідовністю від рівня несиметрії для трифазного симетричного і двофазного навантаження.

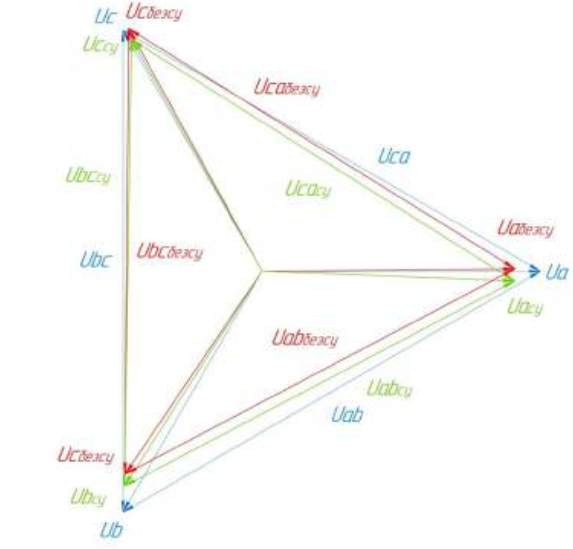
На рис. 3.10 представлено графік зміни коефіцієнта несиметрії напруг за нульовою послідовністю від рівня несиметрії для трифазного симетричного і двофазного навантаження. Коефіцієнт К0u, для максимального коефіцієнта несиметрії цього досліду, під час увімкнення СП знизився з 0,059 до величини 0,024, тобто на 3,5 %.

За графіком на рис. 3.11 видно, що коефіцієнт несиметрії струмів за зворотною послідовністю має незначне збільшення.

|  |  |
| --- | --- |
| Коефіцієнт несиметрії струмів за  зворотної послідовності, К0i, % |  |
| Коефіцієнт несиметрії, Кнес |

Рис. 3.12. Графік зміни коефіцієнта несиметрії струмів за нульовою послідовністю від рівня несиметрії для трифазного симетричного і двофазного навантаження

В умовах проведеного експерименту, коефіцієнт несиметрії струмів за нульовою послідовністю під час увімкнення СП на різні потужності знизився з 0,177 до величини 0,073, що становить 10,4 %.



|  |  |
| --- | --- |
|  | Векторна діаграма напруг без увімкнення СП  Векторна діаграма напруг при ввімкненні СП  Векторна діаграма напруг симетричної трифазної мережі |

Рис. 3.13. Векторна діаграма напруг для максимального рівня несиметрії для трифазного симетричного і двофазного навантаження.

|  |  |
| --- | --- |
| Коефіцієнт втрат, Кр, % |  |
| Коефіцієнт несиметрії, Кнес |

Рис. 3.14. Графік зміни коефіцієнта втрат від рівня несиметрії для трифазного симетричного та трифазного навантаження.

На рис. 3.14 представлено графік зміни коефіцієнта втрат від рівня несиметрії для трифазного симетричного і трифазного навантаження. За графіком видно, що Кр знижується з величини з 1,046 до величини 1,02, що становить 2,6 %.

|  |  |
| --- | --- |
| Коефіцієнт несиметрії  напруг за зворотною |  |
| Коефіцієнт несиметрії, Кнес |

Рис. 3.15. Графік зміни коефіцієнта несиметрії напруг за зворотної послідовності від рівня несиметрії для трифазного симетричного і трифазного навантаження.

На рис. 3.15 представлений графік зміни коефіцієнта несиметрії напруг за зворотною послідовністю К2U від рівня несиметрії для трифазного симетричного та трифазного навантаження і в разі ввімкнення СП на різні ступені потужності. За графіком видно, що К2U знижується з величини 0,09 до 0,08.

|  |  |
| --- | --- |
| Коефіцієнт несиметрії напруг  за зворотною послідовністю, К0U, % |  |
| Коефіцієнт несиметрії, Кнес |

Рис. 3.16. Графік зміни коефіцієнта несиметрії напруг за нульовою послідовністю від рівня несиметрії для трифазного симетричного і трифазного навантаження.

Під час зміни навантаження по кожній фазі (рис. 3.15 - 3.22) коефіцієнт несиметрії Кнес змінюється від симетричного навантаження Кнес = 1 до величини 1,808.

Коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю в умовах цього експерименту знизився з 0,27 на величину 0,13, що становить 1,4 %.

|  |  |
| --- | --- |
| Коефіцієнт несиметрії струмів за  зворотної послідовності, К2i, % |  |
| Коефіцієнт несиметрії, Кнес |

Рис. 3.17. Графік зміни коефіцієнта несиметрії струмів за зворотної послідовності від рівня несиметрії для трифазного симетричного і трифазного навантаження.

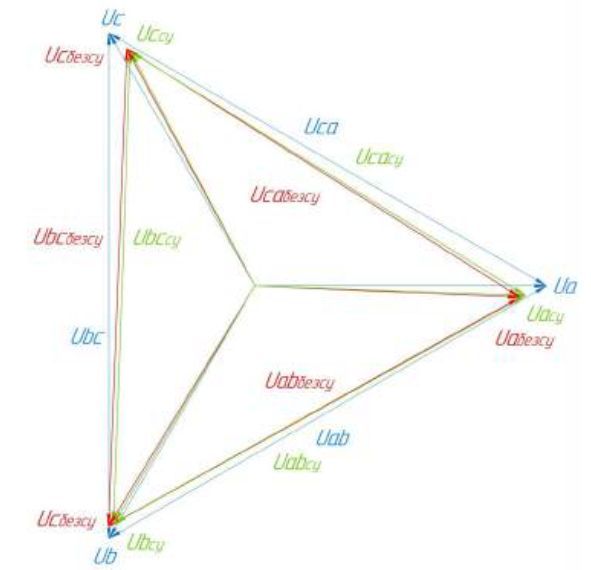
Коефіцієнт несиметрії струмів за зворотною послідовністю в умовах цього експерименту залишився незмінним.

|  |  |
| --- | --- |
| Коефіцієнт несиметрії струмів за  зворотної послідовності, К0i, % |  |
| Коефіцієнт несиметрії, Кнес |

Рис. 3.18. Графік зміни коефіцієнта несиметрії струмів за нульовою послідовністю від рівня несиметрії для трифазного симетричного і трифазного навантаження.

За графіками на рис. 3.18 видно, що К0i знизився з 0,91 до величини 0,44 за максимального рівня несиметрії в експерименті, тобто на 4,7%.

За отриманими експериментальними даними так само побудовано векторні діаграми зміни напруг (рис. 3.19).



|  |  |
| --- | --- |
|  | Векторна діаграма напруг без увімкнення СП  Векторна діаграма напруг при ввімкненні СП  Векторна діаграма напруг симетричної трифазної мережі |

Рис. 3.19. Векторна діаграма напруг для максимального рівня несиметрії для трифазного симетричного і трифазного навантаження.

Так само за допомогою програми RASPOT-1 виконано розрахунок втрат електричної енергії. За отриманими результатами побудовано залежності втрат електроенергії під час увімкнення СП від коефіцієнта несиметрії Кнес для трьох дослідів (рис. 3.20 - 3.22).

|  |  |
| --- | --- |
| Втрати електроенергії, 𝛥Р, % |  |
| Коефіцієнт несиметрії, Кнес |

Рис. 3.20. Залежність втрат електричної енергії під час увімкнення СП від рівня несиметрії (для трифазного симетричного й однофазного навантаження).

Для досліду, де навантаження змінювалося в одній фазі, побудовано залежність втрат електричної енергії під час увімкнення СП від рівня несиметрії. При максимальному рівня несиметрії втрати знизилися на 9 %.

|  |  |
| --- | --- |
| Втрати електроенергії, 𝛥Р, % |  |
| Коефіцієнт несиметрії, Кнес |

Рис. 3.21. Залежність втрат електричної енергії під час увімкнення СП від рівня несиметрії (для трифазного симетричного і двофазного навантаження).

Для досліду, де навантаження змінювалося у двох фазах, побудовано залежність втрат електричної енергії під час увімкнення СП від рівня несиметрії. При максимальному рівня несиметрії втрати знизилися на 10 %.

|  |  |
| --- | --- |
| Втрати електроенергії, 𝛥Р, % |  |
| Коефіцієнт несиметрії, Кнес |

Рис. 3.22. Залежність втрат електричної енергії під час увімкнення СП від рівня несиметрії (для трифазного симетричного та трифазного навантаження)

Для досліду (рис. 3.22), де змінювалося навантаження в трьох фазах за максимального рівня несиметрії, втрати знизилися на 2 %.

