

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО
Факультет енергетики і комп'ютерних технологій

«На правах рукопису»
УДК 621.3

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри електроенергетики
та електротехнологій

к.т.н., доц. _____
« 14 » лютого 2026 року

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
здобувача другого (магістерського) рівня вищої освіти

На тему: Аналіз показників несиметрії в сільських електричних
мережах та дослідження технічних рішень щодо їх мінімізації

21ЕЕД.11260409.02.26.000000ПЗ

Виконав: студент М2 курсу, 21 МБ ЕЕ групи
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка
Освітня програма : Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка

_____ А. І. Ялама
(підпис)

Керівник, к.т.н, доцент _____ С. М. Дудніков
(підпис)

Консультант, к.е.н., доцент _____
(підпис)

Нормоконтролер, к.т.н., доц. _____
(підпис)

Рецензент _____
(підпис)

Запоріжжя, 2026 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ
ДМИТРА МОТОРНОГО

Факультет енергетики і комп'ютерних технологій
Кафедра електроенергетики і електротехнологій
Рівень вищої освіти: другий (магістерський)
Спеціальність: 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувачка кафедри
електроенергетики і електротехнологій

к.т.н., доц. _____
«27» грудня 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

Яламі Анатолію Івановичу

1. Тема роботи: Аналіз показників несиметрії в сільських електричних мережах та дослідження технічних рішень щодо їх мінімізації.

керівник роботи: Дудніков С. М., к.т.н., доцент.

затверджені наказом ректора університету від 23 вересня 2025 року № 441-С.

2. Строк подання здобувачем роботи: 12 лютого 2026 року.

3. Вихідні дані до роботи: ДБН, ДСТУ, ЕСКД, ПУЕ, ПБЕ електроустановок споживачів, завдання, матеріали виробничих та переддипломних практик, інтернет-ресурси, наукова та довідникова література та ін.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): проблема несиметрії і несинусійності напруги у сільських електричних мережах; аналіз основних шляхів усунення несиметрії напруг у системах електропостачання; синтез досвідного зразку симетруючого пристрою; аналіз техніко-економічної оптимізації параметрів трансформаторів; охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях; висновки по роботі.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслеників):

1. Рівні втрат електричної енергії в електромережах з різними рівнями напруги.
2. Мета та задачі досліджень. 3. Вплив несиметрії напруги на роботу споживачів електроенергії. 4. Класифікація способів і технічних засобів зниження несиметрії струмів і напруг. 5. Технічні засоби зниження несиметрії напруги в сільських

мережах 0,4 кВ. 6. Захист нульової послідовності. 7. Автоматизований симетруючий пристрій на мікроконтролері. 8. Основні висновки по роботі.

6. Консультанти розділів (підрозділів) роботи

Розділ (підрозділ)	П.І.Б, посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
4		27.12.25	26.01.26

7. Дата видачі завдання: 27 грудня 2025 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів кваліфікаційної робот	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Проблема несиметрії і несинусійності напруги у сільських електричних мережах.	27.12.25	
2. Аналіз основних шляхів усунення несиметрії напруг у системах електропостачання.	04.01.26	
3. Синтез досвідного зразку симетруючого пристрою.	11.01.26	
4. Методика розробки принципової схеми функціональних елементів компенсуючих пристроїв	19.01.26	
5. Аналіз техніко-економічної оптимізації параметрів трансформаторів.	26.01.26	
6. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях	01.02.26	
7. Підготувати презентаційний матеріал	10.02.26	
8. Підпис керівником роботи.	12.02.26	
9. Підпис завідувачем кафедри.	14.02.26	

Здобувач вищої освіти _____ А. І. Ялама
(підпис)

Керівник роботи, к.т.н., доцент _____ С. М. Дудніков
(підпис)

ABSTRACT

Yalama A. I. Analysis of asymmetry indicators in rural electrical networks and research of technical solutions for their minimization. Zaporizhzhia: TGATU, 2026. 101 p.

The volume of the qualification work is 98 sheets, the number of figures is 33, the number of tables is 3.

The master's qualification work has conducted a comprehensive study of the level of asymmetry of voltages and currents in distribution electrical networks with a voltage of 0.38/0.22 kV for agricultural purposes, and also carried out a technical justification of effective engineering and organizational solutions for its reduction. The main factors of the occurrence of asymmetric modes of operation of networks are considered, in particular, a significant share of single-phase and nonlinear electrical receivers, which leads to a deterioration in the quality of electrical energy and an increase in additional losses.

An analysis of modern methods for reducing electricity losses caused by load asymmetry was performed, and the possibilities of using balancing devices and specialized transformers to compensate for the components of the negative and zero sequence currents were investigated. The feasibility of using technical means that ensure a decrease in the level of asymmetry and increase the efficiency of the operation of power supply systems was substantiated.

A comparative analysis of circuit solutions and technical means that allow ensuring permissible values of the voltage asymmetry coefficient, as well as implementing a uniform distribution of single-phase loads between the phases of a four-wire three-phase network, was conducted. The results obtained confirm the technical and economic feasibility of introducing balancing devices to improve the quality of electric energy and reduce operational losses in rural electric networks.

Keywords: LOAD, ASYMMETRY, ELECTRICAL DIAGRAM, DISTRIBUTION NETWORK, BALANCING DEVICE, ELECTRICAL ENERGY, QUALITY.

ЗМІСТ

ВСТУП	07
1 ПРОБЛЕМИ ФАЗНОЇ НЕСИМЕТРІЇ ТА СПОТВОРЕННЯ ФОРМИ НАПРУГИ В СІЛЬСЬКИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ.	10
1.1 Дослідження параметрів якості напруги в сільських мережах низької напруги 380/220 В.	10
1.2. Причинні фактори виникнення несиметрії та несинусоїдальності напруги.	13
1.3 Вплив несиметрії та несинусоїдальності напруги на функціонування електроспоживачів.	15
Висновки до розділу 1.....	28
2 АНАЛІЗ ОСНОВНИХ СПОСОБІВ ЗМЕНШЕННЯ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГИ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	30
2.1. Розрахунок несиметрії напруги.....	26
2.2. Методи та засоби зниження несиметрії напруг	28
Висновки до розділу 2.....	51
3. СИНТЕЗ ДОСВІДНОГО ЗРАЗКУ СИМЕТРУЮЧОГО ПРИСТРОЮ	53
3.1 Аналіз засобів симетрування фазної напруги, що застосовуються в сучасних умовах.	53
3.2 Загальні відомості щодо автоматизації процесу симетрування.....	58
3.3 Методика розробки принципової схеми функціональних елементів компенсуючих пристроїв.....	60
3.4 Синтез мікропроцесорної системи управління.....	63
4 АНАЛІЗ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ТРАНСФОРМАТОРІВ.....	80

4.1. Техніко-економічна оцінка ефективності застосування симетруючих трансформаторів для зниження несиметрії та несинусоїдальності напруги в електроустановках сільськогосподарського призначення.	80
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	84
5.1 Організація охорони праці та безпеки в електротехнічних підрозділах у військовий час.....	84
5.2 Захисні заходи та технічні засоби, що забезпечують нормативний рівень надійності та безпеки електроустановок.....	86
5.3 Організаційні та технічні заходи безпеки при виконанні електромонтажних робіт.....	89
5.4 Пожежна безпека на підстанції.....	90
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ.....	93
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	95

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку виробничого сектору, особливо у сільськогосподарській галузі, активно впроваджуються засоби автоматизації та механізації технологічних процесів. Перехід до ринкових умов господарювання супроводжується значним зростанням кількості та потужності однофазних електроприймачів комунально-побутового призначення, що призводить до збільшення нерівномірності навантаження між фазами та, відповідно, до підвищення рівня несиметрії напруг і струмів у розподільчих мережах.

Паралельно зі збільшенням обсягів електроспоживання зростають вимоги до надійності функціонування систем електропостачання та до якості електричної енергії. Це обумовлено тим, що стабільність параметрів електроенергії безпосередньо впливає на ефективність роботи електротехнічного обладнання, тривалість його експлуатації та якість виробничої продукції. Порушення симетрії напруг призводить до додаткових втрат енергії, зниження коефіцієнта корисної дії електроустановок і прискореного зношування електрообладнання.

Кваліфікаційна робота Ялами Анатолія Івановича на тему: «Аналіз показників несиметрії в сільських електричних мережах та дослідження технічних рішень щодо їх мінімізації» виконана на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітньо-професійна програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Актуальність теми

У більшості випадків заходи, спрямовані на зниження втрат електричної енергії, базуються на критерії мінімізації приведених витрат при забезпеченні необхідного рівня надійності електропостачання та дотриманні нормативних показників якості електроенергії. Однак електричні мережі сільськогосподарського призначення характеризуються значною протяжністю, невисокою щільністю навантаження та великою кількістю однофазних споживачів, що ускладнює забезпечення симетричного режиму їх роботи.

Під час електрифікації нових фермерських господарств, агропромислових підприємств і тваринницьких комплексів, як правило, використовується існуюча інфраструктура електропостачання. Це обумовлює необхідність впровадження технічних рішень, спрямованих на зниження технологічних втрат електроенергії при одночасному забезпеченні нормативних показників якості електроенергії та високого рівня надійності роботи мереж напругою 10 кВ і 0,38 кВ.

Автоматизація виробничих процесів також сприяє підвищенню ефективності використання електричної енергії та зменшенню втрат. Водночас значна частка однофазних навантажень у сільських мережах призводить до нерівномірного розподілу струмів між фазами, що викликає появу струмів зворотної та нульової послідовностей. У зв'язку з цим актуальним є застосування симетруючих пристроїв і спеціалізованих трансформаторів, які забезпечують вирівнювання фазних навантажень, зменшення втрат електроенергії та підвищення надійності роботи електрообладнання.

Мета і завдання дослідження

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження рівня несиметрії струмів і напруг у сільських електричних мережах напругою 0,38/0,22 кВ та обґрунтування технічних і організаційних заходів щодо її зменшення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- виконати аналіз існуючих методів визначення втрат електроенергії, зумовлених несиметричними режимами роботи мереж;
- дослідити технічні характеристики сучасних симетруючих пристроїв та засобів контролю несиметрії струмів і напруг;
- оцінити ефективність застосування технічних засобів компенсації несиметрії у сільських електричних мережах;
- обґрунтувати доцільність використання автоматизованих систем симетрування навантажень.

Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є технічні засоби компенсації несиметричних режимів у повітряних розподільчих електричних мережах напругою 0,38/0,22 кВ сільськогосподарського призначення.

Предмет дослідження

Предметом дослідження є процеси зниження втрат електричної енергії в умовах несиметричного навантаження електричних мереж та технічні методи підвищення ефективності їх функціонування.

Наукова новизна отриманих результатів

Наукова новизна роботи полягає у подальшому розвитку підходів до зменшення втрат електроенергії в сільських електричних мережах шляхом впровадження сучасних технічних рішень, що базуються на модернізації систем електропостачання та використанні автоматизованих симетруючих пристроїв.

Практичне значення отриманих результатів

Практична цінність роботи полягає у визначенні імовірнісних характеристик несиметричних режимів у сільських електричних мережах та розробці методичного підходу до оцінки рівня несиметрії напруг і струмів у будь-якій точці мережі на основі характеристик навантаження окремих вузлів або споживачів. Проведений аналіз технічних рішень підтвердив можливість забезпечення допустимого рівня несиметрії шляхом використання спеціалізованих симетруючих пристроїв, що дозволяє підвищити ефективність електропостачання та зменшити експлуатаційні втрати.

Апробація результатів роботи

Основні положення та результати дослідження були представлені та обговорені на науково-технічній конференції, що підтверджує їх актуальність і практичну значущість.

1. ПРОБЛЕМИ ФАЗНОЇ НЕСИМЕТРІЇ ТА СПОТВОРЕННЯ ФОРМИ НАПРУГИ В СІЛЬСЬКИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

1.1. Дослідження параметрів якості напруги в сільських мережах низької напруги 380/220 В.

Якість електричної енергії в системах електропостачання визначається сукупністю показників, що характеризують режими напруги та частоти змінного струму. Для сільських електричних мереж, які функціонують у складі об'єднаної енергосистеми, відхилення частоти практично не спостерігаються. Натомість найбільш характерними порушеннями є зміна рівня напруги відносно номінального значення та її фазна несиметрія. Результати численних досліджень [16–18] свідчать, що в умовах експлуатації сільських мереж величини відхилень напруги часто перевищують допустимі межі, встановлені чинними стандартами.

Матеріали досліджень, виконаних Академією комунального господарства ім. Памфілова, показали, що навіть за умов оптимального розподілу однофазних навантажень між фазами повністю усунути несиметрію напруги неможливо: її рівень у багатьох випадках не знижувався нижче 20 %.

Питання несиметрії напруги активно досліджувалося як у країнах СНД (Н. М. Соколов, Ю. А. Єрмаков, Н. Г. Ганихаджаєв), так і в Україні (В.О. Калініченко, О.М. Лисенко, О. О. Мірошник, С. М. Рожавський, В. М. Зубко, Ю. Попова О. А., Квітка С. О.). Узагальнення отриманих результатів підтверджує, що для сільських електричних мереж характерні значні рівні несиметрії, які необхідно враховувати під час аналізу режимів роботи мережі. Так, у близько 75 % випадків струм у нульовому провіднику перевищував чверть середнього фазного струму, а в половині вимірювань досягав або перевищував 50 % цього значення.

Аналіз добових змін напруги показав, що понад третину відхилень у літній період і більше половини — у зимовий виходили за допустимі на той час межі $\pm 7,5$ %. При цьому лише приблизно у 20 % випадків коефіцієнт несиметрії напруги, нормований для електродвигунів, не перевищував рівень 5 %.

У ряді випадків зафіксовані відхилення напруги суттєво перевищували гранично допустимі значення. Зокрема, на початку повітряних ліній напруга змінювалася в межах від +11,4 % до -4,8 %, тоді як у кінцевих точках мережі відхилення досягали +8,3 % та -18,2 %, що є неприпустимим з точки зору надійності та якості електропостачання. За результатами вимірювань коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю K_{2U} становив близько 4 %, а за нульовою послідовністю K_{0U} — до 8 %.

Дослідження, виконані в розподільчих мережах житлового сектору, показали, що при завантаженні трансформаторів менш ніж на 50 % їх номінальної потужності коефіцієнт несиметрії за зворотною послідовністю змінювався протягом доби в межах 0,7–1,1 %, тоді як за нульовою послідовністю — 0,9–2,1 %.

У комунально-побутових мережах за умови завантаження трансформаторів понад 50 % номінальної потужності значення коефіцієнта K_{2U} зростало до 2,1 %, а коефіцієнт K_{0U} досягав 5,8 %.

Для виробничого сектору характерні дещо нижчі рівні несиметрії. Зокрема, в ремонтних майстернях коефіцієнт несиметрії за зворотною послідовністю перебував у межах 1,2–1,6 %, а за нульовою — 1,4–2,4 %. На тваринницьких фермах значення K_{2U} становили 0,7–1,2 %, тоді як K_{0U} не перевищував 0,3–0,6 % [3].

Окремим показником якості електричної енергії є спотворення синусоїдальної форми кривої напруги. Несинусоїдальність напруги зумовлюється наявністю в її спектрі гармонік, частоти яких кратні основній. Основними причинами виникнення таких спотворень є насичення магнітопроводів електричних машин і апаратів, що переважно супроводжується появою гармонік непарного порядку. Водночас нелінійні властивості елементів мережі та робота випрямних пристроїв спричиняють генерацію також гармонік парного порядку.

Початкові наукові дослідження нелінійних спотворень напруги були виконані ще у ХХ столітті. Зокрема, М. З. Лібкінд обґрунтував еквівалентну схему двообмотувального трансформатора та запропонував метод визначення гармонічних складових його ЕРС. Подальші роботи М. П. Костенка, С. Р. Глінтерника та З. Ст. Харламової були присвячені аналізу вищих гармонік у

мережах із вентильними перетворювачами та регуляторами, а також розробці методів розрахунку струмів і напруг вищих гармонік в електроенергетичних системах. На сьогодні ці підходи є загальноприйнятими та широко застосовуються в інженерній практиці.

Суттєвий внесок у вивчення несинусоїдальних режимів електричних мереж зробив Н. Н. П. Краснушкін, який узагальнив вплив окремих елементів мережі на рівень гармонічних спотворень і визначив характерні особливості таких режимів для промислових електроустановок.

Спектральний аналіз гармонік струму та напруги, а також дослідження коефіцієнтів спотворення синусоїдальності в міських мережах і на тягових підстанціях електрифікованого залізничного транспорту виконували М. С. Маркушевич та Л. А. Солдаткіна. Значний науковий внесок у розвиток теорії вищих гармонік зробив І. У. Жежеленко.

За даними досліджень [10, 11], в енергетичних системах високої напруги за наявності потужних вентильних перетворювальних установок відносний рівень вищих гармонік може досягати 5–12 % від гармоніки основної частоти, а в окремих випадках перевищувати зазначені значення [12].

Водночас, на відміну від промислових електричних мереж, питання несинусоїдальності напруги в сільських розподільчих мережах залишається недостатньо дослідженим і потребує подальшого наукового аналізу.

Згідно з результатами вимірювань [3], при навантаженні трансформаторів житлового сектору менш ніж на 50 % номінальної потужності коефіцієнт спотворення синусоїдальності напруги становив 0,9–2,1 %. За збільшення навантаження понад 50 % цей показник зростав до 8,3 %. У ремонтних майстернях коефіцієнт K_U перебував у межах 2,1–6,0 %, при цьому фіксувалися короткочасні пікові значення на рівні 8,1–8,4 %.

1.2. Причинні фактори виникнення несиметрії та несинусоїдальності напруги

Згідно з вимогами ДСТУ 3466-96, погіршення показників якості електричної енергії може бути зумовлене як режимами роботи енергосистеми живлення, так і характеристиками самих електроспоживачів. Такі явища, як тривалість провалів напруги, імпульсні перенапруги, коефіцієнти тимчасових перенапруг та відхилення частоти, переважно визначаються режимами функціонування енергосистеми [17, 19]. Водночас відхилення рівня напруги від номінального значення залежать як від параметрів напруги, що подається мережею живлення, так і від режимів роботи окремих електроприймачів [16, 17]. Несиметрія та несинусоїдальність напруги, як правило, пов'язані з роботою окремих споживачів електроенергії, насамперед у промисловому та комунально-побутовому секторах [17–21].

Несиметричні режими в трифазних системах електропостачання виникають унаслідок нерівномірного розподілу навантажень між фазами, відмінностей у параметрах фазних провідників ліній, а також у результаті неповнофазної роботи електрообладнання, що має місце при відключенні однієї або двох фаз [16, 21].

Основними джерелами несиметрії напруги є електроспоживачі, для яких реалізація симетричного багатофазного режиму є технічно складною або економічно недоцільною. До таких належать індукційні та дугові електричні печі, тягові навантаження електрифікованого транспорту змінного струму, однофазні електротермічні установки, зварювальні агрегати, освітлювальні мережі, спеціалізовані однофазні навантаження, а також побутові електроприлади [16, 18].

Результати досліджень [18–20] підтверджують, що суттєвий вплив на якість напруги справляє саме фазна несиметрія навантаження.

Для сільських електричних мереж напругою 380/220 В характерною є значна частка однофазних споживачів, до яких належать освітлювально-побутові пристрої та електродвигуни малої потужності. Під час проектування і будівництва таких мереж зазвичай намагаються забезпечити рівномірний розподіл однофазних навантажень між фазами. Проте на практиці повністю реалізувати цю вимогу вдається не завжди.

У процесі експлуатації мереж виконується вирівнювання фазних навантажень на основі вимірювань струмів у фазах. Однак, оскільки при цьому фіксуються миттєві значення струмів, ефективність такого вирівнювання є невисокою. Крім того, виконання зазначених робіт є трудомістким [11] і, як показує практика, не забезпечує очікуваного результату [12, 13]. Навіть за умов ідеально рівномірного розподілу навантаження між фазами слід враховувати випадковий характер вмикання та вимикання окремих споживачів. Унаслідок цього навантаження кожної фази змінюється в часі незалежно від інших фаз, що зумовлює постійну зміну кількості та сумарної потужності підключених електроприймачів. Саме тому в сільських мережах низької напруги практично завжди існує несиметрія навантажень, яка, у свою чергу, призводить до значної несиметрії напруги, що підтверджується даними літературних джерел [19, 20].

Несиметрія вхідної напруги трансформатора та нерівномірність його навантажувальних струмів спричиняють появу несиметрії та неврівноваженості вихідних напруг, обумовлених складовими зворотної та нульової послідовностей [69]. Найбільш чутливими до несиметрії навантаження є трансформатори зі схемою з'єднання обмоток «зірка – зірка – нуль», які характеризуються підвищеним опором нульової послідовності. Це призводить до формування неврівноваженої системи вихідних напруг трансформатора [13, 19–21].

Причиною спотворення синусоїдальної форми кривої напруги в системах електропостачання споживачів є наявність струмів вищих гармонік. Протікаючи через елементи мережі, ці струми зумовлюють появу відповідних гармонічних складових напруги [17, 18, 22]. Рівень вищих гармонік напруги визначається амплітудами струмів вищих гармонік, а також частотними характеристиками елементів електричної мережі. Накладаючись на основну гармоніку, вони призводять до деформації синусоїдальної форми напруги.

Джерелами струмів вищих гармонік є елементи електричних мереж з нелінійними вольт-амперними характеристиками. До них належать напівпровідникові перетворювачі частоти, однофазні та трифазні зварювальні установки, вентильні перетворювачі, електродугові печі, електричні машини, силові

трансформатори, вітроенергетичні установки, газорозрядні лампи, а також значна кількість сучасних електронних пристроїв: персональні комп'ютери, сервери, монітори, лазерні принтери, копіювальна техніка, факсимільні апарати, кондиціонери, телевізори, відеотехніка, мікрохвильові печі та інші прилади, побудовані на основі напівпровідникових елементів [16–19, 22, 23].

Зокрема, вентильні перетворювачі формують так звані канонічні вищі гармоніки порядку 5, 7, 11 та 13, рівні яких відносно першої гармоніки є обернено пропорційними номеру гармоніки [16–19]. Перетворювачі частоти, окрім вищих гармонік, генерують також інтергармоніки, частоти яких розташовані між частотами канонічних гармонік [1, 3].

Під час роботи зварювальних установок у спектрі струму з'являються вищі гармоніки та інтергармоніки, амплітуди яких можуть досягати 20 % від амплітуди основної гармоніки [16–18]. Персональні комп'ютери та газорозрядні джерела світла (люмінесцентні й дугові ртутні лампи) є джерелами гармонік порядку $n = 3, 5, 7$. Асинхронні електродвигуни формують гармоніки порядку $n = 3, 5, 7, 11$, однофазні випрямлячі — гармоніки $n = 3, 5, 7, 9, 11$, а трифазні випрямлячі — гармоніки порядку $n = 5, 7, 11$ [16–18].

1.3. Вплив несиметрії та несинусоїдальності напруги на функціонування електроспоживачів

Відхилення параметрів якості електричної енергії від нормативних значень, встановлених стандартами, негативно впливають на роботу як обладнання енергопостачальних організацій, так і електроприймачів споживачів. Найбільш чутливими до таких відхилень є електродвигуни, освітлювальні установки, вентильні перетворювачі, електрозварювальні та електротермічні агрегати.

