

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

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
“ ____ ” _____2024р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ
ВИЩОЇ ОСВІТИ**

на тему:

**«Дослідження можливостей регулювання напруги в
розподільчих електричних мережах з використанням
пристроїв регулювання напруги під навантаженням
силових трансформаторів»**

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу магістратури, групи ЕЕ-23МЗ
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____ Григорій КРИХОВЕЦЬКИЙ
« ____ » _____ 2024 р.

Керівник роботи професор, к.т.н.
_____Петро ПЛЄШКОВ
« ____ » _____ 2024 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет центр заочної та дистанційної освіти

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електротехнічні системи електроспоживання»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

_____ Петро ПЛІШКОВ

«_____» _____ 20__ р.

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

Криховецький Григорій Михайлович

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) **Дослідження можливостей регулювання напруги в розподільчих електричних мережах з використанням пристроїв регулювання напруги під навантаженням силових трансформаторів**
Investigation of the possibilities of voltage regulation in distribution electrical networks using voltage regulating devices under load of power transformers

2. Керівник роботи (проекту) Плішков Петро Григорович, к.т.н., професор

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 12.12.2024 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) _____
Вступ; Аналіз методів регулювання напруги під навантаженням силового трансформатора; Теоретичні підходи до вирішення задач керування пристроями регулювання напруги під навантаженням; Математичне моделювання управління пристроями РПН силових трансформаторів; Аналіз ефективності роботи системи автоматичного управління пристроєм РПН силового трансформатора; Техніко-економічна ефективність використання системи управління пристроєм РПН силового трансформатора; Охорона праці в обслуговуванні електротехнічних установок; Висновки.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	<i>07.10.24</i>	
2	<i>Аналіз методів регулювання напруги під навантаженням силового трансформатора</i>	<i>15.10.24</i>	
3	<i>Теоретичні підходи до вирішення задач керування пристроями регулювання напруги під навантаженням</i>	<i>22.10.24</i>	
4	<i>Математичне моделювання управління пристроями РПН силових трансформаторів</i>	<i>04.11.24</i>	
5	<i>Аналіз ефективності роботи системи автоматичного управління пристроєм РПН силового трансформатора</i>	<i>12.11.24</i>	
6	<i>Техніко-економічна ефективність використання системи управління пристроєм РПН силового трансформатора</i>	<i>18.11.24</i>	
7	<i>Охорона праці в обслуговуванні електротехнічних установок</i>	<i>24.11.24</i>	
8	<i>Висновки</i>	<i>02.12.24</i>	
9	<i>Оформлення пояснювальної записки ВКР</i>	<i>08.12.24</i>	
10	<i>Оформлення презентаційної частини ВКР</i>	<i>10.12.24</i>	

Дата видачі завдання

Підпис керівника _____

« ____ » _____ 2024 р.

Петро ПЛЄШКОВ

Завдання прийнято до виконання

Підпис здобувача _____

« ____ » _____ 2024 р.

Григорій КРИХОВЕЦЬКИЙ

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 114 с.; 62 рис.; 11 табл.; 30 джерел.

Криховецький Г.М. Дослідження можливостей регулювання напруги в розподільчих електричних мережах з використанням пристроїв регулювання напруги під навантаженням силових трансформаторів. – Рукопис.

Магістерська робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2024 рік.

Об'єктом досліджень є силові трансформатори з механічним і безконтактним пристроєм регулювання напруги під навантаженням.

Предмет досліджень – ефективність покращення рівнів показників якості електроенергії шляхом регулювання напруги.

Мета дослідження полягає у зменшенні рівнів усталених відхилень і несиметрії напруги та покращенні якості напруги у розподільчих електричних мережах (РЕМ) через впровадження автоматизованого управління регулюючими пристроями силових трансформаторів.

Для досягнення цієї мети були застосовані методи комп'ютерного імітаційного моделювання, багатокритеріальної та скалярної оптимізації, теорії електричних кіл, автоматичного регулювання напруги.

Розробка комп'ютерних імітаційних моделей САУ дозволила провести детальний аналіз запропонованих систем автоматичного управління безконтактними пристроями РПН, в результаті якого було підтверджено, що запропонований метод значно ефективніший за існуючі методи.