У результаті практичних експериментів вдалося отримати значення коефіцієнта втрат від несиметрії, коефіцієнтів несиметрії напруг і струмів за зворотною та нульовою послідовностями, а також значення втрат електричної енергії.

Для порівняння отриманих результатів лабораторного експерименту з теоретичними даними необхідно враховувати ідентичні умови дослідів для кожного експерименту.

На рис. 3.23 – 3.25 наведено графіки результатів теоретичного та експериментального дослідження зниження втрат електричної енергії під час увімкнення СП від рівня несиметрії.

|  |  |
| --- | --- |
| Втрати електроенергії, 𝛥Р, % |  |
| Коефіцієнт несиметрії, Кнес |

Рис. 3.23. Порівняння теоретичних та експериментальних даних зниження втрат електричної енергії при ввімкненні СП від рівня несиметрії (для трифазного симетричного й однофазного навантаження).

|  |  |
| --- | --- |
| Втрати електроенергії, 𝛥Р, % |  |
| Коефіцієнт несиметрії, Кнес |

Рис. 3.24. Порівняння теоретичних та експериментальних даних зниження втрат електричної енергії при ввімкненні СП від рівня несиметрії (для трифазного симетричного і двофазного навантаження).

|  |  |
| --- | --- |
| Втрати електроенергії, 𝛥Р, % |  |
| Коефіцієнт несиметрії, Кнес |

Рис. 3.25. Порівняння теоретичних та експериментальних даних зниження втрат електричної енергії при ввімкненні СП від рівня несиметрії (для трифазного симетричного і трифазного навантаження).

Середній відсоток розбіжності теоретичних та експериментальних даних становить 2,5%, максимальний не перевищує 5%. Це додатково підтверджує працездатність пропонованого регульованого симетруючого пристрою та алгоритму його роботи.

Проведено експеримент, під час якого було підтверджено працездатність викладеного способу. Лабораторні випробування підтвердили заявлені характеристики пристрою. Регульований симетруючий пристрій дає змогу значною мірою знизити втрати електричної енергії в мережі 0,4 кВ і виконати симетрування струмів і напруг.

**Висновки по розділу**

1. Розроблено стенд "Модель трифазної мережі 0,4 кВ із симетричним пристроєм". Проведено експериментальне дослідження несиметричних режимів роботи сільських електричних мереж 0,4 кВ, а також рівня втрат.

2. Проведені випробування експериментального зразка пристрою регульованого симетричного пристрою повною мірою підтвердили його працездатність.

3. У результаті лабораторних експериментів було отримано залежності коефіцієнта, коефіцієнтів несиметрії струмів і напруг, і втрат електричної енергії від коефіцієнта несиметрії. З результатів проведених досліджень випливає, що запропонований пристрій ефективно знижує втрати за різних режимів роботи. Максимальне зниження коефіцієнта втрат Кр в умовах лабораторного експерименту становить 10,6 %. Відповідність отриманих залежностей із теоретичними дослідженнями підтверджено порівнянням розрахунків. Середній відсоток розбіжності теоретичних та експериментальних даних становить 2,5 %, максимальний не перевищує 5 %.

**ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ**

У роботі запропоновано нові рішення, що дають змогу знизити несиметрію струмів (напруг) і втрати електричної енергії в електричних мережах 0,4 кВ.

Розроблено новий спосіб регульованого симетрування струмів і напруг та алгоритм його реалізації. Виконано математичне моделювання роботи електричної мережі 0,4 кВ з регульованим симетруванням і розроблено комп'ютерну програму, що дає змогу визначити втрати електричної енергії в мережі 0,4 кВ у разі використання симетруючого пристрою. Теоретично обґрунтовано, що застосування регульованого симетрування дає змогу скоротити втрати електроенергії на 20% і більше, і забезпечити підтримання показників якості електроенергії в нормованих межах.

Розроблено новий регульований симетруючий пристрій, що реалізує авторський спосіб і алгоритм регулювання кількості ступенів, що підключаються, який забезпечує зниження втрат електричної енергії, обумовлених несиметричними режимами в електричній мережі 0,4 кВ, порівняно з нерегульованими симетруючими пристроями на 15%.

Виконане експериментальне дослідження показало застосовність розробленого способу регульованого симетрування струмів і напруг, а також працездатність виготовленого експериментального зразка регульованого симетруючого пристрою. Коефіцієнт втрат електроенергії Кр в умовах лабораторного експерименту знизився на 10,6 % при використанні регульованого симетруючого пристрою.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Веремійчук Ю.А., Опришко В.П., Притискач І.В., Ярмолюк О.С. Оптимізація функціонування інтегрованих систем енергозабезпечення споживачів. Київ, видавничий дім «КИЙ», 2020. 186 с.