Для електродвигунів зміна частоти обертання ротора визначається не лише рівнем напруги, але й характером навантаження, зокрема законом зміни моменту опору M_c (на рис. 1.1 момент опору вважається сталим), а також ступенем навантаження двигуна.

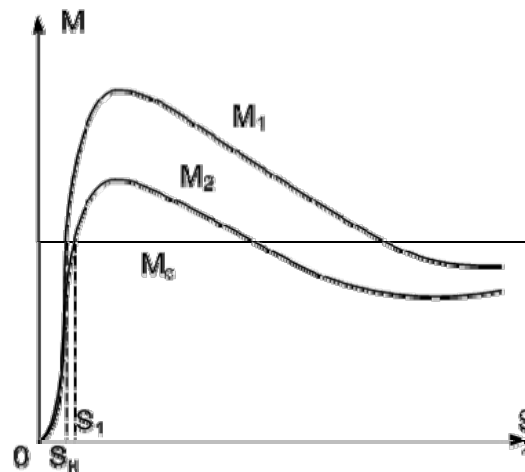


Рисунок. 1.1.- Механічні характеристики асинхронного двигуна за номінальної (M_1) та зниженої (M_2) напруги

Залежність частоти обертання ротора асинхронного двигуна від напруги живлення може бути описана співвідношенням [46]:

$$n = n_c \left(1 - k_3 \frac{U_{\text{НОМ}}}{S_{\text{НОМ}}} \right), \quad (1.1)$$

де n_c — синхронна частота обертання;

k_3 — коефіцієнт завантаження двигуна;

$U_{\text{НОМ}}$, $S_{\text{НОМ}}$ — номінальні значення напруги та ковзання відповідно.

1.3.1. Вплив відхилень напруги

Асинхронні електродвигуни. Асинхронні електродвигуни є найпоширенішими електроприймачами як у промисловості, так і в сільському господарстві. Відхилення напруги від номінального значення істотно змінює умови їх роботи. Зі зміною напруги трансформується механічна характеристика двигуна — залежність електромагнітного моменту від ковзання або частоти обертання (рис. 1.1). Оскільки обертовий момент асинхронного двигуна

пропорційний квадрату напруги на його затискачах, зниження напруги спричиняє зменшення як моменту, так і частоти обертання ротора.

З аналізу формули (1.1) випливає, що за незначного навантаження двигуна частота обертання може перевищувати номінальне значення, характерне для режиму номінального навантаження. У таких умовах помірне зниження напруги не призводить до зменшення продуктивності технологічного обладнання, оскільки частота обертання двигуна не опускається нижче номінальної.

Для електродвигунів, що працюють з повним навантаженням, зменшення напруги спричиняє зниження частоти обертання. Якщо продуктивність робочого механізму безпосередньо залежить від швидкості обертання двигуна, на його затискачах необхідно забезпечувати напругу, не нижчу за номінальну. У разі значного зниження напруги електромагнітний момент може стати меншим за момент опору механізму, що призводить до зупинки двигуна. Для запобігання аварійним режимам у таких ситуаціях двигун підлягає автоматичному або ручному відключенню від мережі.

Зниження напруги істотно погіршує умови пуску асинхронних двигунів, оскільки пусковий момент також пропорційний квадрату напруги. При значних відхиленнях двигун може взагалі не запуститися.

Рівень напруги на затискачах електродвигуна визначає величину споживаної активної та реактивної потужності. За зниження напруги реактивна потужність намагнічування зменшується приблизно на 2–3 % при зменшенні напруги на 1 %, проте за незмінної корисної потужності зростає струм двигуна. Це викликає додаткове теплове навантаження та перегрів ізоляції обмоток.

Тривала експлуатація двигуна при зниженій напрузі призводить до прискореного старіння ізоляції і, як наслідок, до скорочення терміну його служби. Орієнтовна оцінка відносного ресурсу ізоляції може бути визначена за формулами [16]:

$$R = (47\delta U^2 - 7,55\delta U + 1)k_2, -0,2 \leq \delta U_y < 0, \quad (1.2)$$

$$R = k_3, 0 < \delta U_y \leq 0,2. \quad (1.3)$$

Таким чином, з точки зору теплового режиму асинхронних двигунів найбільш небезпечними є саме негативні відхилення напруги. Крім того, зниження напруги спричиняє зростання реактивних втрат у розсіювальних опорах ліній, трансформаторів та самих електродвигунів.

Підвищення напруги також небажане, оскільки призводить до збільшення споживання реактивної потужності електродвигуна. За зменшення коефіцієнта завантаження питома споживання реактивної потужності зростає ще інтенсивніше. У середньому підвищення напруги на 1 % викликає збільшення реактивної потужності на 3 % і більше, що обумовлено зростанням струму холостого ходу і, відповідно, додатковими втратами активної потужності в елементах мережі.

Лампи розжарювання. Основними номінальними параметрами ламп розжарювання є споживана потужність $P_{\text{ном}}$, світловий потік $F_{\text{н}}$, світлова віддача $H_{\text{н}}$ та термін служби $T_{\text{н}}$. Усі ці характеристики суттєво залежать від напруги живлення. При відхиленнях напруги в межах $\pm 10\%$ їх зміни можуть бути описані наближеними емпіричними залежностями [13]:

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{U}{U_0} \right)^{-14}, \quad (1.4)$$

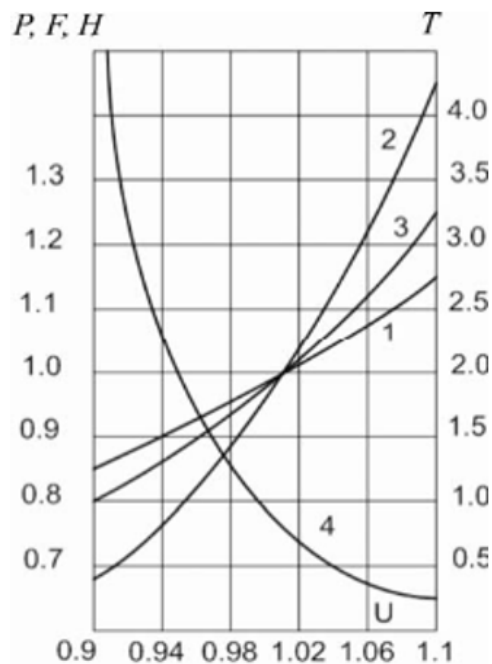
де T, T_0 — фактичний та номінальний терміни служби лампи;

U, U_0 — фактична та номінальна напруга відповідно.

З формули (1.4) випливає, що підвищення напруги на 10 % призводить до скорочення терміну служби лампи приблизно до 14 % від номінального.

На рис. 1.2 наведено залежності основних параметрів ламп розжарювання від напруги. Зі зменшенням напруги світловий потік різко знижується, тоді як при підвищенні напруги він зростає разом зі споживаною потужністю та світловою

віддачею. Водночас різко скорочується термін служби лампи, що супроводжується перевитратою електроенергії.



1 — споживана потужність; 2 — світловий потік; 3 — світлова віддача; 4 — термін служби

Рисунок 1.2 - Залежність параметрів ламп розжарювання від напруги,

За відхилення напруги на $\pm 1\%$ від номінального значення:

- потужність лампи змінюється приблизно на $\pm 1,5\%$;
- світловий потік — на $\pm 3,5\%$;
- світлова віддача — на $\pm 1,8\%$;
- термін служби — на $\pm 13\%$.

Так, за напруги 105% від номінальної термін служби лампи скорочується майже утричі (до ≈ 350 год замість 1000 год), а при напрузі 95% світловий потік становить близько $82,5\%$ від номінального.

Зміна напруги безпосередньо впливає на освітленість робочих місць, що, у свою чергу, відображається на продуктивності праці та втомлюваності персоналу. За даними [57], за умов зростання освітленості від 30 до 600% продуктивність праці підвищується від 85 до 109% (за базове значення 100% прийнято освітленість 50

лк).

Люмінесцентні лампи. Люмінесцентні лампи характеризуються меншою чутливістю до відхилень напруги порівняно з лампами розжарювання. При зміні напруги в межах $\pm 1\%$ світловий потік змінюється приблизно на $\pm 1\%$, а світлова віддача — лише на $\pm 0,5\%$.

Разом з тим, при напрузі 93–94 % номінальної лампа може не запалюватися, а за напруги 106–107 % відбувається перегрів пускорегулювальної апаратури. За знижених значень напруги погіршуються умови запалювання, що прискорює зношування електродів. У середньому при відхиленні напруги на 10 % термін служби люмінесцентних ламп скорочується на 20–25 %. Суттєвим недоліком є також зростання споживання реактивної потужності зі збільшенням напруги живлення [14].

Ультрафіолетові лампи. Еритемні та бактерицидні лампи не забезпечують запалювання при зниженні напруги на 10 % і більше. У межах $\pm 10\%$ зміни напруги світловий потік змінюється приблизно на 2 % на кожен відсоток відхилення напруги. Номінальний термін служби таких ламп становить 800–1000 год, проте при підвищенні напруги він різко скорочується.

Побутова електронна техніка. Відхилення напруги негативно позначаються на роботі та довговічності побутової електроніки (радіо- і телевізійна апаратура, засоби зв'язку, комп'ютерна техніка). Зниження напруги погіршує якість зображення, а її підвищення призводить до прискореного старіння елементної бази. Так, підвищення напруги в ланцюгах розжарення електронних ламп, яке спричиняє зростання температури катода лише на 3 %, може зменшити термін служби емітуючої поверхні приблизно вдвічі [16].

Нагрівальні побутові прилади (електроплити, праски) менш чутливі до коливань напруги, однак їх споживана потужність змінюється пропорційно квадрату напруги. Наприклад, при напрузі 90 % від номінальної електропраска потужністю 400 Вт розвиває лише близько 324 Вт.

Вентильні перетворювачі. Вентильні перетворювачі здійснюють автоматичне регулювання випрямленого струму шляхом зміни кута керування. За підвищення

напруги в мережі кут керування зростає, а за зниження — зменшується. Збільшення напруги на 1 % викликає зростання споживаної реактивної потужності приблизно на 1,0–1,4 %, що призводить до зниження коефіцієнта потужності. Разом з тим, інші експлуатаційні показники перетворювачів при підвищеній напрузі поліпшуються, тому допустиме підвищення напруги на їх затискачах є доцільним у межах нормативних значень [15].

Електричні печі та зварювальні установки. Електричні печі є надзвичайно чутливими до відхилень напруги. Так, зниження напруги електродугових печей на 7 % може призвести до збільшення тривалості плавлення сталі у 1,5 раза, тоді як підвищення напруги на 5 % і більше спричиняє істотну перевитрату електроенергії.

Коливання напруги негативно впливають і на роботу електрозварювального обладнання. Зокрема, машини точкового зварювання при зміні напруги на 15 % можуть виробляти повністю браковану продукцію [16].

1.3.2. Вплив несиметрії напруги

Несиметричний розподіл навантаження між фазами неминує приводить до перекосу фазних напруг: частина однофазних електроприймачів опиняється під завищеною напругою, а інша — під заниженою. На затискачах трифазних споживачів формується несиметрична система напруг, причому для перевантаженої фази відхилення можуть виходити за межі нормально допустимих значень, тоді як для інших фаз залишатися в межах нормативу. За таких умов помітно погіршується робота як електроприймачів, так і елементів мережі, знижується надійність електрообладнання та електропостачання в цілому.

Несиметрія напруги негативно відображається на всіх складових електроенергетичної системи: спричиняє додаткові втрати активної потужності, прискорює зношування (старіння) ізоляції, погіршує економічні показники експлуатації обладнання [2, 4, 6]. Далі наведено найбільш типові прояви для поширених груп споживачів.

Асинхронні електродвигуни. В умовах перекосу напруг визначальним

чинником погіршення режиму роботи асинхронних двигунів є складова зворотної послідовності. Еквівалентний опір двигуна для зворотної послідовності близький до опору загальмованого (пускового) режиму, тобто приблизно у 5–8 разів менший за опір прямої послідовності. Тому навіть невеликий перекис напруги здатний викликати значні струми зворотної послідовності. Такі струми накладаються на струми прямої послідовності, формують протидіючий електромагнітний момент та спричиняють додатковий нагрів статора і ротора (особливо масивних частин ротора). Наслідком є прискорене старіння ізоляції та вимушене зниження допустимої потужності двигуна [10–17]. Зокрема, для повністю завантаженого асинхронного двигуна за несиметрії напруги на рівні 4 % ресурс може зменшуватися приблизно вдвічі, а при 5 % — допустима потужність знижується орієнтовно на 5–10 % [9].

Синхронні машини. У синхронних машинах поява струмів зворотної послідовності супроводжується додатковими втратами активної потужності та підвищеним нагрівом статора і ротора. Окрему небезпеку становлять знакозмінні електромагнітні моменти й пульсуючі тангенційні сили з подвоєною частотою мережі, які можуть викликати вібрації. За значного перекосу напруги така вібрація стає критичною, особливо при наявності дефектів і недостатній міцності конструктивних елементів (зокрема, зварних з'єднань). Водночас за несиметрії струмів до 30 % небезпечні перенапруги в елементах конструкції зазвичай не виникають [16].

Відповідно до вимог ПТЕ електричних мереж і станцій допускається тривала робота генераторів та синхронних компенсаторів при нерівності фазних струмів за умови, що різниця струмів не перевищує 10 % від номінального струму статора для турбогенераторів та 20 % — для гідрогенераторів, а фазні струми при цьому не виходять за номінальні значення. Якщо ці умови не забезпечуються, необхідні спеціальні заходи з обмеження несиметрії.

Електричні мережі та лінії. За наявності перекосу напруг у лініях електропередачі з'являються струми зворотної та нульової послідовностей, що підвищує сумарні струми в окремих фазах і, як наслідок, збільшує втрати активної

потужності та теплове навантаження провідників. Струми нульової послідовності протікають через заземлювальні пристрої, що може викликати їх додаткове підсушування та зростання опору заземлення. Це погіршує умови роботи релейного захисту, може впливати на низькочастотні системи зв'язку та пристрої залізничного блокування.

Трансформатори. Подача несиметричної напруги на трансформатор за наявності складових зворотної та нульової послідовностей спричиняє перекис вторинних напруг [19]. Перевантаження та додатковий нагрів прискорюють старіння ізоляції і зменшують строк служби трансформаторів. Якщо граничне завантаження визначати за умовою рівності струму в найбільш навантаженій фазі з номінальним струмом, то в режимі несиметрії пропускна здатність трансформатора може знижуватися приблизно на 42 % від потужності однофазного еквівалентного навантаження [22].

Конденсаторні установки. При несиметрії напруг конденсаторні батареї нерівномірно завантажуються по фазах реактивною потужністю, що унеможливорює повне використання їх встановленої потужності. Більше того, такі установки можуть підсилювати вже наявний перекис: у фазі з найменшою напругою віддача реактивної потужності в мережу буде меншою, ніж у фазах з більшою напругою [10, 18, 22, 23].

Однофазні споживачі та перетворювальні пристрої. Перекис напруг помітно впливає і на однофазні навантаження. Наприклад, лампи розжарювання у фазі з підвищеною напругою забезпечують більший світловий потік, але мають значно менший ресурс, ніж лампи у фазі зі зниженою напругою. Несиметрія ускладнює роботу релейного захисту, спричиняє похибки обліку електроенергії тощо.

Для випрямлячів і перетворювальних пристроїв несиметрія означає нерівномірний розподіл струмів по вентилях: частина елементів працює недовантажено, що знижує доступну вихідну потужність. Крім того, у формах змінної та випрямленої напруги з'являються неканонічні гармоніки, можливі небажані резонансні режими [16, 17, 22], а також поява субгармонік [16, 18]. За несиметрії суттєво зменшується ефективність багатофазного випрямлення (яке зазвичай застосовують для зменшення пульсацій), оскільки амплітуда гармонік

подвоєної частоти виявляється пропорційною рівню напруги зворотної послідовності.

Несиметричні режими також викликають додаткові відхилення напруги на затискачах однофазних чутливих споживачів (освітлення, телевізійні приймачі тощо) [17, 22], погіршують роботу інверторів, зменшують стійкість систем і міжсистемних зв'язків, а також призводять до значних похибок обліку електроенергії [18]. Так, за амплітудно-фазової несиметрії напруги та струмів похибка індукційних лічильників може досягати 33 % [23].

За даними [11, 20, 22] виконано низку досліджень, спрямованих на аналіз і зниження несиметрії напруг у системах електропостачання сільськогосподарських споживачів. Однак з огляду на зміни структури навантажень і режимів роботи споживачів за останні роки, питання симетрування напруги в сільських мережах залишається актуальним.

1.3.3. Вплив несинусоїдальності напруги

Електроприймачі з нелінійними вольт-амперними характеристиками, підключені до мережі із синусоїдальною напругою, споживають несинусоїдальні струми. Проходячи через елементи мережі, ці струми створюють додаткові падіння напруги на їх опорах і, накладаючись на основну синусоїду, викликають деформацію форми кривої напруги. Тому нелінійні навантаження фактично виступають джерелами вищих гармонік.

Найбільш суттєві порушення якості електроенергії зазвичай спостерігаються під час роботи потужних керованих вентильних перетворювачів, електродугових сталеплавильних і рудотермічних печей, установок дугового та контактного зварювання, газорозрядних ламп, трансформаторів тощо.

Вентильні перетворювачі залежно від схеми випрямлення генерують гармоніки струму різних порядків: для 6-пульсної (6-фазної) схеми — до 19-ї гармоніки, для 12-пульсної (12-фазної) — до 25-ї включно [6, 7]. Для мереж з електродуговими сталеплавильними та рудотермічними печами коефіцієнт

спотворення синусоїдальності напруги здебільшого визначається гармоніками 2, 3, 4, 5, 7-го порядків. Для установок дугового і контактного зварювання основний внесок роблять 5, 7, 11 та 13-та гармоніки.

Для газорозрядних ламп струм 3-ї гармоніки становить близько 10 % від струму 1-ї гармоніки, а 5-ї — приблизно 3 %. Оскільки ці складові в лінійних проводах мають однакову фазу, вони додаються в нульовому провіднику мереж 380/220 В, формуючи струм у «нулі», який може бути майже рівним фазному струму. Вклад інших гармонік для таких ламп зазвичай є малим і ним часто нехтують [6, 7].

Вищі гармоніки струму та напруги зумовлюють додаткові втрати активної потужності у всіх елементах системи електропостачання (лінії, трансформатори, електричні машини, статичні конденсатори), оскільки їх опори залежать від частоти.

Лінії та кабельні мережі. Гармонічні складові струму спричиняють додаткові втрати енергії та зростання падіння напруги в лініях, а також погіршують умови роботи кабельної ізоляції [7, 8]. Додаткові втрати в кабелях виникають через:

- збільшення діючого значення несинусоїдального струму;
- зростання активного опору провідника внаслідок поверхневого ефекту;
- збільшення діелектричних втрат в ізоляції.

Це призводить до підвищення температури провідників і прискорення старіння ізоляції. Якщо при 50 Гц поверхневий ефект майже не проявляється, то вже на 350 Гц (7-ма гармоніка) і вище він стає суттєвим [16, 17]. Зі зростанням частоти збільшуються активний та ємнісний опори, що поглиблює падіння напруги і підсилює її спотворення.

Дослідження показали, що для силових кабелів, які працюють при рівні гармонік у напрузі 6,0–8,5 %, струми витоку через 2,5 року експлуатації можуть бути на 36 % більшими, а через 3,5 року — на 43 % більшими порівняно з кабелями, що працювали при практично синусоїдальній напрузі [16]. За значних гармонічних складових у кабельних мережах частіше виникають короткі однофазні замикання, при цьому знижується ефективність дугогасних засобів. Навіть за резонансного настроювання дугогасних апаратів однофазні замикання нерідко переходять у двофазні та трифазні через «пропалювання» кабелю: великі струми вищих гармонік

підтримують ушкодження, і самовідновлення не відбувається. Як наслідок зростає аварійність, кількість ремонтів і витрати на експлуатацію. За рівня гармонік 5–10 % амортизаційні відрахування та вартість поточних ремонтів кабельних ліній збільшуються на 15–20 %, а при 10–25 % — на 30 % і більше [17].

Трансформатори та електромагнітні елементи. У трансформаторах вищі гармоніки викликають додаткові втрати на гістерезис і вихрові струми в магнітопроводі, а також збільшують втрати в обмотках через зростання активного опору зі збільшенням частоти [16, 17, 21]. Високочастотні складові сприяють виникненню вихрових струмів в обмотках, що посилює нагрів і скорочує ресурс. За навантажень, близьких до максимальних, додаткові втрати можуть призводити до перегріву та пошкодження ізоляції аж до виходу трансформатора з ладу [16, 17, 19]. Додатково в трансформаторах, дроселях та інших електромагнітних пристроях гармонічні струми створюють електродинамічні зусилля, що спричиняють підвищення акустичного шуму [16, 18, 22].

Дослідження струму намагнічування трансформаторів, підключених до мережі синусоїдальної напруги, показали: для тристрижневих осердь і схем з'єднання «зірка–зірка–нуль» та «трикутник–зірка–нуль» у мережі присутні всі непарні гармоніки, у тому числі кратні трьом. Гармоніки, кратні трьом, пов'язані з несиметрією намагнічувальних струмів по фазах. Для таких гармонік формуються системи струмів прямої та зворотної послідовностей, рівні за модулем; для інших непарних гармонік струми зворотної послідовності становлять орієнтовно 0,25 від струмів прямої послідовності. Якщо на ввіді трансформатора присутня несинусоїдальна напруга, додатково виникають складові вищих гармонік струму.

У цілому несинусоїдальні режими мають багато спільного з несиметричними за характером наслідків: додаткові втрати, нагрів, погіршення надійності та ресурсу обладнання.

Конденсаторні батареї та компенсація реактивної потужності. Конденсатори, призначені для компенсації реактивної потужності, при підвищенні частоти мають менший реактивний опір. Тому за наявності вищих гармонік у напрузі живлення їх опір на цих частотах значно менший, ніж на 50 Гц. У результаті навіть невеликі

гармонічні напруги здатні викликати помітні гармонічні струми в конденсаторах. На об'єктах із значною часткою нелінійних навантажень батареї конденсаторів часто працюють незадовільно: відключаються захистом від перевантаження струмом або достроково виходять з ладу через нагрів, «спучування» корпусів і прискорене старіння ізоляції [17]. Загалом конденсатори є одними з найчутливіших елементів до дії вищих гармонік.

Електричні машини, автоматика, облік та зв'язок. Вищі гармоніки у синхронних і асинхронних машинах формують паразитні електромагнітні поля та моменти, що погіршують механічні характеристики й ККД. Через підвищений нагрів і незворотні фізико-хімічні процеси під дією гармонічних полів прискорюється старіння ізоляції машин, трансформаторів, кабелів; погіршується коефіцієнт потужності; виникають збої в роботі автоматики, телемеханіки, комп'ютерної техніки; зростають похибки вимірювання і порушуються режими роботи вентильних перетворювачів [18]. Негативний вплив гармонік проявляється не лише в обладнанні споживачів, але й у власних електронних пристроях енергосистем.