Ключові слова: силовий трансформатор, несиметрія напруги, несинусоїдальність напруги, електричні мережі, якість електроенергії, регулювання напруги.

ABSTRACT

Qualification work: 114 p.; 62 fig.; 11 tables; 30 sources.

Krykhovetskyi H.M. Research on the possibilities of voltage regulation in distribution electrical networks using voltage regulation devices under load of power transformers. – Manuscript.

Master's thesis in specialty 141 "Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics", OPP "Electrical engineering systems of electricity consumption". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2024.

The object of research is power transformers with mechanical and contactless voltage regulation devices under load.

The subject of research is the effectiveness of improving the levels of electricity quality indicators by regulating voltage.

The purpose of the study is to reduce the levels of steady-state deviations and voltage asymmetry and improve the voltage quality in distribution electrical networks (DEM) through the implementation of automated control of power transformer control devices.

To achieve this goal, the methods of computer simulation modeling, multi-criteria and scalar optimization, theory of electrical circuits, and automatic voltage regulation were applied.

The development of computer simulation models of the automatic voltage regulation allowed for a detailed analysis of the proposed automatic control systems for non-contact tap-changer devices, as a result of which it was confirmed that the proposed method is significantly more effective than existing methods.

Keywords: power transformer, voltage asymmetry, voltage non-sinusoidality, electrical networks, electricity quality, voltage regulation.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА.....	8
1.1. Методи зниження рівнів усталеного відхилення та несиметрії напруг в розподільчих мережах.	8
1.2. Технічні засоби варіювання коефіцієнта трансформації силового трансформатора.	14
1.3. Огляд пристроїв автоматизації зміни коефіцієнта трансформації силового трансформатора.	22
1.4. Шляхи зниження відхилення та несиметрії напруги в РЕМ за допомогою автоматизації зміни коефіцієнта трансформації.....	31
2 ТЕОРЕТИЧНІ ПІДХОДИ ДО ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЯМИ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ.....	38
2.1. Математичне відображення зв'язків між вхідними та вихідними параметрами пристрою керування.	38
2.2. Шляхи вирішення задач керування пристроями РПН силових трансформаторів.....	46
2.3. Методи керування пристроєм РПН силового трансформатора.....	47
3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ УПРАВЛІННЯ ПРИСТРОЯМИ РПН СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ.....	52
3.1. Моделювання управління пристроєм РПН силового трансформатора.	52
3.2. Комп'ютерна модель управління пристроєм РПН силового трансформатора із схемою з'єднання обмоток «зірка/трикутник»...	55
3.3. Комп'ютерна модель управління пристроєм РПН трансформатора зі схемою об'єднання обмоток «трикутник/зірка з нулем».	62
3.4. Комп'ютерна модель управління пристроєм РПН трансформатора, що має схему з'єднання обмоток «трикутник/зигзаг з нулем».	66
3.5. Обробка результатів комп'ютерного моделювання системи	

	управління пристроєм РПН силового трансформатора.	68
3.6.	Результати моделювання системи управління пристроєм РПН трансформатора зі з'єднанням обмоток «зірка/трикутник».....	70
3.7.	Результати комп'ютерного моделювання системи управління пристроєм РПН трансформатора зі схемою з'єднання обмоток «трикутник/зірка з нулем».	77
3.8.	Результати комп'ютерного моделювання роботи САУ пристроєм РПН трансформатора зі з'єднанням обмоток «трикутник/зизгаг з нулем».	83
4	АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ПРИСТРОЄМ РПН СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА.....	87
4.1.	Практична реалізація системи управління пристроєм РПН трансформатора.	87
4.2.	Експериментальні дослідження системи автоматизації процесу управління пристроєм РПН силового трансформатора.	89
4.3.	Результати експериментальних досліджень системи управління пристроєм РПН трансформатора.	90
5	ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРИСТРОЄМ РПН СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА.....	94
6	ОХОРОНА ПРАЦІ В ОБСЛУГОВУВАННІ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ УСТАНОВОК	100
6.1.	Основи охорони праці в енергетиці.	100
6.2.	Вплив шкідливих факторів.	103
6.3.	Безпека праці на підстанції 35/10 кВ.	105
6.4.	Правила поведінки в надзвичайних ситуаціях.....	106
	ВИСНОВКИ.....	108
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	110

ВСТУП

У розподільчих електромережах (РЕМ) присутність потужних споживачів енергії з різко змінним режимом роботи, а також нелінійних і несиметричних споживачів негативно впливає на якість електроенергії.