2. Плачкова С. Г. Енергетика: історія, сучасність і майбутнє. Пізнання й досвід – шлях до сучасної енергетики : електрон. наук. пізнавальне видання. 2011. URL: http://energetika.in.ua/ (дата звернення: 15.03.2020).

3. Копішинська К. О., Широкова І. С. Сучасний стан та перспективи інноваційного розвитку атомної енергетики України. Економічний вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського". 2019. Вип. 16. С. 350-359. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/evntukpi\_2019\_16\_37 (дата звернення: 18.03.2020).

4. Інформаційна довідка про основні показники розвитку галузей паливно-енергетичного комплексу України. Міністерство енергетики України : офіц. веб-сайт.URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/newscatego ry?cat\_id=35081 (дата звернення 25.03.2020).

5. Цілі сталого розвитку: Україна. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України: офіц. веб-сайт. URL: https://menr.gov.ua/files/docs/Національна%20доповідь%20ЦСР%20України\_лип ень%202017%20ukr.pdf (дата звернення: 18.03.2020).

6. Про енергозбереження : Закон України від 01.07.1994 р. №75/94-ВР. Законодавство України : база даних. Верховна Рада України. Дата оновлення: 20.09.2019 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/74/94-%D0%B2%D1% 80#Text (дата звернення 25.03.2020).

7. Міжнародне агентство з відновлюваних джерел енергії (IRENA). International Renewable Energy Agency: офіц. веб-сайт. URL https://www.irena.org/ (дата звернення 25.03.2020).

8. Про альтернативні джерела енергії : Закон України від 25.09.2008 р. №601-VI. Законодавство України : база даних. Верховна Рада України. Дата оновлення: 21.07.2020 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text (дата звернення 25.03.2020).

9. Шидловський А.К. Енергоефективність і відновлювальні джерела енергії. Київ: Українські енциклопедичні знання, 2007. 560 с.

10. Кудря, С. О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії : курс лекцій. м. Київ. 2011 URL: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/931 (дата звернення 25.03.2020).

11. Veremiichuk Y., Yarmoliuk O., Prytyskach I., Opryshko V., Mahnitko A., Lomane T., Berzina K. Energy hub functioning model considering perspectives for development of bioenergy in Ukraine. Proc. IEEE 18th International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2nd Industrial and Commercial Power Systems Europe. Italy, Palermo, 12–15 June 2018. Pp. 1–6.

12. Вітроенергетика. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України: офіц. веб-сайт. URL: https://saee.gov.ua/uk /ae/windenergy (дата звернення 25.03.2020).

13. Renewables 2020 Global Status Report. REN21 Renewables now : офіц. веб-сайт. URL: https://saee.gov.ua/uk/ae/windenergy (дата звернення 25.03.2020).

14. Про ринок електричної енергії : Закон України від 09.11.2017 р. №2198-VIII Законодавство України : база даних / Верхов. Рада України. Дата оновлення: 01.09.2020 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text>

15. Встановлена потужність енергосистеми України на 10/2020. Національна енергетична компанія УКРЕНЕРГО: офіц. веб-сайт. URL: https://ua.energy/vstanovlena-potuzhnist-energosystemy-ukrayiny/ (дата звернення 22.10.2020).

16. Болюх В. Ф., Данько В. Г. Основи електроніки та мікропроцесорної техніки. Харків: Національний технічний університет «ХПІ», 2011. 257 с.

17. Савчекно Л.Г., Борисевич В.В. Аналіз наявних способів зниження несиметрії струмів і напруг, втрат електричної енергії в електричних мережах 0,4 кв. *Проблеми сучасної енергетики і автоматикив системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта): Матеріали наук.-техн конф.* м. Київ 19 жовтня 2023р. С. 31-32.

18.Борисевич В.В. Розроблення способу регульованого симетрування струмів і напруг у сільській електричній мережі 0,4 кВ.*Студентські читання–2023: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики.* 25 жовтня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 62-65.

19. Савчекно Л., Борисевич В. Розроблення схеми симетруючого пристрою для електричної мережі 0,4 кВ. *Матеріали XІV Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки».* Кропивницький: ЦНТУ. 2023.С. 409-410.