Слід підкреслити, що в реальних умовах несинусоїдальність напруги зазвичай діє разом з іншими факторами (відхиленнями рівня напруги, несиметрією тощо), тому коректна оцінка має враховувати їх сукупність.

Наявність гармонік у напрузі живлення асинхронних двигунів спричиняє появу гармонічних складових струму і магнітного потоку, наведення гармонік ЕРС і виникнення гармонічних струмів у роторі [17, 18]. Взаємодіючи з основним магнітним полем, ці складові створюють додаткові механічні моменти (наприклад, 5-та гармоніка формує поле, що обертається у протилежний бік відносно поля 1-ї гармоніки, а 7-ма — обертається з іншою кутовою швидкістю) [16, 17]. Це призводить до пульсацій крутного моменту, підвищених навантажень і зносу підшипників. В екстремальних випадках можливе виникнення вібрацій на резонансних частотах обертових мас, накопичення втоми металу та ризик руйнування вала ротора [17–19]. Гармоніки також викликають перегрів через додаткові втрати (зростання активного опору обмоток зі збільшенням частоти, втрати на гістерезис і вихрові струми в магнітопроводі) [17–19, 23], а також втрати

в демпферних обмотках ротора через різницю швидкостей обертання гармонічних полів і ротора [7–9]. Сумарно це знижує ресурс ізоляції та погіршує надійність.

Гармонічні складові ускладнюють компенсацію реактивної потужності батареями конденсаторів, оскільки можливі резонансні явища на частотах вищих гармонік, що здатні спричинити пошкодження конденсаторів і скорочувати їх ресурс [16–18, 22].

Несинусоїдальні режими погіршують роботу засобів контролю, автоматики, телемеханіки та зв'язку. Облік електроенергії у таких умовах супроводжується значними похибками, які залежать від типу лічильника, його частотної характеристики та місця встановлення. Індукційні лічильники мають, як правило, негативну частотну похибку (недооблік), тоді як електронні та цифрові — позитивну (переоблік) [19]. Можливі збої і відмови комп'ютерного обладнання. Якщо телекомунікаційні або керуючі лінії проходять поруч із силовими мережами, якими протікають струми вищих гармонік, у них можуть наводитися завади та спотворення сигналів [20].

Крім того, гармоніки можуть викликати помилкове спрацювання запобіжників і автоматичних вимикачів через їх додатковий внутрішній нагрів, зумовлений поверхневим ефектом та ефектом близькості [22]. Також можливі спотворення зображення і зміна яскравості телевізорів [9]. У світильниках з газорозрядними лампами та баластними пристроями, що містять конденсатори, за певних умов може виникати резонанс, який призводить до передчасного виходу з ладу ламп [23].

Висновки до розділу 1

1. У сільських електричних мережах 380/220 В найбільш характерними порушеннями якості електроенергії є відхилення напруги від номінального значення, фазна несиметрія та несинусоїдальність форми напруги, тоді як частота, як правило, залишається стабільною через роботу в складі об'єднаної енергосистеми.

2. Аналіз літературних даних і результатів вимірювань підтверджує, що рівень

відхилень напруги та несиметрії у сільських мережах нерідко перевищує нормативно допустимі межі, а струми в нульовому провіднику можуть досягати значних величин, що погіршує умови експлуатації мережі.

3. Причини несиметрії переважно пов'язані з високою питомою вагою однофазних навантажень у сільському секторі, випадковим характером їх вмикання/вимикання.

4. Показано, що несиметрія вхідної напруги та нерівномірність струмів навантаження трансформаторів формують складові зворотної та нульової послідовностей, що призводить до перекосу вторинних напруг і підвищеного нагріву, особливо для трансформаторів зі схемами, чутливими до нульової послідовності.

5. Несинусоїдальність напруги зумовлюється протіканням у мережі струмів вищих гармонік, джерелами яких виступають нелінійні навантаження (вентильні перетворювачі, зварювальні установки, дугові печі, газорозрядні лампи, сучасні електронні пристрої тощо). Це викликає деформацію форми напруги та створює передумови до резонансних явищ.

6. Встановлено, що відхилення напруги, несиметрія та гармонічні спотворення погіршують роботу електроприймачів: знижують пускові й робочі характеристики електродвигунів, прискорюють старіння ізоляції, зменшують ресурс освітлювальних джерел, підвищують чутливість апаратури та електроніки до перенапруг і просідань.

7. Для мережі загалом наслідками порушень якості електроенергії є зростання втрат активної потужності, підвищене теплове навантаження ліній і трансформаторів, погіршення умов роботи релейного захисту та засобів зв'язку, а також помітні похибки обліку електроенергії в умовах несиметричних і несинусоїдальних режимів.

8. Отримані узагальнення підтверджують актуальність задачі зниження несиметрії та рівнів гармонічних спотворень у сільських мережах і обґрунтовують необхідність подальшого розгляду технічних рішень щодо симетрування навантажень, оптимізації режимів трансформаторів та застосування засобів компенсації/фільтрації гармонік у наступних розділах роботи.

2 АНАЛІЗ ОСНОВНИХ СПОСОБІВ ЗМЕНШЕННЯ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГИ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Нерівномірний розподіл навантажень між фазами трифазної мережі призводить до виникнення несиметрії фазних струмів. У свою чергу, несиметрія струмів є причиною появи перекосу напруг у мережі. Тому усунення або зменшення несиметрії струмів є необхідною умовою нормалізації режимів роботи трифазних систем електропостачання [4–9].

Найпростішим способом зменшення несиметрії напруги (і струмів) у процесі експлуатації систем електропостачання є природне вирівнювання фазних струмів, яке досягається шляхом максимально рівномірного розподілу однофазних навантажень між фазами [4].

Проте на практиці реалізувати повне вирівнювання навантажень, як правило, не вдається. Це зумовлює необхідність застосування спеціальних технічних методів і засобів симетрування трифазних систем. До відносно простих шляхів зменшення несиметрії напруги відносять також збільшення перерізів фазних проводів та підвищення потужності трансформаторів живлення [9]. У чотирипровідних мережах додатково намагаються знизити опір нульового провідника різними конструктивними методами [4].

Однак зазначені підходи мають обмежену ефективність, оскільки пов'язані зі значними витратами дефіцитних і дорогих матеріалів та не забезпечують повного усунення несиметрії напруги. Ситуація ускладнюється тим, що в останні роки структура електричних навантажень зазнала суттєвих змін: зросла кількість потужних однофазних споживачів (зокрема електрошлакових печей), а також істотно збільшилася одинична потужність трифазних електроприймачів [5–7].

На сучасному етапі для зменшення або усунення несиметрії застосовують спеціальні симетрувальні пристрої (СП), які забезпечують компенсацію струмів нульової та зворотної послідовностей [7]. Узагальнюючи відомі технічні рішення, способи симетрування трифазних систем доцільно класифікувати таким чином:

- перетворювальні способи, що базуються на перетворенні виду енергії;
- комутаційні способи, які передбачають циклічне перемикання однофазних навантажень між фазами мережі [3, 4];
- фільтрові способи, засновані на відмінностях параметрів мережі для складових різних фазових послідовностей [6, 7];
- компенсаційні способи, що реалізують компенсацію струмів або напруг нульової та зворотної послідовностей за допомогою спеціальних симетрувальних пристроїв [6, 7, 9–14].

2.1 Розрахунок несиметрії напруги

Відповідно до ГОСТ 13109–97, напруга зворотної послідовності U_2 визначається за відомими лінійними напругами U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} за формулою

$$U_2 = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3}U_{AB} - \sqrt{4U_{BC}^2 - \left(\frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} + U_{AB} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} \right)^2 \right]} \quad (2.1)$$

З похибкою, що не перевищує 1 %, величину U_2 допускається визначати за наближеним виразом

$$U_2 = \frac{2}{3} \sqrt{(\Delta U_{BC} - \Delta U_{CA})^2 + \Delta U_{BC} \Delta U_{CA}}, \quad (2.2)$$

де $\Delta U_{BC} = U_{BC} - U_{AB}$; $\Delta U_{CA} = U_{CA} - U_{AB}$.

Для напруги прямої послідовності U_1 стандартом ГОСТ 13109–97 рекомендовано використовувати співвідношення:

$$U_1 = \frac{1}{3}(U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}) \quad (2.3)$$

Коефіцієнт напруги зворотної послідовності визначається за формулою (2.4). Ключовим етапом розрахунку є знаходження U_2 , яку доцільно представляти через еквівалентні параметри зворотної послідовності:

$$U_2 = I_{2\Sigma} z_{2\Sigma} \quad (2.4)$$

де $I_{2\Sigma}$ — еквівалентний струм зворотної послідовності, що формується несиметрією навантажень;

$z_{2\Sigma}$ — еквівалентний опір мережі для зворотної послідовності..

Струм зворотної послідовності I_2 та його початкова фаза $\varphi_{2\Sigma}$ при підключенні трьох однофазних навантажень до лінійних напруг AB , BC , CA визначаються співвідношеннями:

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{3} \sqrt{I_{AB}^2 + I_{BC}^2 + I_{CA}^2 - I_{AB}I_{BC} - I_{BC}I_{CA} - I_{CA}I_{AB}} \quad ; \quad (2.5)$$

$$\varphi_{I_2} = \arctg \frac{\sqrt{3} (I_{AB} + I_{BC} - 2I_{CA})}{I_{AB} - I_{BC}} - \varphi_{11} \quad (2.6)$$

У разі задання повних потужностей однофазних навантажень:

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{3U_{ном}} \sqrt{S_{AB}^2 + S_{BC}^2 + S_{CA}^2 - S_{AB}S_{BC} - S_{BC}S_{CA} - S_{CA}S_{AB}} \quad ; \quad (2.7)$$

$$\varphi_{I_2} = \arctg \frac{\sqrt{3} (S_{AB} + S_{BC} - 2S_{CA})}{S_{AB} - S_{BC}} - \varphi_{11} \quad (2.8)$$

При підключенні двох однофазних навантажень до лінійних напруг AB і BC відповідні вирази набувають вигляду:

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{3U_{\text{ном}}} \sqrt{S_{AB}^2 + S_{BC}^2 - S_{AB}S_{BC}}; \quad (2.9)$$

$$\phi_2 = \arctg \frac{\sqrt{3}}{3} \frac{S_{AB} + S_{BC}}{S_{AB} - S_{BC}} - \phi_n. \quad (2.10)$$

Слід зазначити, що при живленні однофазних навантажень із фазовим кутом ϕ_n від пари лінійних напруг початкова фаза струму зворотної послідовності $\phi_{I_{2П}}$ змінюється в межах, наведених у таблиці 2.1..

Таблиця 2.1 — Межі зміни фазового кута струму зворотної послідовності

Пара лінійних напруг	Межі зміни $\phi_{I_{2П}}$
AB та BC	$30^\circ - \phi_n \leq \leq 150^\circ - \phi_n$
BC та CA	$150^\circ - \phi_n \leq \leq 270^\circ - \phi_n$
CA та AB	$270^\circ - \phi_n \leq \leq 30^\circ - \phi_n$

Відносні значення модуля $Z_{2\Sigma}$ (у частках повного опору прямої послідовності), а також фазовий кут еквівалентного опору зворотної послідовності секції (або системи) шин визначаються за виразами:

$$Z_{2\Sigma} = \frac{S_{\text{ном}\Sigma}}{\sqrt{\left(\sum_{n=1}^n S_{\text{ном}n}^{(n)} y_n^{(n)} \cos \varphi_n + \sum_{l=1}^n S_{\text{ном}l}^{(l)} y_l^{(l)} \cos \varphi_l\right)^2 + \left(\sum_{n=1}^n S_{\text{ном}n}^{(n)} y_n^{(n)} \sin \varphi_n + \sum_{l=1}^n S_{\text{ном}l}^{(l)} y_l^{(l)} \sin \varphi_l\right)^2}}; \quad (2.11)$$

$$\arg z_{2\Sigma} = \arctg \frac{\sum_{n=1}^n S_{\text{ном}n}^{(n)} y_n^{(n)} \sin \varphi_n + \sum_{l=1}^q S_{\text{нр}l}^{(nl)} y_l^{(nl)} \sin \varphi_l}{\sum_{n=1}^n S_{\text{ном}n}^{(n)} y_n^{(n)} \cos \varphi_n + \sum_{l=1}^q S_{\text{нр}l}^{(nl)} y_l^{(nl)} \cos \varphi_l} \quad (2.12)$$

де $S_{\text{ном}n}^{(n)}$ та φ_n – номінальна повна потужність та фазовий кут n -го приєднання лінійної частини навантаження; $S_{\text{нр}l}^{(nl)}$ та φ_l – розрахункове значення потужності та відповідний їй кут нелінійного навантаження l -го приєднання; $y_n^{(n)}$ – Відносна провідність зворотної послідовності n -го виду лінійного навантаження; $y_l^{(nl)}$ – Відносна провідність зворотної послідовності нелінійного навантаження при потужності $S_{\text{нр}l}^{(nl)}$; $S_{\text{н}\Sigma}$ – повна номінальна потужність навантажень підстанції.

Останні вирази можна подати у більш компактному вигляді:

$$z_{2\Sigma} = \frac{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n S_{\text{ном}i} \cos \varphi_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n S_{\text{ном}i} \sin \varphi_i\right)^2}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n S_{\text{ном}i} y_i \cos \varphi_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n S_{\text{ном}i} y_i \sin \varphi_i\right)^2}}; \quad (2.13)$$

$$\arg z_{2\Sigma} = \arctg \frac{\sum_{i=1}^n S_{\text{ном}i} y_i \sin \varphi_i}{\sum_{i=1}^n S_{\text{ном}i} y_i \cos \varphi_i}; \quad (2.14)$$

де S_n , y_i , φ_i – повна номінальна потужність, відносне значення провідності зворотної послідовності та фазовий кут i -го приєднання лінійної (нелінійної) частини навантаження.

Вирази визначення опорів зворотної послідовності елементів СЕС наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Вирази визначення опорів зворотної послідовності елементів СЭС

Вид навантаження	Вирази для розрахунку опорів зворотної послідовності	Примітка
ЦД	$x_{2с,д} = U_{110кВ}^2 x_{2с} / S_{110кВ}$	За відсутності каталожних даних приймається $x_2 = 1/Kn$
АТ	$x_{2с,д} = U_{110кВ}^2 x_{с} / S_{110кВ}$	Kn - кратність пускового струму;
Двообмотувальні трансформатори та реактори	$x_{2с} = U_{110кВ}^2 e_{с} / S_{110кВ}$	$e_{с}$ - Відносне значення ЕРС КЗ. При відсутності каталожних даних приймається $e_{с} = 0,1$. Для реакторів замість береться x_p
Триобмотувальні трансформатори з розщепленими обмотками, здвоєні реактори для кожної обмотки	$x_{2с} = U_{110кВ}^2 x_{с} / S_{110кВ}$	$x_{с}$ - відносний реактивний опір обмотки
БК	$x_{2БК} = U_{110кВ}^2 / Q_{БК}$	
ВП	$z_{2ВП} = 2U_{110кВ}^2 / S$	S - Повне навантаження ВП $\underline{z} = \cos \varphi + j \sin \varphi$, де $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності ВП із навантаженням
ДСП та руднотермічні печі	$z_{2п} = U_{110кВ}^2 / S$	Те саме
Навантаження освітлювальні	$r_{2п} = 4U_{110кВ}^2 / P$	P – потужність навантаження
Живлення ЕЕС	$x_{2с} = U_{110кВ}^2 / S_{к}$	$S_{к}$ - Потужність КЗ

За результатами аналізу останніх 10–15 років встановлено, що у навантаженнях підприємств істотно зросла частка вентильних перетворювачів і дугових сталеплавильних печей, опори зворотної послідовності яких суттєво впливають на значення $z_{2с}$. Для ілюстрації цього в таблиці 2.3 наведено характерні значення параметрів вузлів мережі 110 кВ, до яких приєднані підстанції промислових підприємств, міст і залізничного транспорту.

Таблиця 2.3 - Значення Z_{Σ} і $|Z_{\Sigma}|$ для вузлів мереж 110 кВ

Виробництво	Z_{Σ}	$ Z_{\Sigma} $
Прокатний цех	$0,51 + j 0,68$	0,85
Машинобудівний завод	$0,33 + j 0,49$	0,59
Промисловий центр	$0,50 + j 0,68$	0,83
Завод кольорових металів	$0,49 + j 0,52$	0,72
Папероробний комбінат	$0,15 + j 0,59$	0,38
Тягова підстанція	$1,12 + j 0,36$	1,24
Хімічний завод	$0,21 + j 0,46$	0,51

У розподільчих мережах підприємств, що живляться від магістральних мереж енергосистеми, за потужності короткого замикання на шинах 6–10 кВ $S_k \geq 200$ МВА допустимо приймати

$$Z_{2\Sigma} \approx x_E, x_E = \frac{U_{\text{НСЕС}}^2}{S_k}.$$

Опір зворотної послідовності 6-пульсного мостового вентильного перетворювача за схем з'єднання трансформаторів Y/Y або Y/Δ , а також для 12-пульсних перетворювачів, становить

$$Z_{2ВП} = 2Z_{1ВП} \quad [43]$$

Відповідно, струм зворотної послідовності таких перетворювачів може бути поданий у вигляді

$$I_{3ВП} = 0,5K_{3U}I_{3ВП}, \arg I_{3ВП} = \varphi_{3н} + \alpha, \quad (2.15)$$

де α - кут керування вентильного перетворювача;

$\varphi_{3н}$ — початкова фаза напруги зворотної послідовності, зумовлена несиметрією навантажень.

Діючі значення струмів зворотної послідовності дугових сталеплавильних печей є максимальними у фазі розплавлення та, як показують дослідження, підкоряються нормальному закону розподілу

$$MI_2^{(n)} = \frac{I_{2max}^{(n)}}{2}; \sigma_2^{(n)} = \frac{I_{2max}^{(n)}}{6}. \quad (2.16)$$

При цьому величина визначається за номінальним струмом ДСП і коефіцієнтом кратності експлуатаційного струму:

$$I_{2max}^{(n)} = \frac{I_{ном} k_{2,д}}{2}. \quad (2.17)$$

Для оцінювання параметрів несиметричних режимів у вузлах мережі розрахунок виконується з використанням схеми заміщення зворотної послідовності, яка за структурою аналогічна схемі прямої послідовності, але всі елементи вводяться своїми опорами зворотної послідовності. Несиметричне навантаження при цьому розглядається як джерело струму зворотної послідовності.

Струм зворотної послідовності I_{2q} у q -ій гілці, зумовлений джерелом струму зворотної послідовності I_{2p} у p -ій гілці, визначається співвідношенням:

$$I_{2q} = K_{2pq} I_{2p}, \quad (2.18)$$

де K_{2pq} — коефіцієнт розподілу струмів зворотної послідовності між відповідними гілками схеми.

За наявності кількох джерел несиметрії, підключених у різних вузлах мережі,

$$I_{2q} = \sum_p K_{2pq} I_{2p}. \quad (2.19)$$

У подібних задачах доцільно застосовувати метод вузлових напруг. При цьому слід підкреслити, що прямий перерахунок значень коефіцієнта несиметрії для інших вузлів лише за значенням у вузлі з джерелом несиметрії (без використання схеми заміщення або вузлового методу) є некоректним.

2.2 Методи та засоби зниження несиметрії напруг

Несиметрію напруги, спричинену роботою несиметричних електроприймачів, можна обмежити до рівня $K_{2U} \leq K_{2U\text{доп}}$ двома основними шляхами: схемно-мережевими рішеннями та застосуванням спеціальних симетрувальних пристроїв.

Відомо, що за виконання співвідношення $S_k \geq 5S_{1\phi}$, де S_k — потужність короткого замикання у вузлі мережі, а $S_{1\phi}$ — потужність однофазного навантаження, коефіцієнт напруги зворотної послідовності, як правило, не перевищує допустимого $K_{2U\text{доп}}$. Звідси випливає практично важлива рекомендація: електроприймачі, які є джерелом перекосу, доцільно приєднувати до вузлів із достатньо великою потужністю КЗ. Наприклад, значні однофазні навантаження часто підключають через окремі трансформатори до шин 110–220 кВ, де S_k є високою. У ряді випадків відчутного зниження несиметрії можна досягти також раціональним розподілом навантажень між фазами. Якщо ж схемними заходами забезпечити нормативний рівень несиметрії неможливо, застосовують симетрувальні установки (СУ).

Симетрування за допомогою СУ по суті зводиться до компенсації еквівалентного струму зворотної послідовності, який породжується несиметричними навантаженнями, а отже — до зменшення відповідної напруги зворотної послідовності. У розгалужених системах електропостачання СУ можуть встановлюватися у кількох точках: кожна установка «обслуговує» свою ділянку мережі та групу приєднаних до неї несиметричних електроприймачів.

Кожна схема організації симетрування має специфічні переваги й обмеження. Індивідуальне симетрування дозволяє усувати несиметрію

безпосередньо біля конкретного споживача, проте встановлена потужність силових елементів СУ використовується не завжди оптимально. Централізований підхід потребує меншої встановленої потужності СУ, однак у мережевій частині, де розміщені несиметричні навантаження, несиметрія струмів зберігається. Груповий варіант є компромісом між двома попередніми та поєднує їх сильні й слабкі сторони. Остаточний вибір способу визначається параметрами мережі та характером навантажень.

За принципом дії СУ поділяють на некеровані та керовані — залежно від особливостей графіка навантаження і необхідності адаптації параметрів пристрою. На практиці відомо багато схем СУ, що реалізують як електричні, так і електромагнітні зв'язки між елементами. Кожне технічне рішення має власну область доцільного застосування, зумовлену вартістю, складністю регулювання, втратами та ефективністю компенсації.

Симетрувальні пристрої трансформаторного типу

СУ трансформаторного типу характеризуються значною різноманітністю. Використовуючи кілька трансформаторів або спеціальний трансформатор зі специфічним вмиканням між мережею та несиметричним навантаженням, формують потрібну систему напруг на навантаженні та досягають часткового вирівнювання лінійних струмів. Як приклад (рис. 2.1) можна навести живлення двофазного навантаження від трансформатора Скотта з відповідними векторними діаграмами струмів і напруг. Співвідношення витків обирають так, щоб вторинні напруги були однаковими. За такою схемою, зокрема, можуть живитися плавильні індукційні печі. Зазвичай такі СУ є індивідуальними та нерегульованими, а їх симетрувальні властивості істотно залежать від режиму навантаження.

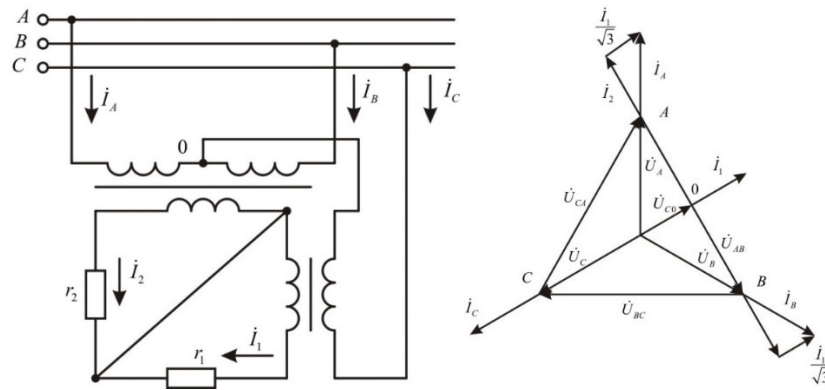


Рисунок 2.1 – Схема та векторна діаграма струмів і напруг при живленні двофазного навантаження від трансформатора Скотта.