На сьогодні розроблено чимало методів та технічних засобів для покращення цих показників. Одним із найбільш результативних підходів є використання пристроїв корекції та регулювання, які дозволяють одночасно підвищувати якість електроенергії за одним чи декількома параметрами.

Серед ключових характеристик якості електроенергії виділяють відхилення напруги, а також коефіцієнти асиметрії напруг у зворотній і нульовій послідовностях. Якщо ці параметри не відповідають встановленим нормам, це призводить до додаткових втрат енергії, скорочення терміну служби ізоляції обладнання, такого як електричні машини, трансформатори та кабелі, що в свою чергу спричиняє великі фінансові втрати в різних галузях промисловості.

Для зменшення коефіцієнтів асиметрії напруг у зазначених послідовностях впроваджено багато спеціалізованих симетрувальних пристроїв. Однак їх широке використання в сучасних РЕМ ускладнене через високу вартість цих установок.

Для зменшення сталих відхилень напруги в розподільчих електромережах (РЕМ) застосовують різноманітні засоби регулювання, зокрема конденсаторні батареї, реактори, синхронні компенсатори та інше. Серед цих засобів найвживанішим є силовий трансформатор, оснащений пристроєм автоматичного регулювання напруги під навантаженням (РПН).

Завдяки розвитку силової електроніки з'явилися РПН, в яких для перемикання струмових кіл використовуються напівпровідникові елементи, такі як тиристори, транзистори або симістори. Ці пристрої мають значні переваги над механічними аналогами, зокрема високу швидкодію, більшу

надійність та простішу ремонтпридатність. Крім того, здатність таких пристроїв змінювати коефіцієнт трансформації пофазно дозволяє впливати не лише на стабільність напруги, але й на рівень її асиметрії.

Отже, створення систем автоматичного управління (САУ) для безконтактних РПН силових трансформаторів є достатньо актуальним завданням. Це дає змогу одночасно знижувати як відхилення напруги, так і її несиметрію в РЕМ.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Для ефективної передачі та розподілу електроенергії в розподільчих електромережах (РЕМ) необхідно автоматично контролювати рівні відхилень і асиметрії напруги, що включає регулювання та симетрування напруги. Найбільш поширеним способом регулювання є зміна коефіцієнта трансформації силового трансформатора. Цей підхід реалізується за допомогою різних технічних засобів, серед яких найбільш досконалим є пристрій автоматичного регулювання напруги під навантаженням (РПН), що дозволяє виконувати регулювання автоматично.

У цьому розділі проаналізовано дослідження, метою яких є вдосконалення методів автоматизації управління пристроями РПН силових трансформаторів.

1.1. Методи зниження рівнів усталеного відхилення та несиметрії напруг в розподільчих мережах.

Для забезпечення електромагнітної сумісності між електричною мережею та підключеними до неї споживачами необхідно, щоб показники якості електроенергії (ПЯЕ), зокрема рівні сталих відхилень напруги ΔU_y та коефіцієнти асиметрії напруг у зворотній K_{2U} і K_{0U} нульовій послідовностях, у точках підключення споживачів до РЕМ відповідали нормам, визначеним ДЕСТ 13109-97.

Для досягнення допустимих значень параметрів ΔU_y , K_{2U} , K_{0U} у розподільчих мережах слід здійснювати регулювання напруги та її симетрування.

Види регулювання напруги в РЕМ.

На рисунку 1.1 представлена класифікація основних видів регулювання напруги в РЕМ .



Рисунок 1.1 - Види регулювання напруги в РЕМ

В системах розподільчих електромереж (РЕМ) використовуються два основні види регулювання напруги: централізоване та локальне.