СУ з електромагнітними зв'язками

Пристрої з електромагнітними зв'язками прийнято поділяти на дві підгрупи: дільникові (автотрансформаторні) та трансформаторні. У дільникових схемах встановлену потужність СУ часто приймають порівнянню з потужністю навантаження. Регулювання може реалізовуватися перемиканням відпаювань автотрансформатора, що дає можливість симетрувати нелінійні навантаження зі змінним коефіцієнтом потужності.

На рис. 2.2 показано автотрансформаторну схему з одним регульованим елементом. Зазвичай така схема є придатною за умов $\cos \varphi \leq 0,7$.

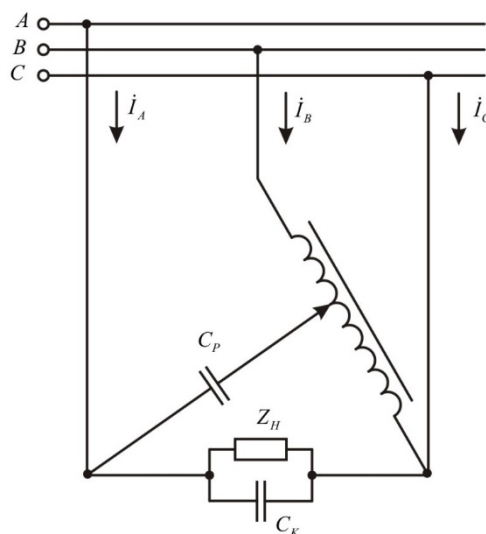


Рисунок 2.2 – Автотрансформаторна схема з одним регульованим елементом

Схема з двома регульованими елементами та (рис. 2.3) має кращі характеристики порівняно з попередньою і застосовується для навантажень із $\cos \varphi \approx 1$.

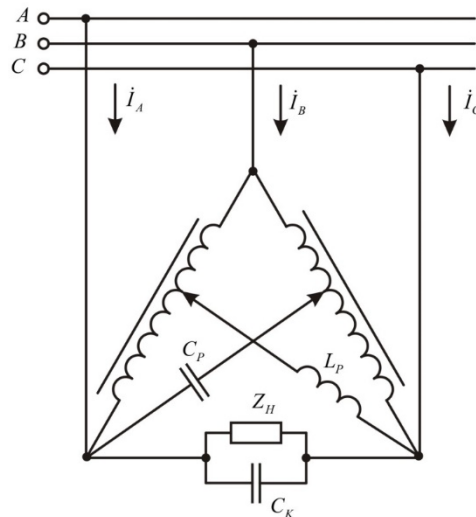


Рисунок 2.3 – Автотрансформаторна схема з двома регулюючими елементами..⁴

Індуктивно-ємнісні СУ. Схема Штейнметца

Індуктивно-ємнісні симетрувальні установки підключають паралельно несиметричному навантаженню та формують комбінацію індуктивних і ємнісних елементів. Найбільш поширеним рішенням є схема Штейнметца (рис. 2.4), роботу якої пояснює наведена там же векторна діаграма. Максимальна ефективність схеми досягається при коефіцієнті потужності навантаження, близькому до одиниці. Для активно-індуктивного навантаження додатково застосовують батарею конденсаторів C_2 . У цьому випадку потужності реактора та БК C_1 визначають з умови:

$$Q_L = Q_C = P_{\text{ном}} / \sqrt{3} \quad (2.20)$$

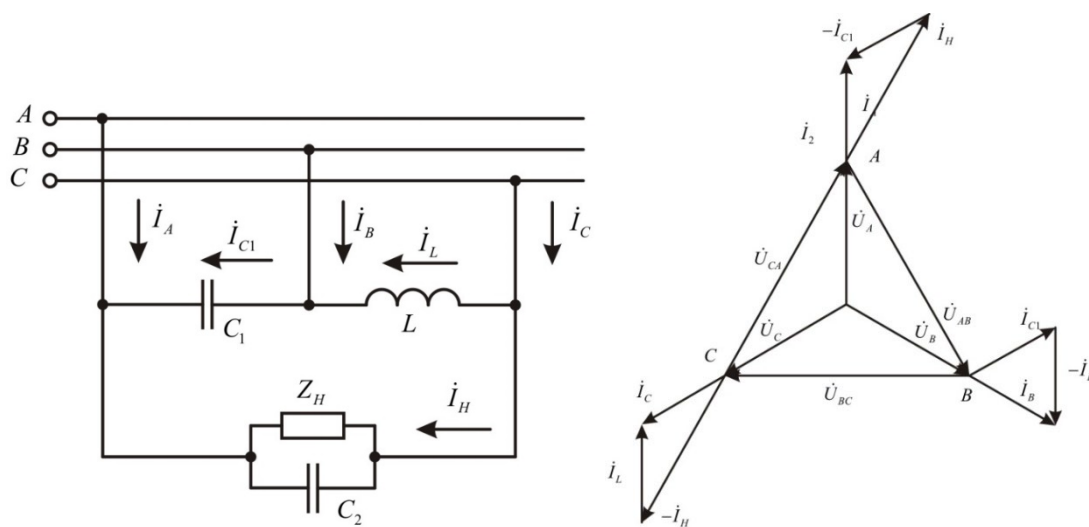


Рисунок 2.4 – Схема Штейнметца та векторна діаграма

Схема Штейнметца здатна забезпечувати симетрування і для активно-індуктивного навантаження без підключення конденсаторів C_2 , однак при цьому коефіцієнт потужності системи зменшується і може бути меншим за $\cos \varphi$ самого навантаження. Тоді параметри симетрувальних елементів обирають за умовою:

$$\left. \begin{aligned} Q_L &= 2S_n \cos \left(\varphi_n - \frac{\pi}{3} \right) / \sqrt{3}; \\ Q_C &= 2S_n \cos \left(\varphi_n + \frac{\pi}{3} \right) / \sqrt{3}, \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

де — повна потужність однофазного навантаження; — аргумент його опору.

Важливо підкреслити: при фіксованих значеннях симетрувальних елементів повне симетрування гарантовано лише для одного визначеного рівня навантаження. Якщо параметри навантаження змінюються так, що несиметрія може перевищувати допустиму, виникає потреба у керованих СУ. Водночас керування потрібне не завжди: достатньо, щоб напруга зворотної послідовності не виходила за допустиму межу з інтегральною ймовірністю 95 %. Для обґрунтування можливості використання некерованих СУ в умовах змінних навантажень необхідні статистичні дослідження параметрів несиметрії.

Керовані СУ можуть реалізовувати як безперервне (аналогове), так і ступінчасте (дискретне) регулювання.

Засоби керування ємнісними та індуктивними елементами

Дискретні батареї конденсаторів формують із кількох груп: одна група підключена постійно, інші — комутуються. Перемикання виконують контакторами або тиристорними ключами. Для плавного регулювання ємності практикують підключення паралельно конденсаторам керованих тиристорами реакторів. Недоліками такого підходу є потреба у додаткових реакторах (що збільшує втрати, встановлену потужність та габарити) і генерація вищих гармонік струму тиристорними елементами.

При дискретному керуванні індуктивністю реактор може складатися з кількох секцій або мати відпаювання. Плавне регулювання індуктивної складової забезпечують: тиристорним керуванням підмагнічуванням магнітопроводу (за наявності відповідної конструкції), зміною немагнітних зазорів або застосуванням ковзного контакту. На рис. 2.5 наведено приклади керованих СУ на базі схеми Штейнметца. Їх типовими обмеженнями є те, що повна потужність обладнання часто перевищує потужність навантаження, а діапазон регулювання є обмеженим

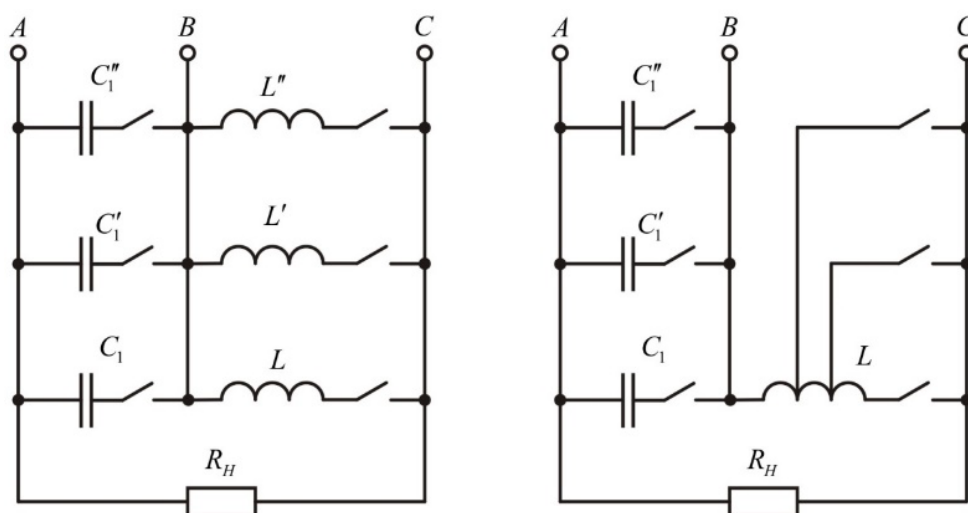


Рисунок 2.5 – Варіанти керованих СУ на основі схеми Штейнметца

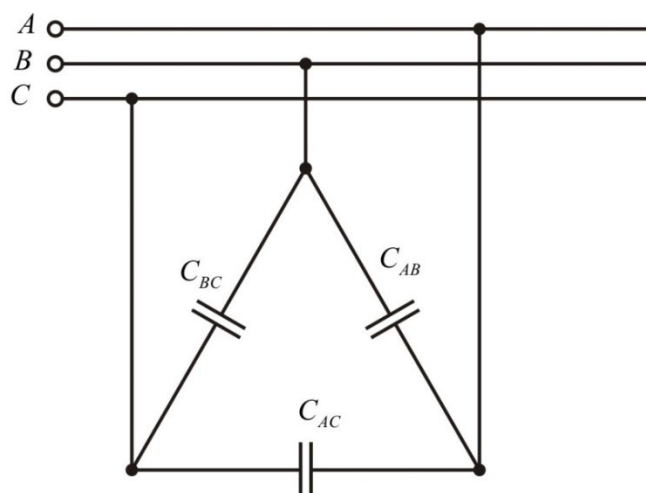


Рисунок 2.6 – Схема симетрування із застосуванням батарей конденсаторів

Симетрування батареями конденсаторів різної фазної потужності

Для симетрування системи лінійної напруги при однофазних, дво- та трифазних несиметричних навантаженнях широко використовують батареї конденсаторів з різними фазними потужностями, які одночасно виконують функцію компенсації реактивної потужності. Принципово важливо, що ємнісні СУ мають багатофункціональний характер, оскільки БК є джерелом реактивної потужності.

У практичних умовах повне симетрування (коли) часто є технічно або економічно невиправданим, тому застосовують часткове симетрування, при якому за рахунок непрямой компенсації або СУ забезпечується нормативний рівень.

Умову часткового симетрування можна записати так:

$$K_{2U} = I_{2\text{ост}} z_2 / U_{\text{ном}} \ll U_{2\text{дон}} / U_{\text{ном}} = K_{2U\text{дон}} = 0,02 \quad , \quad (2.22)$$

де $I_{2\text{ост}}$ – залишковий струм зворотної послідовності, зумовлений дією несиметричного навантаження та СУ;

$U_{2\text{дон}}$ - допустима напруга зворотної послідовності.

Для повного симетрування повинно виконуватись:

$$I_{2CU} = -I_{2U}, \quad (2.23)$$

де I_{2CU} и I_{2U} - комплекси струмів зворотної послідовності СУ та несиметричного навантаження.

Сумарну потужність ємнісного СУ обирають із умови компенсації реактивної потужності (з урахуванням фазового положення струму зворотної послідовності). Симетрувальна ефективність двоелементного ємнісного СУ істотно залежить від типу і режиму несиметричного навантаження.

Для розрахунку параметрів БК розроблено як аналітичні, так і графічні методи. Суть аналітичного підходу полягає в тому, що потужності батарей та схема їх вмикання між фазами визначаються відповідно до значення аргументу вектора еквівалентного струму зворотної послідовності (розташування в I, II або III області). Діаграму розподілу аргументу наведено на рис. 2.7

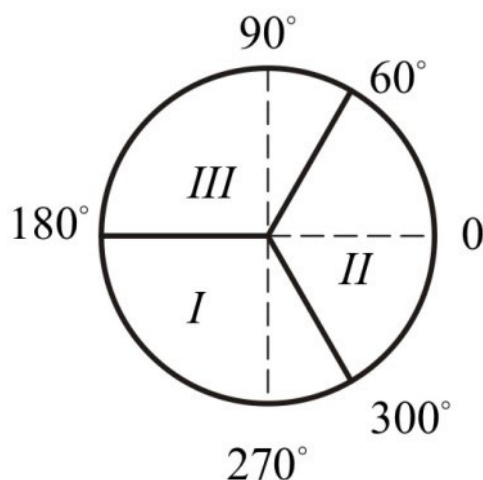


Рисунок 2.7 – Діаграма розподілу аргументу струму зворотної послідовності I_2

Сумарна потужність БК при повному симетруванні (за припущенням номінальної напруги) визначається залежностями:

$$I. \quad Q_{\Sigma} = \sqrt{3}U_{ном} I_{12} (\sqrt{3} \sin \phi_{12} + \cos \phi_{12}) ; \quad (2.24)$$

$$\text{II. } Q_{\Sigma} = 2\sqrt{3}U_{\text{ном}} I_{\Sigma} \cos \phi_{\Sigma} ; \quad (2.25)$$

$$\text{III. } Q_{\Sigma} = \sqrt{3}U_{\text{ном}} I_{\Sigma} (\sqrt{3} \sin \phi_{\Sigma} - \cos \phi_{\Sigma}) . \quad (2.26)$$

Якщо реактивна потужність, необхідна для компенсації у вузлі мережі, $Q_{\text{КРМ}} > Q_{\Sigma}$, замість $Q_{\text{КРМ}}$ приймають Q_{Σ} .

Співвідношення потужностей, та їх приєднання до лінійних напруг для I, II та III областей задаються виразами:

$$\text{I. } \frac{Q_{\text{ас}}}{Q_{\Sigma}} = \frac{2}{3 + \sqrt{3} \operatorname{tg} \phi_{\Sigma}}; \quad \frac{Q_{\text{ас}}}{Q_{\Sigma}} = 1 - \frac{Q_{\text{ас}}}{Q_{\Sigma}} ; \quad (2.27)$$

$$\text{II. } \frac{Q_{\text{ас}}}{Q_{\Sigma}} = 0,5 - \frac{1}{2\sqrt{3}} \operatorname{tg} \phi_{\Sigma}; \quad \frac{Q_{\text{ас}}}{Q_{\Sigma}} = 1 - \frac{Q_{\text{ас}}}{Q_{\Sigma}} ; \quad (2.28)$$

$$\text{III. } \frac{Q_{\text{ас}}}{Q_{\Sigma}} = \frac{2}{3 - \sqrt{3} \operatorname{tg} \phi_{\Sigma}}; \quad \frac{Q_{\text{ас}}}{Q_{\Sigma}} = 1 - \frac{Q_{\text{ас}}}{Q_{\Sigma}} . \quad (2.29)$$

У разі неповного симетрування сумарну потужність батарей конденсаторів визначають за формулою:

$$Q_{\text{ном}} = Q_{\Sigma} \left(1 - \frac{K_{\Sigma\phi}}{K_{\Sigma\phi}} \right) , \quad (2.30)$$

де $K_{\Sigma\phi}$ - фактичний коефіцієнт несиметрії до підключення СУ;
— його нормоване значення.

Симетрокомпенсаційні пристрої для електротехнологічних установок

У системах електропостачання підприємств із електротехнологічними установками (печі електрошлакового переплаву, індукційні печі тощо)

технологічний процес супроводжується частими змінами кількості увімкнених агрегатів і їх завантаження. Це спричиняє зміну як модуля, так і фази показників несиметрії. Оскільки такі установки одночасно є потужними споживачами реактивної потужності, для них розробляють симетрокомпенсуючі пристрої багатоцільового призначення, що забезпечують як симетрування напруги, так і компенсацію реактивної потужності. Приклад дискретно регульованих ємнісних схем наведено на рис. 2.8.

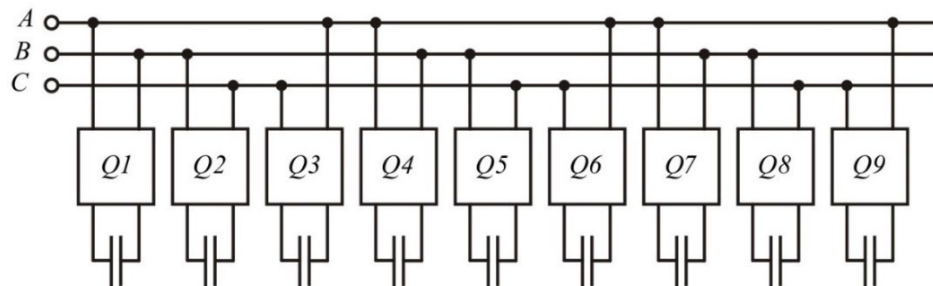


Рисунок 2.8 – Схема симетрокомпенсуючого пристрою

Оцінювання рівня несиметрії (для автоматичного або ручного керування) може здійснюватися через аргумент пульсуючої потужності трифазної системи на основній частоті:

$$\dot{N} = 3(\dot{U}_1 \dot{I}_2 + \dot{U}_2 \dot{I}_1 + \dot{U}_0 \dot{I}_0) = N \exp \tau_n, \quad (2.31)$$

де $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_0$ і $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_0$ - симетричні складові напруг і струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей.

Поєднання умов компенсації реактивної потужності та симетрування дає змогу зменшити встановлену потужність регульованих компенсуючих пристроїв у СЕС підприємств.

СУ на основі «обертового» магнітного поля

Окрему групу становлять симетрувальні пристрої на базі трансформаторів з обертовим магнітним полем, конструктивно виконаних як трифазний статор і загальмований ротор. На роторі розміщують однофазну обмотку, до якої під'єднують постійні реактивні елементи (БК або реактор). Такий пристрій еквівалентний несиметричному навантаженню, а фаза струму зворотної послідовності може змінюватися в межах $0 \dots 2\pi$ при повороті ротора. Використання комбінації двох таких СУ дозволяє регулювати як модуль, так і фазу струму зворотної послідовності шляхом повороту роторів на визначені кути.

На рис. 2.9–2.10 показано схеми СУ типів $L - L$ та $L - C$.

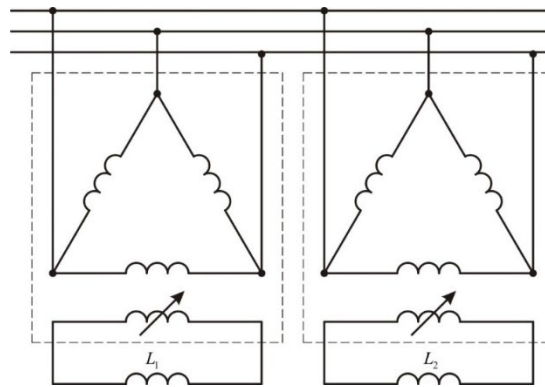


Рисунок 2.9 – Схеми СУ типу $L - L$ з обертовим магнітним полем.

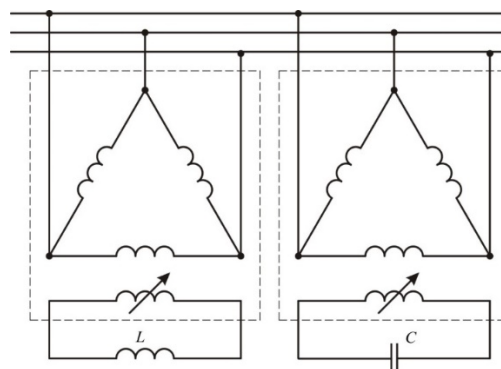


Рисунок 2.10 – Схеми СУ типу $L - C$ з обертовим магнітним полем

Для СУ типу $L - C$ закон керування має вигляд:

$$\alpha_L = 0,5 \left| \pi + \varphi_{2n} - \arcsin \left[\sqrt{3} U_n J_{2n} (Q_L + Q_C)^{-1} \right] \right| ; \quad (2.32)$$

$$\alpha_C = 0,5 \left| \pi + \varphi_{2n} + \arcsin \left[\sqrt{3} U_n J_{2n} (Q_L + Q_C)^{-1} \right] \right| . \quad (2.33)$$

де α_L, α_C — кути повороту роторів;

Q_L и Q_C — потужності реактивних елементів;

φ_{2n} — аргумент лінійного струму зворотної послідовності несиметричного навантаження .

Симетрування введенням додаткової системи ЕРС

Суть підходу полягає у введенні між джерелом і приймачем (у розрив лінійних проводів) додаткових джерел ЕРС, що формують систему зворотної послідовності. У результаті складові зворотної послідовності взаємно компенсуються, і напруга на приймачі наближається до симетричної. Як джерела такої додаткової системи можуть використовуватись синхронний генератор, трансформатори послідовного регулювання, а також трансформатори з пофазним регулюванням коефіцієнта трансформації.

Якщо система напруг, підведених до трансформатора, є симетричною, фазовий зсув між вторинними фазними напругами U_{21}, U_{22}, U_{23} становитиме $\frac{2}{3\pi}$ незалежно від коефіцієнтів трансформації по фазах. За рівних коефіцієнтів трансформації вторинна система напруг також є симетричною. Відхилення (нерівність) коефіцієнтів трансформації по фазах призводить до спотворення системи лінійних напруг U_{L1}, U_{L2}, U_{L3} , тобто до появи складової зворотної послідовності.

Узагальнення до п. 2.2

1. Схемні рішення (вибір вузла приєднання, підвищення S_k , підключення через окремі трансформатори до 110–220 кВ, перерозподіл навантажень) є найкращими як перший крок, бо не потребують складних пристроїв. Вони

ефективні тоді, коли мережа має достатній запас жорсткості, а джерела несиметрії обмежені за потужністю та кількістю.

2. Якщо умовою $S_k \geq 5S_{1\phi}$ забезпечити $K_{2U} \leq K_{2U\text{доп}}$ неможливо, переходять до симетрувальних пристроїв, які реалізують компенсацію струмів/напруг зворотної та нульової послідовностей.

3. Індивідуальне симетрування доцільне для потужних одиничних несиметричних електроприймачів (коли «винуватець» один і він добре ідентифікований). Недолік — більша встановлена потужність СУ та нижча ефективність використання силових елементів.

4. Централізоване симетрування має сенс у випадках, коли джерел несиметрії багато і вони розподілені, а застосування індивідуальних СУ економічно важке. Мінус — у лінійній частині мережі зберігаються несиметричні струми, тобто мережа «страждає», хоч шини вузла стають красивими.

5. Груповий підхід зазвичай найбільш збалансований для виробничих СЕС з кількома технологічними приєднаннями: зменшує несиметрію на ділянці й не вимагає надмірної потужності СУ.

6. Трансформаторні СУ (Скотт тощо) доречні для типових режимів (наприклад, живлення двофазних або специфічних установок), але в загальному випадку вони нерегульовані і чутливі до зміни навантаження.

7. Автотрансформаторні/дільникові схеми з регулюванням — робочий інструмент для нелінійних і змінних режимів, але вибір схеми залежить від діапазону $\cos \varphi$ та вимог до якості симетрування.

8. Індуктивно-ємнісні СУ (Штейнметц) найбільш ефективні при $\cos \varphi \approx 1$. При активно-індуктивних режимах потребують додаткової компенсації (підключення C_2), а при змінному навантаженні часто виникає потреба у керуванні елементами.

9. Батарей конденсаторів різної фазної потужності є практично привабливими завдяки двом функціям одразу: симетрування + компенсація реактивної потужності. У реальних СЕС зазвичай застосовують часткове симетрування до рівня нормативу, а не «ідеальну симетрію».

10. Для електротехнологічних виробництв (ЕШП, індукційні печі тощо), де режим різко змінний, найбільш логічними є керовані симетрокомпенсуючі пристрої (дискретні/плавні), а критерій достатності слід оцінювати з імовірністю 0,95, щоб не «переплачувати за ідеальність».

Порівняльний аналіз методів сіметрування та шляхів зниження несиметрії напруги наведено у таблиці А1.1,

Висновки до розділу 2

1. Проведений аналіз показав, що основною причиною виникнення несиметрії напруг у системах електропостачання є нерівномірний розподіл однофазних і нелінійних навантажень, які формують струми зворотної послідовності та викликають відповідні перекоси фазних і лінійних напруг. Рівень несиметрії визначається співвідношенням потужності короткого замикання вузла мережі та потужності несиметричного навантаження, а також параметрами елементів системи електропостачання.

2. Встановлено, що застосування виключно схемних заходів, таких як перерозподіл навантажень між фазами або підключення потужних однофазних споживачів до вузлів із високою потужністю короткого замикання, дозволяє лише частково обмежити рівень несиметрії. У випадках значних або змінних несиметричних навантажень ефективне зниження коефіцієнта несиметрії можливе лише із застосуванням спеціальних симетруючих пристроїв.

3. Розглянуто основні типи симетруючих пристроїв, зокрема трансформаторні, автотрансформаторні, індуктивно-ємнісні, ємнісні та керовані симетрокомпенсуючі системи. Показано, що їх дія ґрунтується на компенсації струмів або напруг зворотної послідовності, що забезпечує зниження перекосу фазних напруг до допустимого рівня. Вибір типу симетруючого пристрою визначається характером і потужністю навантаження, режимом роботи мережі та вимогами до якості електроенергії.

4. Встановлено, що найбільш ефективним підходом у сучасних системах електропостачання є комплексне застосування симетруючих та компенсуючих пристроїв, зокрема батарей конденсаторів із регулюванням та симетрокомпенсуючих установок, які забезпечують одночасне зниження несиметрії напруг і компенсацію реактивної потужності. Це дозволяє підвищити енергетичну ефективність системи, зменшити втрати електроенергії та покращити умови роботи електрообладнання.

5. Отримані результати створюють теоретичну основу для подальшого розрахунку параметрів симетруючих пристроїв і вибору оптимальних технічних рішень для конкретної системи електропостачання, що буде розглянуто у наступних розділах магістерської кваліфікаційної роботи.

3 СИНТЕЗ ДОСВІДНОГО ЗРАЗКУ СИМЕТРУЮЧОГО ПРИСТРОЮ

3.1 Аналіз засобів симетрування фазної напруги, що застосовуються в сучасних умовах

У сучасних системах електропостачання промислових підприємств одним із найбільш поширених технічних рішень для зменшення несиметрії фазних напруг є застосування симетруючих трансформаторів типу ТСТ. Відповідно до технічної документації виробників, трансформатори даного типу призначені для забезпечення необхідного рівня якості електричної енергії при живленні електроприймачів як від централізованих енергосистем, так і від автономних джерел електроживлення. Основною функцією трансформаторів ТСТ є вирівнювання фазних напруг і забезпечення більш рівномірного розподілу навантаження між фазами мережі.

Зовнішній вигляд симетруючого трансформатора типу ТСТ-63 наведено на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 – Трансформатор ТСТ-63

Технічний ефект використання таких трансформаторів полягає у зменшенні рівня несиметрії струмів і напруг на стороні первинної мережі, а також у зниженні встановленої потужності обладнання, необхідного для забезпечення стабільного режиму роботи електричної системи. Конструктивно симетруючий трифазно-однофазний трансформатор змінної напруги містить первинні обмотки, підключені до всіх трьох фаз живлення, та дві вторинні обмотки, розташовані у фазах А і С. Первинні обмотки з'єднані за схемою «зигзаг», що забезпечує компенсацію несиметрії. Вторинні обмотки з'єднуються зустрічно та підключаються до вихідних затискачів трансформатора, що забезпечує формування симетричної системи напруг. Схема з'єднання обмоток представлена на рисунку 3.2.

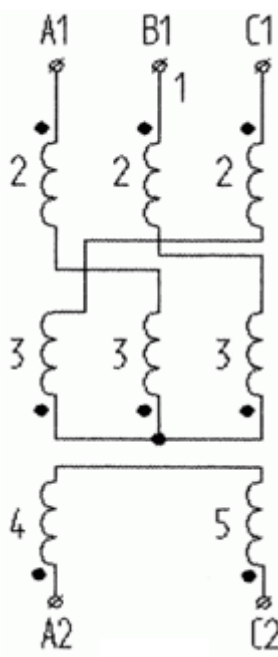


Рисунок 3.2 – Схема з'єднання обмоток для симетрування фазної напруги

Застосування трансформатора типу ТСТ дозволяє ефективно вирівнювати лінійні напруги навіть у випадках значної несиметрії навантаження. Наприклад, при вхідних значеннях лінійної напруги, що становлять відповідно 348 В, 396 В і 465 В, після проходження через симетруючий трансформатор ці значення наближаються до рівня 389 В, 398 В і 409 В. Це свідчить про істотне зменшення ступеня несиметрії.

Крім того, трансформатори типу ТСТ забезпечують вирівнювання фазних напруг. Наприклад, якщо на вході фазні напруги становлять 148 В, 196 В і 265 В, то на виході вони вирівнюються до значення близько 201 В, причому втрати напруги на кожній фазі не перевищують приблизно 2 В.

Додатковою перевагою трансформаторів даного типу є можливість роботи за умов значного перекосу навантаження. Зокрема, для трансформатора номінальною потужністю 63 кВА допускається ситуація, коли одна або дві фази не навантажені, а третя фаза працює з повним навантаженням, що становить до 21 кВА.

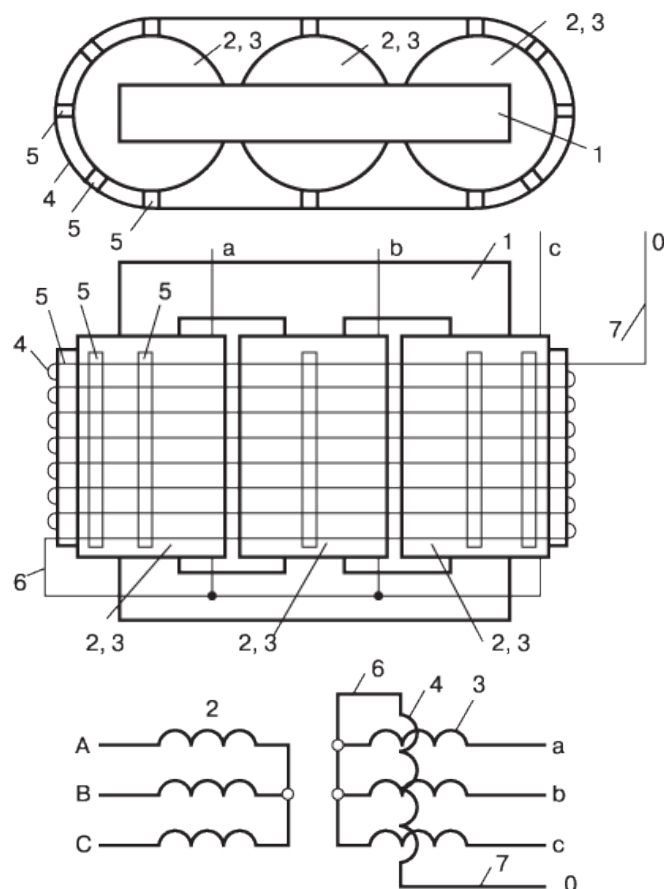
У випадках, коли після симетрування рівень напруги відхиляється від допустимого значення, трансформатори можуть бути оснащені додатковими регульовальними обмотками, що дозволяє коригувати рівень напруги до нормативного значення.

Разом з тим, незважаючи на переваги, трансформатори типу ТСТ мають певні недоліки. Основним із них є відсутність можливості точного регулювання напруги. Це означає, що навіть після симетрування фазні напруги можуть залишатися симетричними, але їх абсолютне значення може відрізнитися від нормативного рівня.

Для забезпечення стабільного рівня напруги часто додатково застосовуються стабілізатори напруги. У побутових умовах використовуються однофазні стабілізатори для живлення окремих споживачів або невеликих груп навантажень. У промислових електромережах застосовуються трифазні стабілізатори, які конструктивно складаються з трьох незалежних однофазних стабілізаційних модулів. Використання таких пристроїв разом із симетруючими трансформаторами призводить до збільшення вартості обладнання, а також витрат на його монтаж і технічне обслуговування.

Існують також конструкції силових трансформаторів зі схемою з'єднання обмоток Y/Y_n , оснащених вбудованими симетруючими обмотками. Така симетруюча обмотка виконується у вигляді компенсаційного провідника, розташованого поверх обмоток високої напруги. Вона підключається до

нейтральної точки трансформатора і призначена для компенсації струмів нульової послідовності, які виникають при несиметричному навантаженні, (рис. 3.3).



- 1 – магнітопровід трифазного трансформатора тристрижневого типу;
- 2 – обмотки високовольтної сторони;
- 3 – обмотки низьковольтної сторони;
- 4 – компенсаційна обмотка, сформована з компенсаційних витків;
- 5 – ізоляційні дистанційні елементи (клини);
- 6 – вивід компенсаційної обмотки, з'єднаний з нейтральною точкою обмоток низької напруги;
- 7 – зовнішній вивід компенсаційної обмотки, призначений для підключення до відповідного електричного кола.

Рисунок 3.3 – Схема підключення основної та компенсаційної обмоток трансформатора

Принцип роботи такого пристрою полягає у створенні компенсаційного магнітного потоку, який нейтралізує потоки нульової послідовності в магнітопроводі трансформатора. Це дозволяє зменшити перекіс фазних напруг і покращити якість електроенергії.

Аналіз роботи трансформаторів у несиметричних режимах базується на використанні методу симетричних складових, відповідно до якого будь-який несиметричний режим може бути представлений у вигляді суми складових прямої, зворотної та нульової послідовностей. Пряма складова відповідає нормальному режиму роботи, тоді як складові зворотної та нульової послідовностей виникають лише за наявності несиметрії та є основною причиною спотворення фазних напруг і струмів.

У трансформаторах зі схемою з'єднання Y/Y_n третя гармоніка струму нульової послідовності додається і протікає через симетруючу обмотку, що забезпечує її компенсацію. Для ефективної роботи така обмотка повинна мати достатню кількість витків і відповідний переріз провідника, що забезпечує пропускання необхідного струму.

Однак такі конструктивні рішення мають суттєві недоліки, зокрема значні габарити, підвищену матеріаломісткість і високу вартість виготовлення. Крім того, вони компенсують лише складову нульової послідовності і не забезпечують повного усунення несиметрії.

Таким чином, проведений аналіз існуючих технічних засобів симетрування показав, що сучасні симетруючі трансформатори та пристрої мають як переваги, так і суттєві обмеження. Це обумовлює необхідність розробки більш ефективного симетруючого пристрою, який забезпечуватиме високу точність симетрування, компактність конструкції, зниження матеріаломісткості та підвищення ефективності роботи систем електропостачання.

3.2 Загальні відомості щодо автоматизації процесу симетрування

У системах електропостачання промислових об'єктів електричні навантаження мають випадковий і нерегулярний характер зміни в часі. Така динамічність режимів роботи призводить до того, що регулювання параметрів симетруючих пристроїв часто здійснюється на основі інформації про попередній стан навантаження. Це, своєю чергою, може спричинити зниження ефективності регулювання та погіршення показників якості електричної енергії.

У сучасних системах електропостачання для зменшення несиметрії струмів і напруг застосовуються спеціалізовані симетруючі пристрої, які можуть функціонувати як у ручному, так і в автоматичному режимах керування [6]. Найбільш ефективними є автоматизовані системи симетрування, здатні забезпечувати підтримання коефіцієнта несиметрії в допустимих межах навіть за умов змінного навантаження.

На рисунках 3.4 і 3.5 наведено приклади схем регульованих симетруючих пристроїв, що використовуються, зокрема, для електротехнологічних установок, таких як печі електрошлакового переплаву [25].

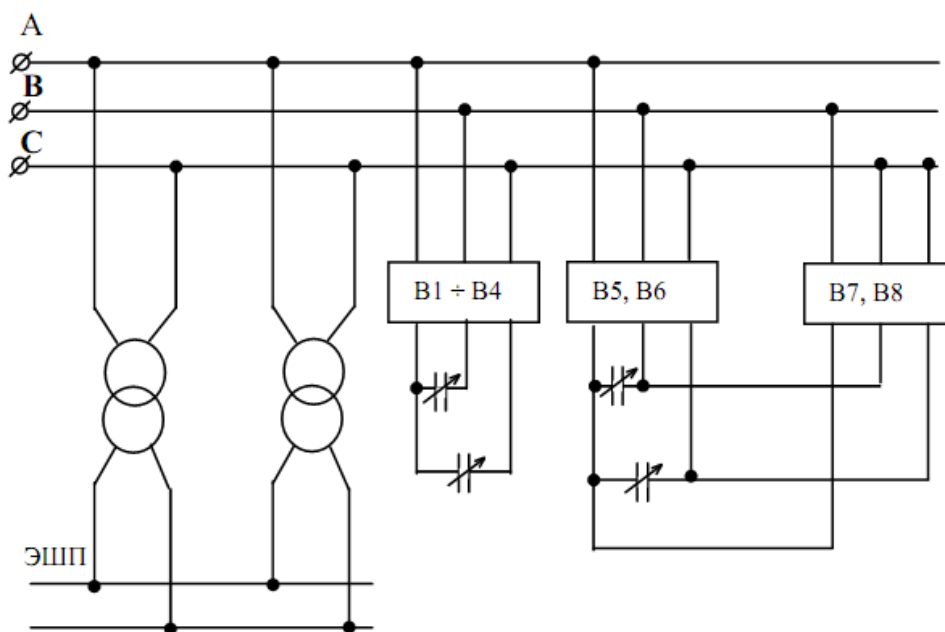


Рисунок 3.4 - Схема регульованого симетруючого пристрою на базі конденсаторних батарей

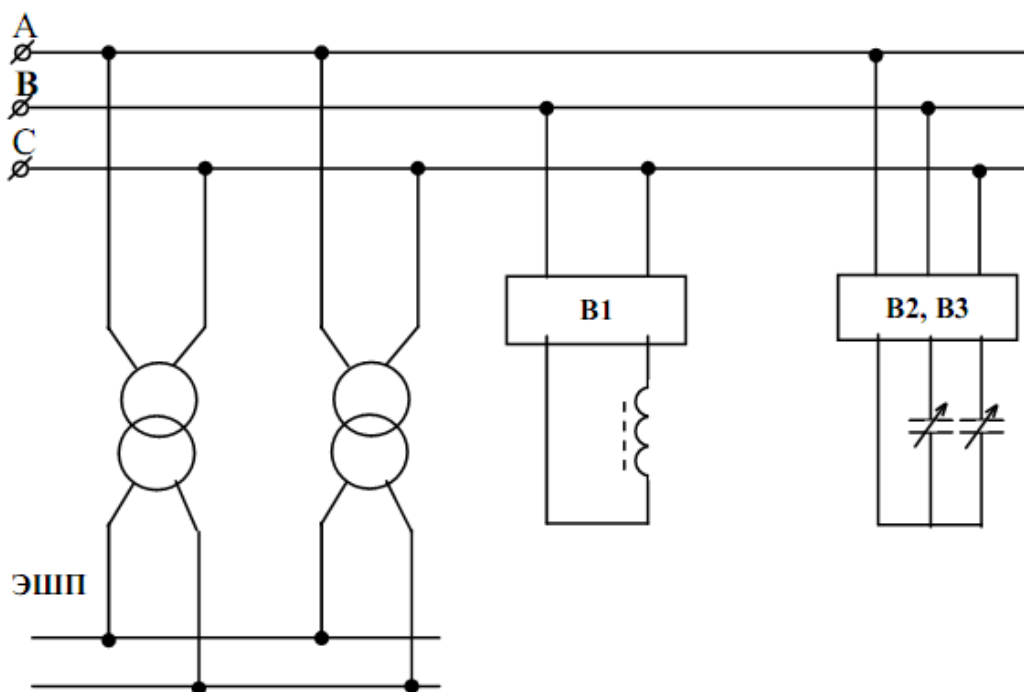


Рисунок 3.5 - Схема автоматично керованого симетруючого пристрою з індуктивними та ємнісними елементами

Автоматичні симетруючі пристрої повинні забезпечувати високу точність підтримання симетрії напруг або струмів при заданому значенні коефіцієнта потужності. Це обумовлює необхідність створення систем керування, здатних виконувати обчислення параметрів симетрування та формувати відповідні керуючі сигнали для елементів пристрою в умовах довільного характеру несиметричного навантаження, як у трипровідних, так і в чотиривпровідних трифазних мережах.

Під час розв'язання задачі автоматичного симетрування необхідно враховувати фундаментальні властивості трифазних систем. Зокрема, трифазна система напруг характеризується наявністю осі симетрії третього порядку, що означає повернення системи до початкового стану після повороту на 120° тричі. Крім того, при комплексному спряженні складові прямої та зворотної послідовностей взаємно змінюються місцями, що має важливе значення для аналізу та компенсації несиметрії.

Найбільш складним етапом створення автоматичного симетруючого пристрою є визначення параметрів компенсаційних елементів. Для вирішення

цього завдання доцільним є застосування спеціалізованих обчислювальних засобів, зокрема мікропроцесорних систем. Використання мікропроцесорів дозволяє інтегрувати в одному пристрої функції вимірювання параметрів електричного режиму, обчислення необхідних параметрів симетрування та формування керуючих сигналів [86, 87].

Застосування мікропроцесорних систем керування забезпечує можливість створення універсальних автоматизованих симетруючих пристроїв, які можуть ефективно функціонувати в трипровідних і чотирипровідних мережах незалежно від типу симетрування — індивідуального, групового, централізованого або комбінованого. Це значно підвищує ефективність функціонування систем електропостачання та забезпечує необхідний рівень якості електричної енергії в умовах змінних режимів роботи.

3.3 Методика розробки принципової схеми функціональних елементів компенсуючих пристроїв

3.3.1 Загальні відомості

Відповідно до вимог ГОСТ 2.702-84, структурні схеми розробляються на етапі проєктування електротехнічних систем під час аналізу та формування загальної архітектури пристрою [19]. Побудова структурної схеми є початковим етапом створення електротехнічної системи і передує розробці функціональних, принципівих та інших типів схем. Саме структурна схема відображає загальний склад пристрою, його функціональну організацію та взаємозв'язки між основними елементами.

На структурній схемі функціональні частини пристрою, як правило, зображаються у вигляді прямокутників, що відображають окремі функціональні блоки, а зв'язки між ними позначаються лініями, які демонструють напрямок передачі сигналів або потоків енергії. Для покращення наочності на цих лініях

можуть використовуватися стрілки, що вказують напрям взаємодії між окремими елементами системи.

Кожен функціональний блок на схемі повинен мати відповідне позначення або найменування. У випадку значної кількості функціональних елементів допускається використання порядкової нумерації замість текстових назв. Нумерація зазвичай виконується послідовно, зверху вниз і зліва направо. Такий підхід дозволяє спростити сприйняття структури пристрою та забезпечити зручність подальшого проектування.

Структурна схема є узагальненою моделлю електротехнічного пристрою, яка дозволяє швидко оцінити його склад, принцип організації та функціональне призначення без деталізації електричних процесів. Це забезпечує можливість ефективного аналізу роботи системи на початковому етапі розробки.

3.3.1.1 Структурна схема симетруючого пристрою

Симетруючий пристрій складається з ряду функціональних блоків, кожен з яких виконує визначену функцію у процесі компенсації несиметрії напруги.

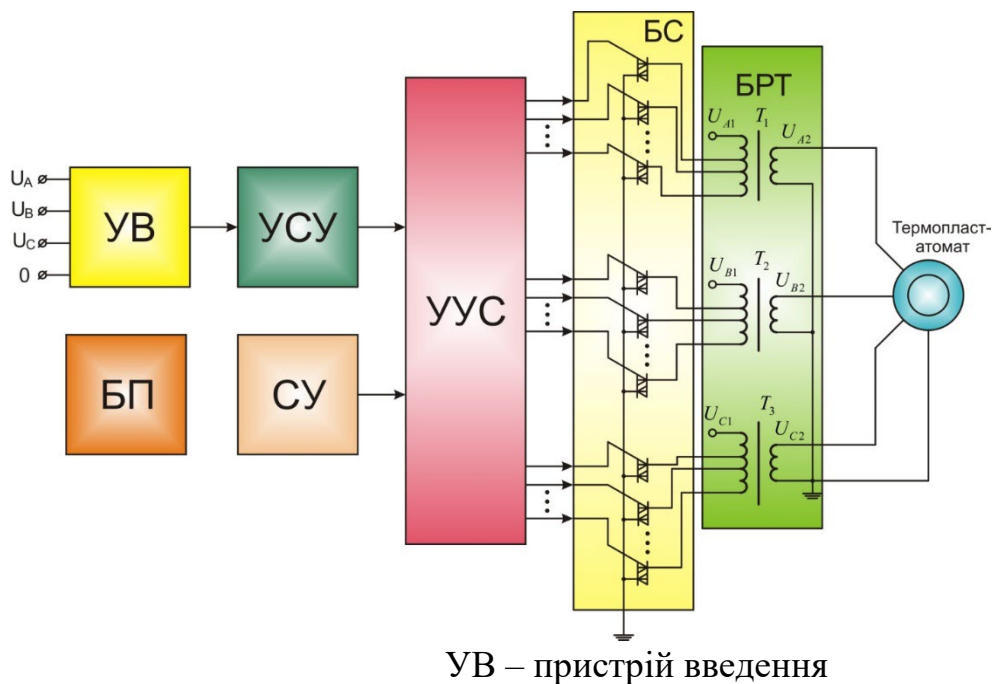


Рисунок 3.6 – Структурна схема симетруючого пристрою:

Розглянемо призначення та принцип функціонування окремих блоків пристрою.