Локальне регулювання напруги здійснюється безпосередньо на затискачах електроспоживачів. Через значні капіталовкладення цей вид регулювання застосовують переважно для потужних споживачів із підвищеними вимогами до якості електроенергії, таких як потужні електродвигуни або електротехнологічні установки. Локальне регулювання поділяється на індивідуальне, яке виконується для окремого споживача, і групове, що охоплює кілька споживачів, підключених до одних шин.

Централізоване регулювання напруги виконується у вузлах електричної мережі та застосовується у випадках, коли від мережі живиться велика кількість споживачів. Залежно від особливостей добового графіка навантажень розрізняють три методи централізованого регулювання.

Стабілізація напруги використовується для споживачів із незмінним навантаженням протягом доби, наприклад, для підприємств із тризмінним режимом роботи. Регулювання напруги за часом доби базується на програмному управлінні й застосовується для споживачів зі стабільним, повторюваним щодня графіком навантажень, таких як однозмінні підприємства з високою автоматизацією виробництва. Зустрічне регулювання напруги використовується у випадках, коли навантаження споживача змінюється протягом доби. При цьому напругу регулюють таким чином, щоб забезпечити допустимі рівні не лише на шинах центру живлення, але й у контрольній точці, розташованій у місці підключення споживача, віддаленого від центру живлення. Для цього враховують струм навантаження споживачів.

Застосування цих видів регулювання дозволяє підтримувати якість електроенергії на необхідному рівні відповідно до потреб споживачів і параметрів роботи електричної мережі.

На рисунку 1.2 представлена класифікація основних методів регулювання напруги в розподільчих електромережах (РЕМ). Ця класифікація включає різні способи забезпечення стабільності напруги, які поділяються залежно від принципів роботи та застосовуваних технічних засобів.



Рисунок 1.2 - Способи забезпечення стабільної напруги

Методи зниження рівнів несиметрії напруг в електромережах. Наявність у розподільчих електричних мережах (РЕМ) одно- та двофазних споживачів, які спричиняють нерівномірне навантаження трифазної мережі, викликає появу несиметрії струмів. Це, у свою чергу, призводить до несиметрії напруги, що негативно впливає як на споживачів, так і на елементи електромережі. Несиметрія напруги спричиняє збільшення втрат електроенергії в асинхронних і синхронних двигунах, трансформаторах, перегрів ізоляції мережевих елементів, що скорочує їхній термін експлуатації.

Для зменшення рівня несиметрії напруги використовуються різноманітні методи та технічні засоби. Одним із таких способів є введення додаткових електрорушійних сил. Він ґрунтується на компенсації напруги зворотної та нульової послідовностей за рахунок додаткових напруг, які створюються автономними джерелами енергії або пристроями на основі перетворювачів змінної напруги. Інший підхід передбачає пофазну зміну

напруги в живильній мережі, наприклад, шляхом регулювання коефіцієнтів трансформації силового трансформатора. Такий принцип реалізується в симетрувальному трансформаторі, який зменшує рівні несиметрії напруги через пофазне регулювання трансформаційних коефіцієнтів.

Класифікація методів зниження несиметрії напруги подана на рисунку 1.3.

Основним методом регулювання напруги в електричних мережах є варіювання коефіцієнта трансформації силового трансформатора за допомогою спеціальних пристроїв. Зниження рівня несиметрії напруг можна також досягти за допомогою пофазної зміни коефіцієнтів трансформації, що є дуже перспективним підходом. Цей спосіб має суттєву перевагу, оскільки не потребує значних фінансових витрат на додаткове обладнання або модернізацію вже існуючої інфраструктури мережі. Таке регулювання дозволяє одночасно знижувати як рівень відхилення, так і несиметрії напруг, що робить його вигідним в порівнянні з іншими методами симетрування.

Для реалізації цього методу управління необхідно розробити систему автоматичного управління (САУ), яка контролюватиме і коригуватиме коефіцієнт трансформації для досягнення бажаного результату — зниження рівнів несиметрії та відхилення напруг.