Пристрій введення (УВ) забезпечує підключення симетруючого пристрою до електричної мережі, яка живить електроприймач. Через цей блок здійснюється передача вхідних електричних параметрів, зокрема фазних напруг, для подальшої обробки та аналізу системою керування.

Блок узгодження рівнів напруги призначений для перетворення фазних напруг мережі до значень, придатних для обробки мікропроцесорною системою керування. Оскільки рівень мережевої напруги значно перевищує допустимі значення для електронних компонентів, цей блок виконує функцію зниження та перетворення напруги у відповідний діапазон, зазвичай до рівня, що не перевищує 5 В постійного струму.

Блок управління симісторами (УУС) формує керуючі сигнали для силових напівпровідникових елементів – симісторів, які забезпечують підключення відповідних обмоток вольтодобавочного трансформатора. Робота цього блоку здійснюється відповідно до алгоритму симетрування, який реалізується системою керування.

Система управління (СУ) виконує функцію аналізу параметрів мережі, зокрема значень фазних напруг, визначає ступінь їх несиметрії та формує відповідні керуючі сигнали для блоку управління симісторами. На основі отриманих даних система управління забезпечує вибір необхідного режиму роботи компенсуючого пристрою.

Блок живлення забезпечує формування стабілізованої напруги постійного струму, необхідної для функціонування електронних компонентів системи керування та інших функціональних блоків пристрою. Живлення формується шляхом перетворення напруги мережі.

Блок симісторів виконує функцію комутації обмоток вольтодобавочного трансформатора відповідно до керуючих сигналів, отриманих від блоку управління. Відкриття відповідних симісторів дозволяє підключати необхідні компенсаційні обмотки.

Блок регульованого трансформатора (БРТ) забезпечує формування компенсаційної напруги, яка додається до напруги мережі з метою вирівнювання фазних значень. У результаті цього на виході формується симетрична трифазна система напруг із заданими параметрами.

Таким чином, узгоджена робота всіх функціональних блоків забезпечує автоматичне симетрування напруги, що дозволяє підвищити якість електроенергії та забезпечити стабільну роботу електроприймачів.

3.4 Синтез мікропроцесорної системи управління

3.4.1 Мікроконтролер

Ключовим елементом мікропроцесорної системи керування симетруючим пристроєм є мікроконтролер (МК), який виконує функції збору, обробки та аналізу інформації щодо стану фазних напруг трифазної електричної мережі. Для ефективного функціонування пристрою усунення несиметрії напруг необхідна високопродуктивна система керування, здатна оперативно реагувати на зміну параметрів електромережі та формувати відповідні керуючі сигнали.

З цією метою до складу системи управління включається швидкодіючий мікроконтролер, який забезпечує вимірювання параметрів напруги, їх обробку та реалізацію алгоритму симетрування у реальному масштабі часу.

До основних вимог, що висуваються до мікроконтролера, належать:

- наявність щонайменше чотирьох повноцінних 8-бітних портів введення/виведення для обміну цифровими сигналами;
- підтримка як послідовного, так і паралельного інтерфейсів для підключення персонального комп'ютера та збору діагностичних і статистичних даних;
- наявність інтерфейсу I²C для реалізації дистанційного керування режимами роботи пристрою;
- наявність багатоканального аналого-цифрового перетворювача (АЦП) з розрядністю не менше 10 біт і кількістю каналів не менше восьми.

Зазначеним вимогам повністю відповідає мікроконтролер PIC16F877A виробництва компанії Microchip, зовнішній вигляд якого представлено на рисунку 3.7.

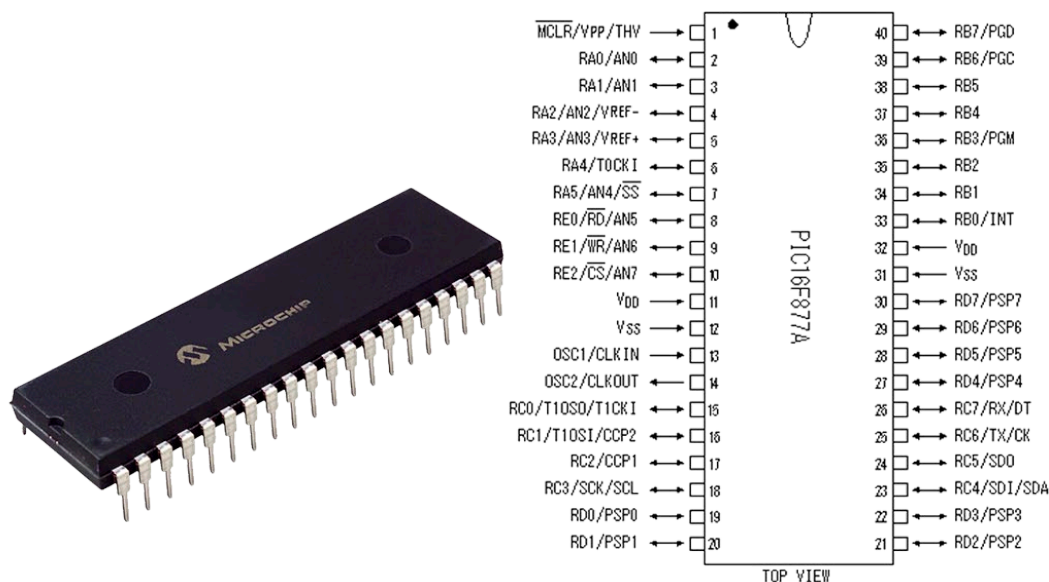


Рисунок 3.7 – Мікроконтролер PIC16F877A у корпусному виконанні DIP-40

Мікроконтролер PIC16F877A реалізує архітектуру з такими характеристиками:

- підтримка 14-бітного формату машинних команд;
- обробка 8-бітних даних;
- наявність входу зовнішніх переривань;
- восьмирівневий апаратний стек;
- підтримка різних режимів адресації, включаючи прямий, непрямий та відносний.

Функціональні можливості мікроконтролера включають:

- 33 універсальні лінії введення/виведення з можливістю програмного налаштування напрямку передачі даних;
- підвищену струмову навантажувальну здатність портів (до 25 мА на кожен ліній);
- наявність трьох таймерів різної розрядності:
 - Timer0 – 8-бітний таймер/лічильник;
 - Timer1 – 16-бітний таймер/лічильник;

- Timer2 – 8-бітний таймер/лічильник;
- два модулі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Комунікаційні можливості мікроконтролера забезпечуються такими інтерфейсами:

- SPI (послідовний периферійний інтерфейс);
- I²C з підтримкою режимів Master і Slave;
- USART для послідовного обміну даними;
- паралельний інтерфейс Slave-типу;
- восьмиканальний 10-бітний аналого-цифровий перетворювач;
- два аналогові компаратори;
- інтегроване джерело опорної напруги.

Для підвищення надійності роботи мікроконтролер оснащений системами контролю та захисту, зокрема:

- автоматичним скиданням при подачі живлення (POR);
- таймером стабілізації живлення (PWRT);
- таймером запуску генератора (OST);
- схемою скидання при зниженні напруги живлення (BOR);
- сторожовим таймером (WDT) з власним RC-генератором;
- режимом зниженого енергоспоживання (SLEEP).

До додаткових переваг мікроконтролера належать:

- можливість внутрішньосхемного програмування (ICSP);
- підтримка внутрішньосхемного налагодження (ICD);
- функція самопрограмування;
- наявність захисту програмного коду;
- ресурс перезапису FLASH-пам'яті до 1000 циклів;
- ресурс перезапису EEPROM-пам'яті до 100 000 циклів;
- тривалий термін зберігання даних, що перевищує 40 років.

Мікроконтролер PIC16F877A виготовлений за КМОП-технологією, що забезпечує:

- низьке енергоспоживання;
- високу швидкодію;
- повністю статичну архітектуру;

- широкий діапазон напруг живлення від 2,0 до 5,5 В;
- стабільну роботу в розширеному температурному діапазоні.

Крім того, цей мікроконтролер має повну електричну та конструктивну сумісність з іншими представниками сімейств PIC16CXXX та PIC16FXXX у 40-вивідному корпусі, що забезпечує гнучкість при модернізації або заміні компонентів.

Застосування мікроконтролера PIC16F877A у складі системи управління симетруючим пристроєм забезпечує необхідну швидкодію, точність обробки даних та високу надійність функціонування пристрою в умовах змінного навантаження електричної мережі.

3.4.2 Синтез плати-програматора – засоби програмування мікроконтролера

Для запису програмного коду в пам'ять мікроконтролера необхідно використовувати спеціалізоване програмне забезпечення (програматор) та апаратний засіб – плату-програматор. Використання плати-програматора обумовлено двома основними факторами. По-перше, вона забезпечує фізичний інтерфейс між мікроконтролером і персональним комп'ютером, через який передається програмний код. По-друге, плата містить електронні компоненти, які реалізують алгоритм програмування та формують необхідні сигнали управління.

Для програмування обраного мікроконтролера PIC16F877A було розроблено та виготовлено спеціалізовану плату-програматор, що підключається до персонального комп'ютера через СОМ-порт і забезпечує можливість встановлення мікроконтролера у корпусі типу DIP-40.

Принципову електричну схему плати-програматора наведено на рисунку 3.8..

Виготовлення друкованої плати програматора виконувалося із застосуванням лазерно-праскової технології, яка є одним із найбільш доступних і ефективних методів створення друкованих плат у лабораторних умовах.

При виготовленні плати-програматора використовувалася так звана «лазерно-праскова технологія виготовлення друкованих плат».

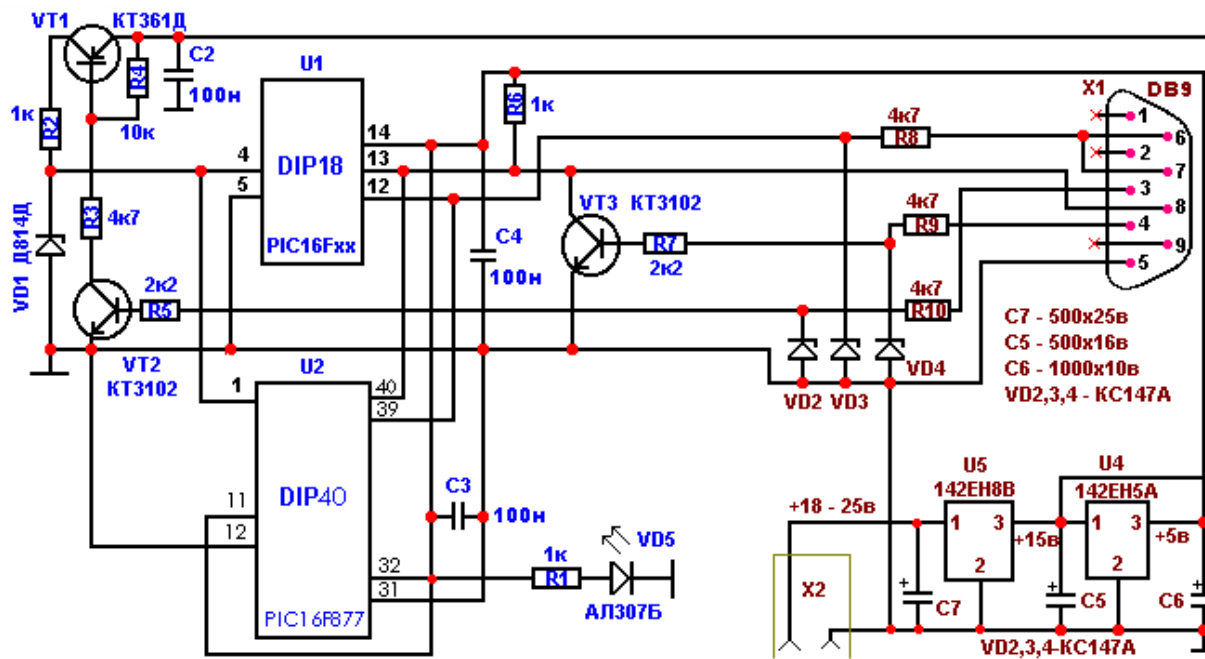


Рисунок 3.8 – Принципова схема плати-програматора

На першому етапі було виконано проектування топології друкованої плати із застосуванням персонального комп'ютера. При цьому дотримувалися такі технічні вимоги:

- відстань між контактами мікросхем становила 2,54 мм (0,1 дюйма), що відповідає стандартному кроку DIP-компонентів;
- ширина струмопровідних доріжок становила 2 pt;
- контактні майданчики для виводів електронних компонентів виконувалися з внутрішнім діаметром 0,7 мм і зовнішнім діаметром 1,5–2,0 мм;
- контактні майданчики для провідників мали розміри 1,25/2,5–3,0 мм (внутрішній/зовнішній діаметр);
- по завершенні розведення плати було сформовано контур плати з технологічним припуском 0,5–1 мм для подальшої механічної обробки.

Зовнішній вигляд розробленої друкованої плати представлено на рисунку 3.9.

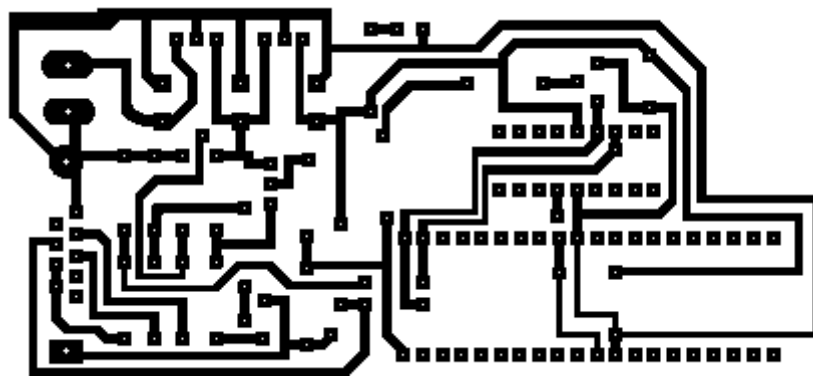


Рисунок 3.9 – Друкована плата програматора

На наступному етапі із заготовки склотекстоліту було вирізано основу плати з технологічним запасом не менше 5 мм. Поверхня мідного шару була оброблена дрібнозернистим абразивним матеріалом для видалення оксидного шару та покращення адгезії тонера. Після цього поверхню було знежирено спиртовим розчином.

Далі за допомогою лазерного принтера було нанесено топологію провідників на тонкий крейдований папір. Для цього використовувався принтер HP LaserJet 1010 із максимальними параметрами щільності друку, що забезпечило якісне перенесення зображення.

Перенесення зображення на плату здійснювалося методом термічного переносу із застосуванням нагрітої праски. Під дією температури тонер переносився на поверхню мідного шару, формуючи захисний шар майбутніх провідників.

Після охолодження плата була поміщена у теплу воду (40–50 °С) для видалення паперової основи. Після розм'якшення паперу його залишки були обережно видалені, а поверхня плати перевірена на наявність дефектів. У разі необхідності окремі ділянки були скориговані із застосуванням захисного маркера.

Наступним етапом було травлення плати у розчині хлорного заліза, попередньо нагрітому до температури 40–50 °С. У процесі травлення видалялися незахищені ділянки мідного шару, формуючи струмопровідні доріжки. Після

завершення травлення плата була очищена від залишків тонера та підготовлена до механічної обробки.

На завершальному етапі було виконано свердління монтажних отворів, обрізку плати відповідно до заданого контуру та монтаж електронних компонентів.

Готовий вигляд зібраної плати-програматора наведено на рисунку 3.10..

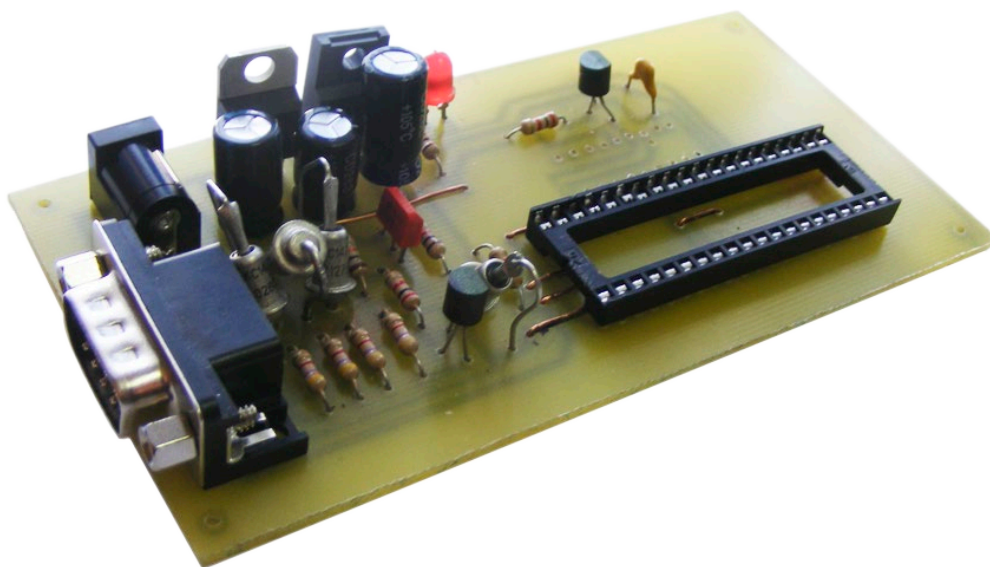


Рисунок 3.10 – Плата-програматор

Для перевірки працездатності плати було використано програмне забезпечення WinPic, яке дозволяє виконувати запис і зчитування програмного коду з мікроконтролера. Проведені випробування підтвердили коректність функціонування розробленого програматора.

Наступним етапом стала розробка експериментальної тестової плати, призначеної для поетапної перевірки роботи окремих функціональних вузлів симетруючого пристрою.

Зовнішній вигляд тестової плати представлено на рисунку 3.11

Використання тестової плати дозволило виконати поетапну перевірку функціонування окремих блоків пристрою та забезпечило можливість подальшої оптимізації конструкції симетруючого пристрою..

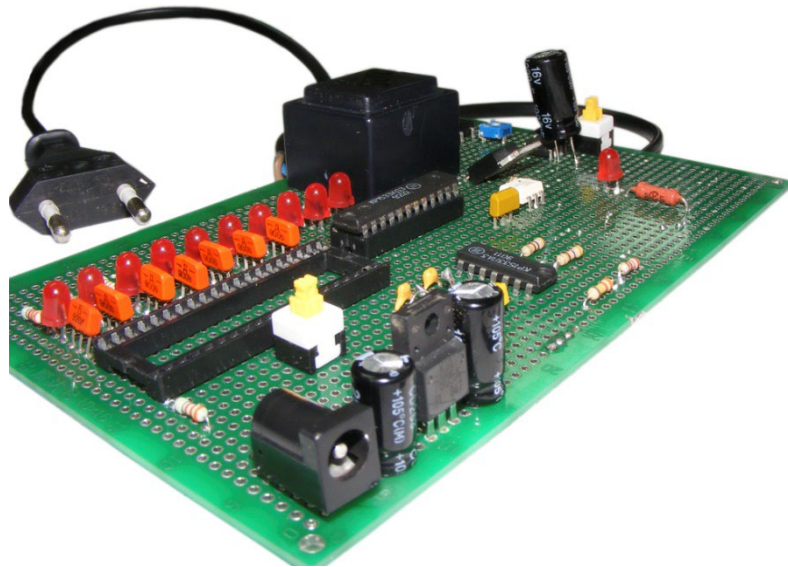


Рисунок 3.11 – Тестова плата розроблюваного пристрою

3.4.3 Перетворювач напруги

Фазна напруга електричної мережі не може бути безпосередньо подана на вхід аналого-цифрового перетворювача (АЦП) мікроконтролера, оскільки його допустимий діапазон вхідної напруги обмежений значеннями від 0 до 5 В постійного струму. ОУ зв'язку з цим виникає необхідність застосування спеціального пристрою, який забезпечує перетворення змінної фазної напруги мережі у пропорційну постійну напругу, придатну для подальшої обробки мікропроцесорною системою керування. Схему такого перетворювача наведено на рисунку 3.12.

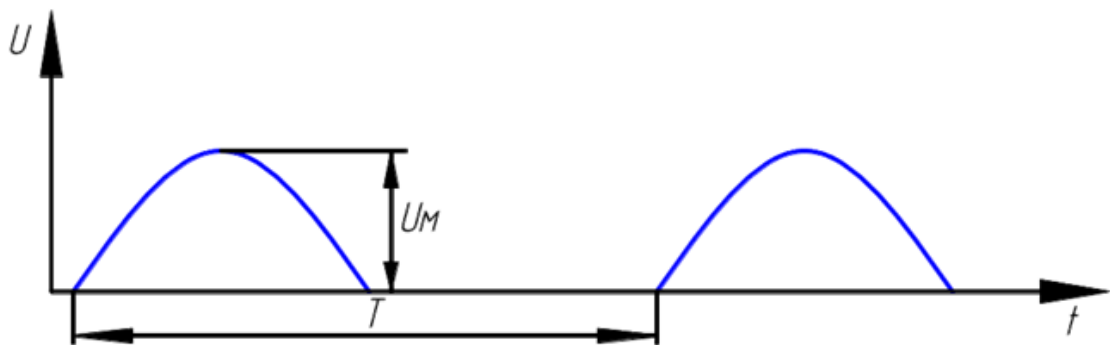


Рисунок 3.12 – Пікове значення періодичного сигналу

При вимірюванні напруги постійного струму визначається її безпосереднє значення. У випадку змінної напруги для її кількісної оцінки використовують кілька основних параметрів, серед яких виділяють пікове, середнє, середньовипрямлене та середньоквадратичне значення [21].

У випадку несиметричних сигналів розрізняють додатне та від'ємне пікові значення напруги.

Середнє значення напруги за період визначається як постійна складова сигналу:

$$U_{\text{cp}} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad (3.1)$$

де T – період сигналу;

$u(t)$ – миттєве значення напруги.

Середньовипрямлене значення визначається як середнє значення модуля напруги:

$$U_{\text{випр}} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt \quad (3.2)$$

У цьому випадку величина відповідає площі, обмеженій кривою напруги, що наведено на рисунку 3.13.

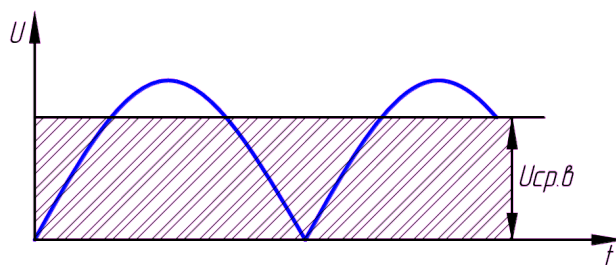


Рисунок 3.13 – Середньовипрямлене значення синусоїдальної напруги

Вибір типу перетворювача залежить від того, який саме параметр напруги необхідно контролювати. Перетворювачі змінної напруги класифікуються за такими ознаками:

- за вимірюваним параметром (пікові, середньоквадратичні, середньовипрямлені);
- за типом входу (з відкритим або закритим входом);
- за характеристикою перетворення (лінійні або квадратичні);
- за схемною реалізацією.

3.4.3.1 Перетворювачі пікового значення

Перетворювачі пікового типу формують на виході напругу, величина якої пропорційна максимальному значенню вхідного сигналу. Основною складовою таких пристроїв є накопичувальний елемент, який фіксує амплітудне значення напруги.

Ці перетворювачі характеризуються широким частотним діапазоном роботи та високою швидкістю. Типова схема пікового детектора наведена на рисунку 3.14.

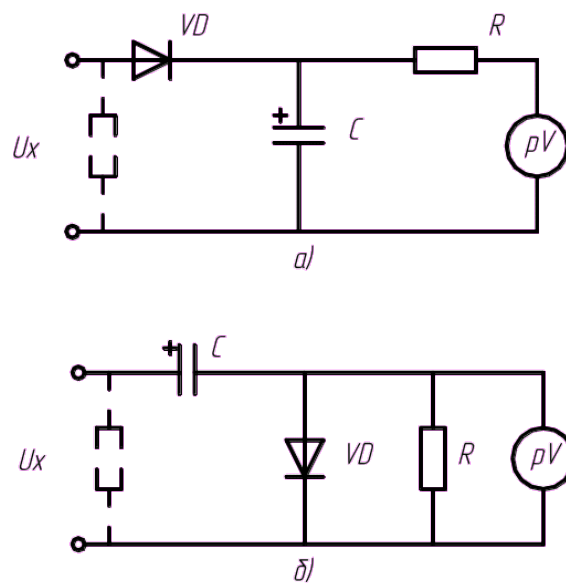


Рисунок 3.14 - Схема пікового перетворювача

Принцип роботи такого перетворювача полягає в наступному. При подачі змінної напруги на вхід діод відкривається під час позитивної напівхвилі сигналу, забезпечуючи заряд конденсатора до амплітудного значення напруги. Під час негативної напівхвилі діод закривається, а конденсатор зберігає накопичений заряд, забезпечуючи стабільну вихідну напругу, пропорційну піковому значенню сигналу.

Зміна напруги на конденсаторі показана на рисунку 3.15.

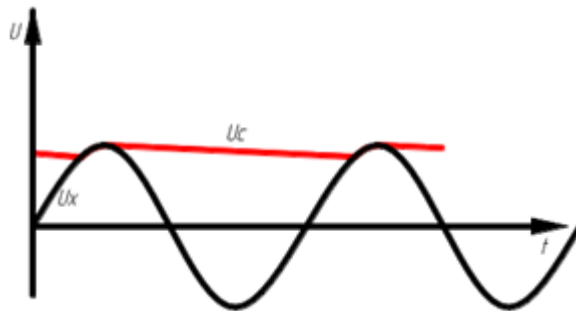


Рисунок 3.15 – Залежність напруги на вході та виході перетворювача

3.4.3.2 Перетворювачі середньоквадратичного значення

Перетворювачі середньоквадратичного значення формують вихідну напругу, яка пропорційна ефективному значенню вхідного сигналу. Принцип роботи таких пристроїв базується на виконанні трьох послідовних операцій:

1. піднесення миттєвого значення сигналу до квадрату;
2. усереднення отриманого результату;
3. обчислення квадратного кореня.

Алгоритм визначення середньоквадратичного значення має вигляд:

$$u(t) \rightarrow u^2(t) \rightarrow \overline{u^2(t)} \rightarrow U_{\text{ef}} \quad (3.3)$$

Реалізація цього методу може виконуватися як електронними схемами, так і програмними засобами.

Один із варіантів такого перетворювача наведено на рисунку 3.16

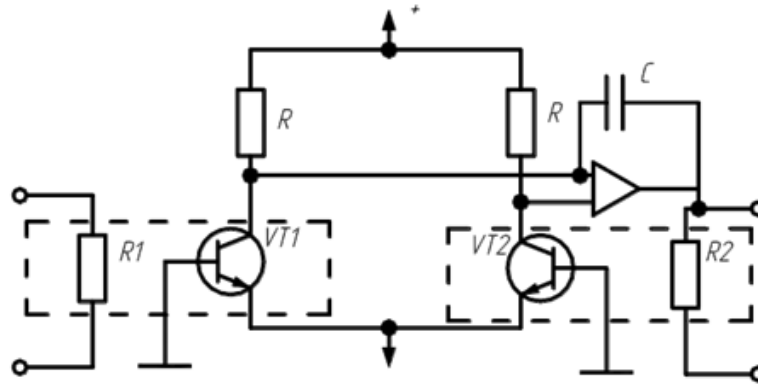


Рисунок 3.16 – Перетворювач середньоквадратичного значення на основі терморезисторів

Вхідна напруга розігріває один резистор R_1 , а опорна напруга постійного струму - інший R_2 . У контурі управління включені за балансною схемою два сприймають тепло транзистора VT_1 і VT_2 , а також інвертуючий підсилювач, який регулює температуру резистора R_2 резистора R_1 , тобто. до настання балансу моста. Коли досягнуто рівноваги, значення напруги постійного струму $U_{\text{вих}}$ пропорційно до середньоквадратичного значення U напруги сигналу на вході схеми.

3.4.3.3 Перетворювач середньовипрямленого значення

Цей тип перетворювачів забезпечує формування постійної напруги, величина якої пропорційна середньовипрямленому значенню вхідного сигналу. Найбільш поширеним рішенням є використання діодних мостових схем

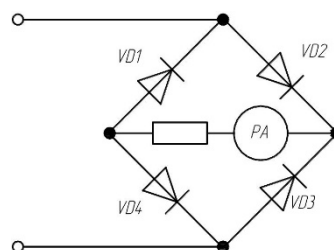


Рисунок 3.17 – Мостова схема перетворювача напруги

Вибір та реалізація перетворювача напруги

Для розроблюваної системи було обрано схему пікового детектора, яка забезпечує високу швидкодію, простоту реалізації та достатню точність вимірювання.

Принципова схема перетворювача наведена на рисунку 3.18

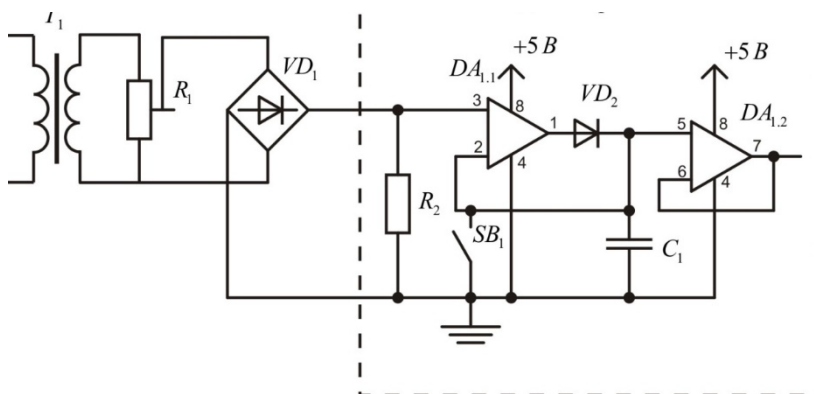


Рисунок 3.18 – Схема перетворювача фазної напруги

Робота пристрою відбувається наступним чином. Змінна напруга мережі знижується за допомогою трансформатора Т1 до безпечного рівня, приблизно 6 В. Далі сигнал подається на діодний міст VD1, де відбувається двонапівперіодне випрямлення.

Після випрямлення сигнал надходить на піковий детектор, який формує постійну напругу, пропорційну максимальному значенню фазної напруги. За допомогою підстроювального резистора виконується калібрування рівня сигналу відповідно до номінального значення фазної напруги.

Отримана постійна напруга подається на вхід аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера, що дозволяє виконувати точний контроль величини фазної напруги та використовувати отримані дані для реалізації алгоритму симетрування.

Таким чином, застосування пікового перетворювача забезпечує ефективне узгодження параметрів електричної мережі з вимогами мікропроцесорної системи керування та дозволяє реалізувати високоточний контроль параметрів напруги.

3.4.4 Схема керування силовим навантаженням

У розроблюваному пристрої мікропроцесорна система керування повинна здійснювати контроль та комутацію зовнішнього силового обладнання, зокрема вольтододавального трансформатора, використовуючи симісторні ключі. Для реалізації цієї функції була створена спеціальна схема керування, призначена для перетворення сигналів стандартних логічних рівнів мікроконтролера у сигнали, придатні для управління силовими електричними колами (рисунок 3.19).

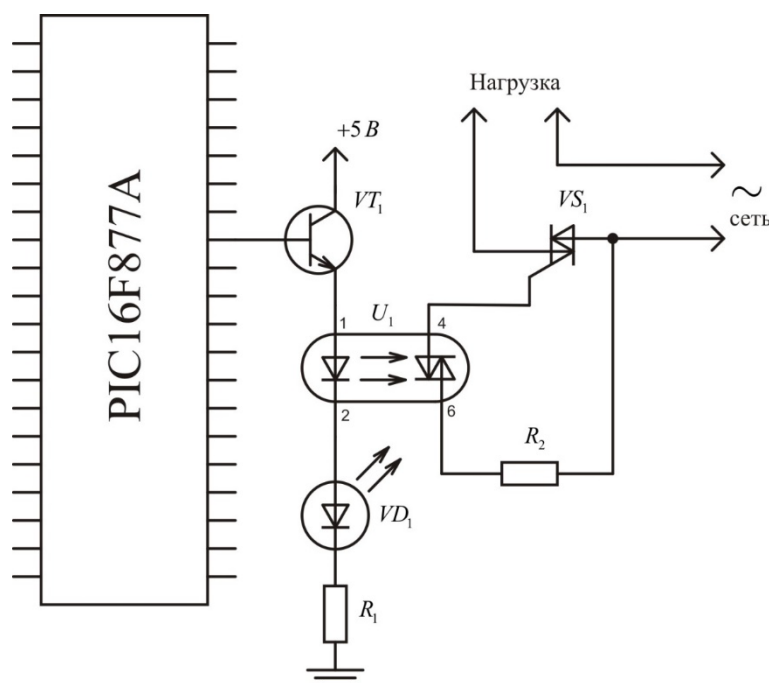


Рисунок 3.19 - Схема керування силовим навантаженням

Однією з основних вимог при побудові даної схеми є забезпечення гальванічної розв'язки між низьковольтними колами мікроконтролера та силовими колами змінного струму напругою 220 В. Такий підхід дозволяє підвищити електробезпеку пристрою, запобігти пошкодженню мікроконтролера та мінімізувати ризик виникнення аварійних режимів.

У дослідному зразку як комутаційний елемент було застосовано симістор типу МАС223А6, який здатний комутувати струми до 20 А. Проте при

використанні пристрою для керування потужними промисловими установками, такими як термопластавтомат Tianjian PLUTO PL 3600 із встановленою потужністю близько 50 кВт, необхідно застосовувати силові ключі з більшими допустимими параметрами струму та потужності.

Для забезпечення електричної ізоляції між керуючою та силовою частинами використовується оптрон типу МОС3021. З метою зменшення навантаження на вихідні порти мікроконтролера у схемі передбачено проміжний транзисторний ключ на основі транзистора, який забезпечує необхідний струм керування світлодіодом оптопари.

Принцип роботи схеми полягає у наступному. За відсутності сигналу керування на виході мікроконтролера встановлюється логічний нуль, транзистор перебуває у закритому стані, світлодіод оптопари не активується, а симістор залишається заблокованим, що відповідає відключеному навантаженню. При подачі логічної одиниці на вихід мікроконтролера транзистор відкривається, через світлодіод оптопари починає протікати струм, що призводить до активації симістора. У результаті цього силове коло замикається, і навантаження отримує живлення від мережі.

Таким чином, запропонована схема забезпечує надійну комутацію силового навантаження та ефективний захист мікропроцесорної системи від впливу високовольтних кіл.

3.4.5 Використання мікросхеми дешифратора KP1533ІДЗ

Для реалізації пофазного регулювання напруги необхідно керувати значною кількістю відпайок вольтододавального трансформатора. У загальному випадку кожна відпайка повинна контролюватися окремим виходом мікроконтролера. Однак кількість доступних портів введення-виведення мікроконтролера є обмеженою, що ускладнює безпосередню реалізацію такого керування.

Для вирішення цієї задачі було застосовано дешифратор типу KP1533ІДЗ, зовнішній вигляд якого наведено на рисунку 3.20.

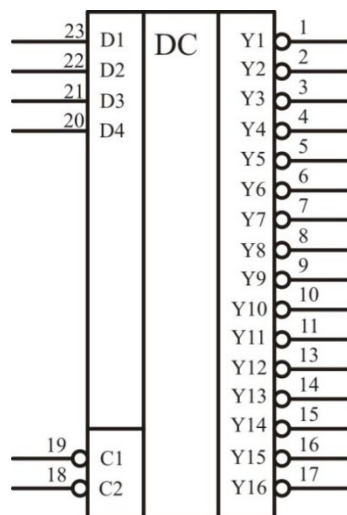


Рисунок 3.20 – Мікросхема дешифратора КР1533ІДЗ

Дана мікросхема дозволяє виконувати перетворення чотирибітного двійкового коду, що подається на її входи, у сигнал на одному з шістнадцяти виходів. Таким чином, використовуючи лише чотири керуючі сигнали мікроконтролера, можна забезпечити незалежне керування шістнадцятьма виконавчими елементами.

У режимі дешифрації вхідні сигнали подаються на входи D1–D4, тоді як входи C1 та C2 виконують функцію дозволу роботи пристрою. Для нормального функціонування на цих входах повинен бути встановлений низький логічний рівень. Якщо хоча б на одному з цих входів з'являється високий рівень сигналу, всі виходи переходять у неактивний стан незалежно від значень керуючого коду.

У режимі демультиплексування входи D1–D4 використовуються для вибору відповідного виходу, а один із входів C1 або C2 виконує функцію інформаційного входу. При цьому сигнал передається лише на вибраний вихід, що дозволяє реалізувати адресне керування виконавчими елементами.

Особливістю мікросхеми КР1533ІДЗ є інверсна логіка вихідних сигналів, тобто при заданій комбінації вхідного коду активний вихід переходить у стан логічного нуля, тоді як інші виходи залишаються у стані логічної одиниці. Це потребує відповідної адаптації схеми керування силовими ключами.

Для забезпечення коректної роботи системи було використано транзистор із відповідним типом провідності, який відкривається при подачі логічного нуля на

керуючий електрод. Такий підхід дозволив узгодити роботу дешифратора із силовими ключами та забезпечити правильну комутацію відповідних відпайок трансформатора.

У результаті застосування дешифратора КР1533ІДЗ стало можливим значно розширити кількість керованих каналів без збільшення числа використовуваних портів мікроконтролера, що підвищило ефективність та функціональні можливості розробленої системи симетрування напруги.

4 АНАЛІЗ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ТРАНСФОРМАТОРІВ

4.1. Техніко-економічна оцінка ефективності застосування симетруючих трансформаторів для зниження несиметрії та несинусоїдальності напруги в електроустановках сільськогосподарського призначення.

Економічний ефект від використання симетруючих трансформаторів у сільських розподільчих мережах визначається зменшенням втрат електроенергії, які виникають унаслідок протікання струмів нульової послідовності та наявності вищих гармонійних складових напруги. Основними джерелами зниження втрат є трансформатори та лінії електропередачі, в яких симетрування режиму дозволяє зменшити додаткові втрати активної потужності.

Загальна економія електричної енергії при застосуванні симетруючих трансформаторів визначається виразом:

$$W = (\Delta P_T + \Delta P_L + \Delta P_H) t \quad (4.1)$$

де ΔP_T – зниження втрат активної потужності в трансформаторі, обумовлене зменшенням струмів нульової послідовності;

ΔP_L – зменшення втрат активної потужності у лініях електропередачі;

ΔP_H – зниження втрат потужності, спричинених наявністю вищих гармонік;

t – тривалість роботи електроустановки.

Зниження втрат потужності у трансформаторі

Зменшення втрат активної потужності у трансформаторі при використанні симетруючого пристрою визначається різницею втрат у стандартному трансформаторі та трансформаторі із симетруючим пристроєм:

$$\Delta P_T = \Delta P_{T1} - \Delta P_{T2} \quad (4.2)$$

де ΔP_{T1} – втрати активної потужності у трансформаторі зі схемою з'єднання обмоток Y/Y_n;

ΔP_{T2} – втрати активної потужності у трансформаторі зі схемою Y/Y_nСУ.

Втрати потужності у трансформаторі без симетрування визначаються залежністю:

$$\Delta P_{T1} = 3I_{01}^2 r_{01} \quad (4.3)$$

де I_{01} – струм нульової послідовності;

r_{01} – активний опір нульової послідовності трансформатора.

Враховуючи зв'язок струму і напруги, отримуємо:

$$\Delta P_{T1} = 3U_{01}^2 / Z_{01} \quad (4.4)$$

де Z_{01} – повний опір нульової послідовності.

Оскільки напруга нульової послідовності пропорційна коефіцієнту несиметрії:

$$U_{01} = K_{0U1} U_1$$

то втрати потужності можна подати у вигляді:

$$\Delta P_{T1} = 3K_{0U1}^2 U_1^2 / Z_{01} \quad (4.5)$$

Аналогічно визначаються втрати потужності у трансформаторі з симетруючим пристроєм:

$$\Delta P_{T2} = 3K_{0U2}^2 U_1^2 / Z_{02} \quad (4.6)$$

де K_{0U2} – коефіцієнт несиметрії напруги при використанні симетруючого пристрою;
 Z_{02} – повний опір нульової послідовності трансформатора із симетруванням.

Таким чином, остаточний вираз для визначення зменшення втрат потужності у трансформаторі має вигляд:

$$\Delta P_T = 3U_1^2 \left(\frac{K_{0U1}^2}{Z_{01}} - \frac{K_{0U2}^2}{Z_{02}} \right) \quad (4.7)$$

Зниження втрат потужності у лініях електропередачі

Втрати потужності в лініях електропередачі, викликані несиметрією, визначаються залежністю:

$$\Delta P_L = 3(I_{01}^2 r_{L01} - I_{02}^2 r_{L02}) \quad (4.8)$$

де I_{01}, I_{02} – струми нульової послідовності відповідно без симетрування та з використанням симетруючого трансформатора;

r_{L01}, r_{L02} – активні опори лінії.

Оскільки застосування симетруючого трансформатора не змінює параметри самої лінії, можна прийняти:

$$r_{L01} = r_{L02}$$

Тоді зменшення втрат потужності визначається лише зниженням струму нульової послідовності.

Зниження втрат потужності від вищих гармонік

Додаткові втрати, пов'язані з несинусоїдальністю напруги, складаються з втрат у трансформаторі та лінії:

$$\Delta P_H = \Delta P_{HT} + \Delta P_{HL} \quad (4.9)$$

Втрати у трансформаторі визначаються виразом:

$$\Delta P_{HT} = \Delta P_{xx} U_n^2 + 0.607 \Delta P_{kz} U_n^2 \quad (4.10)$$

де ΔP_{xx} – втрати холостого ходу;

ΔP_{kz} – втрати короткого замикання;

U_n – напруга n-ї гармоніки.

Втрати у лінії становлять:

$$\Delta P_{HL} = 1.41 r_L I_n^2 \quad (4.11)$$

де r_L – активний опір лінії;

I_n – струм відповідної гармоніки.

Загальна економія електроенергії

Після визначення складових втрат за формулами (4.7–4.11) їх підставляють у загальний вираз (4.1), що дозволяє визначити річну економію електричної енергії від застосування симетруючих трансформаторів.

Результати розрахунків показують, що використання трансформаторів із симетруючими пристроями дозволяє суттєво знизити втрати електроенергії у розподільчих мережах. При цьому додаткові витрати на виготовлення та впровадження симетруючого пристрою компенсуються за рахунок економії електроенергії протягом приблизно одного року експлуатації, що підтверджує високу техніко-економічну ефективність застосування даного технічного рішення в електроустановках сільськогосподарського призначення.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Рівень розвитку електроенергетичної галузі є одним із ключових показників технічного прогресу держави. Електрична енергія широко застосовується у промисловості, транспортній інфраструктурі, будівництві та аграрному секторі завдяки універсальності її використання, високій ефективності передачі та можливості автоматизації технологічних процесів. Водночас експлуатація електроенергетичних установок пов'язана з підвищеним рівнем небезпеки для персоналу та потенційним техногенним впливом на навколишнє середовище. У зв'язку з цим при проектуванні, модернізації та експлуатації електроустановок необхідно передбачати комплекс технічних і організаційних заходів, спрямованих на мінімізацію небезпечних і шкідливих виробничих факторів, а також забезпечення безпечних умов праці.

Значну корективку до виконання умов охорони праці та безпеки вносить введення в Україні з лютого 2022 року військовий стан, які доцільно визначити та відмітити у роботі.

5.1 Організація охорони праці та безпеки в електротехнічних підрозділах у військовий час

В умовах воєнного стану функціонування електротехнічних підрозділів набуває особливого значення, оскільки забезпечення безперервного електропостачання є критично важливим для підтримання роботи об'єктів інфраструктури, промисловості та аграрного сектору. При цьому зростає рівень ризику для обслуговуючого персоналу, що обумовлено можливими пошкодженнями електрообладнання внаслідок бойових дій, нестабільністю режимів електропостачання, а також обмеженими можливостями технічного обслуговування і ремонту. У зв'язку з цим організація охорони праці в електротехнічних підрозділах у військовий час повинна базуватися на принципах підвищеної безпеки, оперативності реагування та мінімізації виробничих ризиків.

Основним завданням системи охорони праці є забезпечення безпечних умов виконання робіт, збереження життя і здоров'я персоналу, а також підтримання працездатності електротехнічного обладнання. Для цього впроваджується комплекс організаційних, технічних та інженерних заходів, що відповідають вимогам чинних нормативних документів, зокрема Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕС) та нормативних актів з охорони праці.

До організаційних заходів належать: проведення обов'язкових інструктажів з охорони праці та електробезпеки з урахуванням специфіки роботи в умовах підвищеної небезпеки; перевірка рівня кваліфікації персоналу та присвоєння відповідних груп з електробезпеки; оформлення робіт за нарядами-допусками або розпорядженнями; забезпечення постійного контролю за виконанням робіт; обмеження доступу сторонніх осіб до електроустановок. Особлива увага приділяється підготовці персоналу до дій у надзвичайних ситуаціях, зокрема при аварійних відключеннях, пошкодженнях електромереж або виникненні пожеж.

Технічні заходи безпеки передбачають застосування ефективних засобів електрозахисту, таких як захисне заземлення, автоматичні вимикачі, пристрої захисного відключення, системи релейного захисту та автоматики. Важливим елементом є використання індивідуальних засобів захисту, включаючи діелектричні рукавички, взуття, ізолюючі інструменти, захисні каски та спеціальний одяг. Також забезпечується регулярний контроль технічного стану ізоляції, контактних з'єднань та заземлювальних пристроїв.

В умовах військового часу додатково враховується ймовірність механічних пошкоджень електрообладнання внаслідок обстрілів або вибухових впливів. У зв'язку з цим передбачаються заходи щодо оперативного знеструмлення пошкоджених ділянок мережі, локалізації аварійних зон та швидкого відновлення електропостачання. Персонал повинен діяти відповідно до затверджених планів реагування на надзвичайні ситуації, що включають алгоритми відключення обладнання, евакуації та повідомлення відповідних служб.

Таким чином основні заходи з безпеки в електротехнічних підрозділах у військовий час мають комплексний та систематизований характер, основні види яких підібрано та наглядно пояснено на рисунку 5.1.

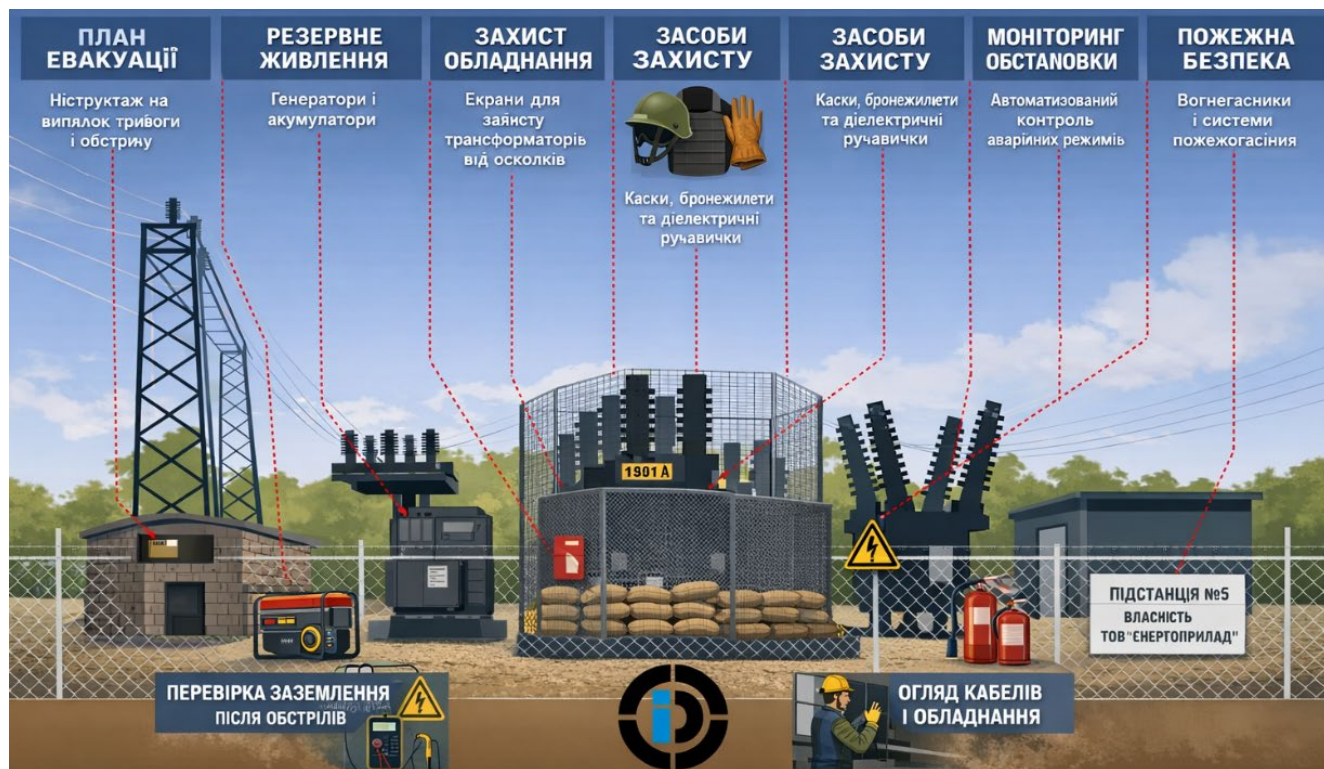


Рисунок 5.1 – Основні заходи безпеки електротехнічного персоналу у військовий час.

Таким чином, організація охорони праці та безпеки в електротехнічних підрозділах у військовий час є комплексним процесом, спрямованим на забезпечення безпечної експлуатації електроустановок та захист персоналу від виробничих і техногенних небезпек. Реалізація відповідних організаційних і технічних заходів дозволяє мінімізувати ризики аварій, підвищити надійність роботи електрообладнання та забезпечити стабільне функціонування систем електропостачання в умовах підвищеної небезпеки.

5.2 Захисні заходи та технічні засоби, що забезпечують нормативний рівень надійності та безпеки електроустановок

Основною метою застосування захисних заходів є запобігання випадковому контакту персоналу зі струмоведучими елементами, а також недопущення появи небезпечних потенціалів на металевих конструкціях, корпусах обладнання або на поверхні ґрунту. Основним нормативним документом, який регламентує вимоги щодо безпечної експлуатації електроустановок, є Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Виконання вимог цього нормативного документа забезпечує надійність роботи електрообладнання та захист персоналу від ураження електричним струмом.

5.2.1 Заходи, що забезпечують недоступність струмоведучих частин, які перебувають під напругою

Для виключення можливості випадкового наближення людей або технічних засобів до струмоведучих елементів підстанцій застосовуються такі інженерно-технічні рішення:

- раціональне планування розміщення обладнання з урахуванням конфігурації території та експлуатаційних умов, що забезпечує безпечний доступ до робочих зон;
- використання захисних огорож, ізолюючих кожухів та бар'єрів для струмоведучих частин;
- розміщення струмоведучих елементів на безпечній висоті, що виключає можливість їх випадкового контакту;
- застосування систем попереджувальної сигналізації, включаючи світлові та звукові індикатори;
- встановлення попереджувальних знаків і плакатів відповідно до вимог нормативних документів;
- використання індивідуальних сигналізаторів напруги;

- застосування кольорового маркування струмоведучих шин трифазної системи змінного струму (фаза А – жовтий колір, фаза В – зелений, фаза С – червоний);
- використання систем механічного та електричного блокування, що запобігають доступу до небезпечних зон;
- проведення регулярного контролю стану ізоляції електрообладнання шляхом випробувань і діагностики.

Періодичні перевірки ізоляції дозволяють своєчасно виявляти пошкодження та попереджувати аварійні ситуації.

5.2.2 Захист від появи небезпечної напруги на корпусах обладнання та виникнення крокової напруги

Для запобігання появі небезпечного потенціалу на металевих частинах обладнання застосовуються такі захисні заходи:

- використання системи захисного заземлення;
- застосування релейного захисту, який автоматично відключає обладнання при аварійних режимах;
- встановлення пристроїв захисту від атмосферних перенапруг, включаючи блискавковідводи;
- використання нелінійних обмежувачів перенапруги;
- застосування електрозахисних засобів, таких як:
 - ізолюючі штанги;
 - покажчики напруги;
 - ізолюючі кліщі;
 - діелектричні рукавички, боти та килимки;
 - ізолюючі підставки.

5.2.3 Заземлювальні пристрої підстанції

Усі металеві частини електрообладнання, які за нормальних умов не перебувають під напругою, але можуть опинитися під потенціалом у разі пошкодження ізоляції, повинні бути надійно заземлені.

Заземлення поділяється на:

- робоче заземлення – забезпечує нормальний режим функціонування електроустановки;
- захисне заземлення – призначене для захисту персоналу від ураження електричним струмом;
- блискавкозахисне заземлення – забезпечує відведення струмів блискавки в землю.

Заземлювальні пристрої виконуються з використанням вертикальних і горизонтальних електродів, які з'єднуються у єдину систему та забезпечують ефективне відведення струму.

5.3 Організаційні та технічні заходи безпеки при виконанні електромонтажних робіт

Безпечне виконання робіт в електроустановках забезпечується комплексом організаційних і технічних заходів.

До організаційних заходів належать:

- оформлення наряду-допуску або розпорядження на виконання робіт;
- проведення інструктажу персоналу;
- допуск до роботи кваліфікованого персоналу;
- здійснення постійного нагляду під час виконання робіт;
- правильне оформлення завершення робіт.

Відповідальні особи повинні мати відповідну кваліфікаційну групу з електробезпеки (не нижче IV або V).

До технічних заходів належать:

- відключення обладнання від джерел живлення;
- блокування приводів комутаційних апаратів;
- встановлення попереджувальних плакатів;
- перевірка відсутності напруги;
- встановлення переносного заземлення;
- огороження робочих зон.

5.3.1 Засоби індивідуального та колективного захисту

Засоби захисту призначені для запобігання ураженню електричним струмом та поділяються на:

Основні ізолюючі засоби:

- ізолюючі штанги;
- електровимірювальні кліщі;
- покажчики напруги;
- спеціальні ізолюючі пристрої для роботи під напругою.

Додаткові засоби захисту:

- діелектричні рукавички;
- діелектричне взуття;
- ізолюючі підставки;
- переносні заземлення;
- захисні екрани та накладки.

Засоби індивідуального захисту:

- захисні каски;
- захисні окуляри;
- респіратори;
- запобіжні пояси;
- спеціальний захисний одяг.

Використання комплексу зазначених заходів і засобів забезпечує необхідний рівень електробезпеки, запобігає аварійним ситуаціям та створює безпечні умови праці під час експлуатації електроустановок.

5.4 Пожежна безпека на підстанції

Забезпечення пожежної безпеки на електричних підстанціях є одним із ключових завдань при їх проектуванні та експлуатації. Комплекс протипожежних заходів формується відповідно до чинних нормативних документів і передбачає оцінку пожежного ризику, визначення потенційних джерел займання та впровадження технічних і організаційних засобів попередження пожеж.

Пожежна небезпека підстанцій обумовлена наявністю горючих матеріалів у складі електрообладнання, насамперед ізоляційних матеріалів обмоток трансформаторів, електричних машин, кабельних ліній і проводів. Особливо небезпечними є комутаційні апарати відкритого типу та відкриті плавкі запобіжники, в яких при розмиканні електричного кола або перегоранні плавкої вставки виникає електрична дуга та іскроутворення. У зв'язку з цим у сучасних електроустановках застосовуються переважно комутаційні апарати закритого виконання, що значно знижує ризик виникнення пожежі.

Додатковим фактором пожежної небезпеки є використання трансформаторної оливи, температура спалаху якої становить приблизно 140 °С. У разі аварійних режимів, таких як коротке замикання або перевантаження, можливий перегрів обмоток трансформатора, що може призвести до займання ізоляційних матеріалів або оливи. Відповідно до вимог нормативних документів, підстанції належать до пожежонебезпечної зони класу II-III, що враховується при виборі конструкції електрообладнання, матеріалів і систем захисту.

Основними причинами виникнення пожеж на підстанціях є:

- короткі замикання та замикання на землю;
- механічне пошкодження або старіння ізоляції;
- перевантаження електрообладнання;

- утворення електричної дуги та іскріння;
- перегрів струмоведучих частин;
- вплив атмосферних перенапруг і ударів блискавки;
- несправність комутаційних апаратів;
- порушення умов експлуатації електрообладнання.

Для запобігання виникненню пожеж на підстанціях передбачено комплекс технічних заходів, зокрема:

- застосування систем релейного захисту, включаючи диференційний, максимальний струмовий і газовий захист трансформаторів, що забезпечують своєчасне відключення обладнання при аварійних режимах;
- використання систем контролю стану ізоляції для раннього виявлення пошкоджень;
- встановлення автоматичних систем пожежної сигналізації та пожежних сповіщувачів;
- забезпечення ефективного охолодження трансформаторів та іншого електрообладнання;
- використання негорючих або важкогорючих ізоляційних матеріалів;
- застосування обмежувачів перенапруги та систем блискавкозахисту;
- дотримання нормативних відстаней між обладнанням.

Крім того, на підстанціях обов'язково передбачаються первинні засоби пожежогасіння, які розміщуються у доступних та добре помітних місцях. До них належать:

- вогнегасники (вуглекислотні, порошкові);
- пожежні щити;
- пожежні крани;
- ящики з піском;
- протипожежний інвентар.

Таким чином, впровадження комплексу організаційних і технічних заходів пожежної безпеки забезпечує своєчасне виявлення та локалізацію пожеж, знижує

ймовірність виникнення аварійних ситуацій і гарантує безпечну експлуатацію електроустановок підстанції.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи було проведено комплексне дослідження проблеми несиметрії та несинусоїдності напруги в трифазних електричних мережах низької напруги, а також розроблено технічні рішення щодо підвищення якості електричної енергії шляхом застосування симетруючих трансформаторів та автоматизованих пристроїв керування.

У ході аналізу сучасного стану систем електропостачання встановлено наявність наступних негативних факторів:

- 1) наявність струмів нульової послідовності в мережах напругою до 1 кВ, в яких домінує комунально-побутове та змішане навантаження, що характеризується значною часткою однофазних електроприймачів, нерівномірно розподілених між фазами, що призводить до зростання втрат потужності, погіршення режимів роботи трансформаторів і ліній електропередачі, а також до зниження ефективності функціонування електротехнічного обладнання;
- 2) наявність нелінійних споживачів, що генерують вищі гармоніки, які спричиняють додаткові втрати енергії та погіршення показників якості електроенергії.

За даними аналізу методів симетрування встановлено що:

- 1) традиційні підходи, зокрема перерозподіл навантажень між фазами, є ефективними лише для стаціонарних режимів роботи та не дозволяють забезпечити необхідний рівень симетрії при змінному характері навантаження;
- 2) використання трансформаторів зі схемою з'єднання обмоток типу «зірка–зигзаг» або застосування симетруючих пристроїв у нульовому провіднику дозволяє значно зменшити вплив струмів нульової послідовності, однак ці рішення не забезпечують повної компенсації несиметрії в умовах динамічної зміни навантаження.

У результаті проведених досліджень обґрунтовано доцільність застосування автоматизованих симетруючих пристроїв, здатних оперативно реагувати на зміну режимів роботи електромережі. Використання мікропроцесорної системи

дозволило реалізувати алгоритм автоматичного контролю та регулювання фазних напруг, що забезпечує підтримання їх симетрії в режимі реального часу.

За даними техніко-економічної оптимізації параметрів симетруючих трансформаторів проведено оцінку їх ефективності. Встановлено, що застосування симетруючих трансформаторів дозволяє зменшити втрати електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередачі за рахунок зниження струмів нульової послідовності та компенсації вищих гармонік. Розрахунки показали, що додаткові капітальні витрати на встановлення симетруючих пристроїв окупаються протягом одного року за рахунок зниження втрат електроенергії та підвищення ефективності роботи електроустановок.

Результати експериментальних і виробничих досліджень підтвердили високу ефективність застосування симетруючих трансформаторів зі схемою з'єднання обмоток Y/Y_n із симетруючим пристроєм. Встановлено, що їх використання дозволяє значно зменшити несиметрію фазних напруг, знизити додаткові втрати потужності та покращити режими роботи електричних мереж.

Практична цінність отриманих результатів полягає в можливості застосування розробленого симетруючого пристрою в системах електропостачання промислових і сільськогосподарських підприємств, а також у розподільчих мережах із значною часткою однофазних навантажень, що дозволить підвищити якість електричної енергії, знизити втрати потужності, підвищити надійність електропостачання та продовжити термін служби електрообладнання.

Таким чином, у результаті виконаної роботи досягнуто поставлену мету — розроблено та обґрунтовано ефективний технічний засіб симетрування фазних напруг у трифазних електричних мережах, який забезпечує підвищення якості електричної енергії, зниження енергетичних втрат і покращення техніко-економічних показників функціонування систем електропостачання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шкрабець Ф.П. Класифікація і структура втрат електроенергії / Ф.П. Шкрабець, Ю.В. Куваєв, Д.В. Циценков, П.Ю. Красовський // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Вип. 3(32). 2005. С.122–124.
2. Козирський В.В. Електропостачання агропромислового комплексу: підруч. / Козирський В.В., Каплун В.В., Волошин С.М. К. : Аграрна освіта, 2011. 448 с.
3. Праховник А. В., Денисюк С. П., Коцар О. В. Якість електричної енергії в системах електропостачання: монографія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 352 с..
4. Попова О. А., Квітка С. О. Аналіз несиметричних режимів роботи трифазних систем електропостачання з нелінійним навантаженням // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. 2021. Вип. 11(41). С. 112–118.
5. IEEE Std 1159-2019. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. IEEE, 2019. 98 p..
6. Калініченко В.О. Електропостачання сільського господарства: навч. посіб. / В.О. Калініченко, О.М. Лисенко. Мелітополь: ТДАТУ, 2020. 284 с
7. ГНД 34.09.204-2004. Методичні вказівки з аналізу технологічних витрат електроенергії та вибору заходів щодо їх зниження / М-во палива та енергетики України. – Офіц. вид. – К.: ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2004. 159 с.
8. Методи та засоби зниження технічних втрат електроенергії в елементах Систем електропостачання / Д. В. Циценков, П. Ю. Красовський // Електротехніка та електроенергетика, 2015. № 1. С. 77–82.
9. Сотнік О.В. Дослідження втрат електроенергії в мережах сільських населених пунктів в умовах відхилення напруги / О.В. Сотнік // 102 Энергосбережение: Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. Харків: ХНТУСГ. – № 12(131). 2014. С. 22 – 26.

10. Мірошник О.О. Оцінка імовірнісної несиметрії струмів і напруг на основі графіків навантаження комунального-побутових споживачів / О.О. Мірошник . Харків: ХНТУСГ. 2017р. 12 с. Режим доступу до ресурсу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2017_261_3 .

11. Проектування технологій і технічних засобів для тваринництва. За ред. Скорика О.П., Полупанова В.М (авт. Науменко О.А., Бойко І.Г., Грідасов В.І., Дзюба А.І. та інші) Харків ХНТУСГ, 2009. 429 с.

12. Електричне освітлення та опромінення: навч. посіб. для студентів вищ. навч. закл. / Р.В. Кушлик, В. Ф. Яковлев, Ю. М. Куценко, М. Л. Лисиченко, М. П. Кунденко, Ю. М. Федюшко, Х: ТОВ «Планетапрінт», 2016. 332 с.

13. Бурбело М. Й. Електропостачання промислових підприємств (Курсове проектування) [Текст] : навч. посібник для студ. енергет. спец. / М. Й. Бурбело; Вінницький держ. технічний ун-т. Вінниця: 1998. 103 с.

14. Кігель Г.А., Півняк Г.Г. Електричні мережі систем електропостачання: Друге вид. перероб. і доп. / Г.А.Кігкль, Г.Г. Півняк. Дніпропетровськ: національний гірничий університет, 2012. 318 с.

15. Кузнецов В. Г., Тугай Ю. І. Системи електропостачання промислових підприємств: підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 420 с..

16. IEC 61000-4-30:2015. Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-30: Power quality measurement methods. IEC, 2015. 78 p..

17. Костенко М. В., Мельник О. Г. Релейний захист та автоматика електроенергетичних систем: підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 312 с.

18. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування: Навчальний посібник /Барало О.В., Самойленко П.Г., Гранат С.Є., Ковальов В.О. К.: Аграрна освіта, 2010. 557 с.

19. Гетьман О.О. Економіка підприємства : [Навчальний посібник] / О.О. Гетьман, В.М. Шаповал– 2 вид. К.: Центр учбової літератури, 2010. 488с.

20. Правила улаштування електроустановок: нормативно-технічний матеріал / відп. за вип. Г. Є. Лискова. Харків: Індустрія, 2008. 424 с.

21. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів [Текст] : [затв. . Наказ М-ва палива та енергетики України 25.07.2006 № 258] / М-во палива та енергетики України. Х. : Індустрія : Енергетичні рішення, 2012. 318 с.

22. Безпека життєдіяльності та охорона праці (Практичний курс) [Текст]: навч. посібник / [Атаманчук П.С., Мендерецький В.В., Панчук О.П., Чорна О.Г.] Кам'янець-Подільський: "Думка", 2010. 152 с.

23. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). 7-ме видання. Київ: Міненерговугілля України, 2017. 756 с.

ДОДАТОК А

Таблиця А1 — Порівняння методів симетрування та зниження несиметрії напруги

Група рішень	Суть методу	Де найкраще працює	Переваги	Недоліки/обмеження	Коли обирати
Схемні (мережеві) заходи	Підключення джерел перекосу до вузлів із великим S_k , перерозподіл фаз, окремі трансформатори, підвищення «жорсткості»	Вузли 110–220 кВ, мережі з великим запасом потужності КЗ	Низька складність, без електроніки, мінімум обслуговування	Часто дорого через мідь/переріз і/трансформатори; не дає повного ефекту	Перший етап завжди; коли виконується $S_k \geq 5S_{1\phi}$
Індивідуальне СУ	Компенсація біля конкретного навантаження	Потужний одиничний несиметричний ЕП	Максимальний локальний ефект	Висока встановлена потужність; не завжди раціональне використання елементів	Коли «винуватець» один/дво і вони стабільні
Групове СУ	Симетрування для групи навантажень/ділянки	Цехові/вузлові підстанції, кілька технологічних приєднань	Компроміс “ефект/вартість”	Потрібне коректне зонування мережі	Типова ситуація в СЕС підприємств
Централізоване СУ	Компенсація у вузлі приєднання	Підстанції, де важливо знизити K_{2U} на шинах	Менша встановлена потужність СУ	Несиметричні струми в мережі зберігаються	Коли важливо «очистити» вузол, а не кожну лінію
Трансформаторні СУ (Скотт)	Перетворення та перерозподіл напруг/струмів трансформаторами	Двофазні/специфічні навантаження (індукційні печі тощо)	Простота, надійність, без керування	Нерегульованість; залежність від режиму навантаження	Для типових установок зі зрозумілим режимом

Група рішень	Суть методу	Де найкраще працює	Переваги	Недоліки/ обмеження	Коли обирати
Автотрансформаторні/дільникові СУ	Симетрування через автотрансформаторні зв'язки, відпаювання	Нелінійні навантаження змінним $\cos \varphi$	Можливість регулювання (ступінчасто)	Потужність СУ близька до потужності навантаження; ускладнення схеми	Коли потрібна адаптація під $\cos \varphi$
Індуктивні о-ємнісні СУ (Штейнметц)	Паралельне підключення L і C для компенсації зворотної послідовності	Найкраще при $\cos \varphi \approx 1$	Відносна простота, зрозуміла фізика процесу	Для активно-індуктивних режимів потрібні додаткові елементи; при змінності — керування	Для стабільних режимів або при допустимих коливаннях
Керовані СУ (дискретні/плавні)	Регулювання L/C (контактори/тиристри/керовані реактори)	Різко змінні технологічні навантаження	Тримають K_{2U} межах при змінності	Додаткові втрати, гармоніки від тиристорів, складність	Коли без керування не виконати норматив (або вимога 0,95)
Ємнісні СУ на БК з різною фазною потужністю	Нерівні БК по фазах: симетрування + КРМ	СЕС підприємств, де потрібна компенсація Q	Дві функції одразу; практичність	Повне симетрування часто недоцільне; ефект залежить від характеру навантаження	Найчастіший вибір для "симетрування до нормативу"
Симетрокомпенсуючі пристрої	Поєднання симетрування КРМ з регулюванням	Електротехнологічні виробництва	Менша встановлена потужність порівняно з двома	Складніший алгоритм керування	Коли одночасно суттєві K_{2U} і реактивні навантаження

Група рішень	Суть методу	Де найкраще працює	Переваги	Недоліки/ обмеження	Коли обирати
			окремими системами		
СУ з обертовим магнітним полем (L-L, L-C)	Регулювання модуля/фази струму зворотної послідовності поворотом ротора	Спеціальні задачі, де потрібне широке регулювання фази	Гнучке керування фазою в широких межах	Нетипове рішення, складність конструкції/експлуатації	Коли треба керувати і модулем, і фазою I_2
Введення додаткової системи ЕРС	Додавання ЕРС зворотної послідовності у розрив ліній	Спеціальні системи регулювання			