Щоб оцінити можливість використання такого методу автоматичного контролю для зменшення несиметрії та відхилення напруг у розподільчих електричних мережах, необхідно провести дослідження існуючих способів і технічних засобів зміни коефіцієнта трансформації силових трансформаторів. Це допоможе визначити найбільш ефективні рішення для пофазного регулювання коефіцієнтів трансформації, що дозволить покращити показники якості в електромережах.

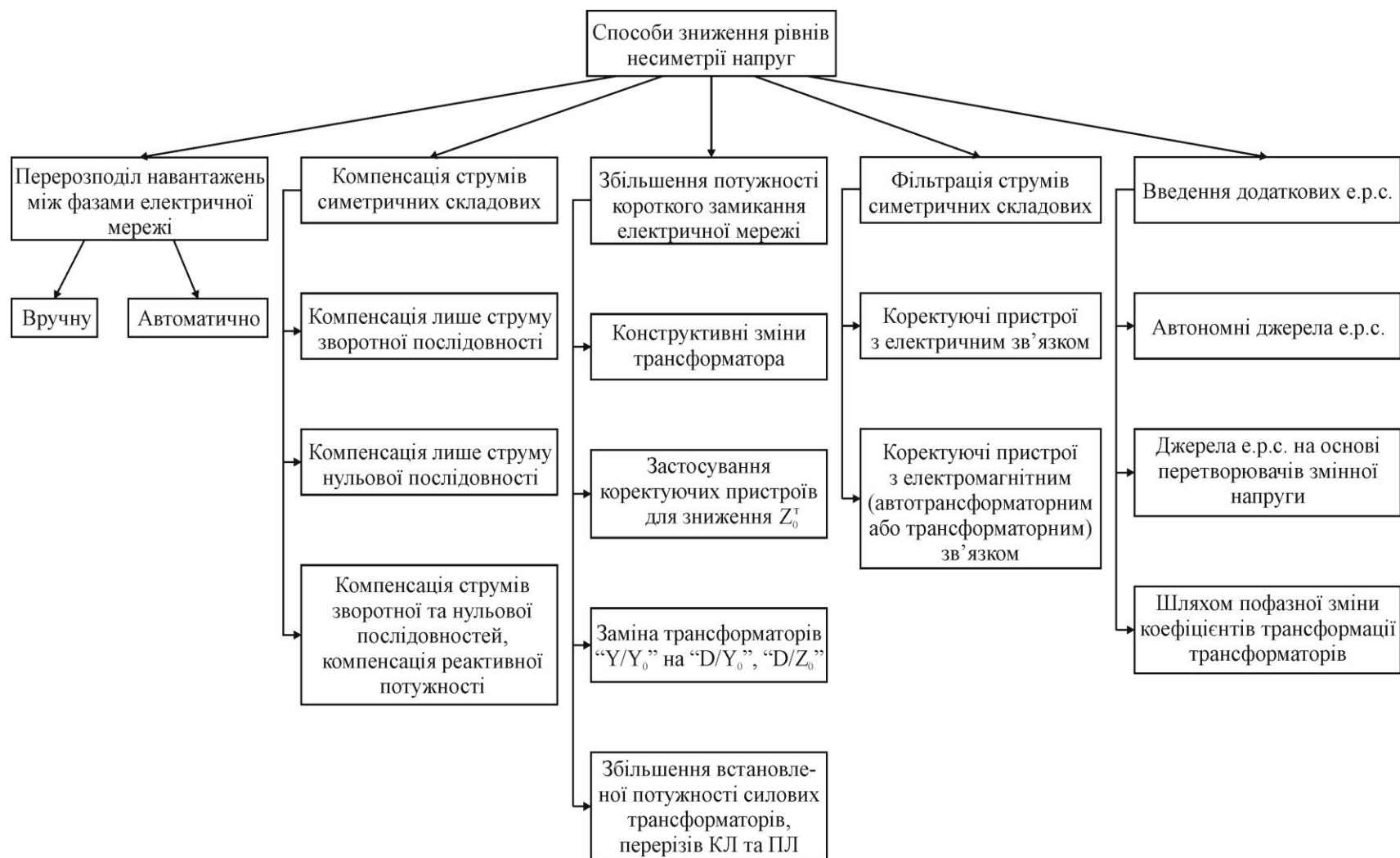


Рисунок 1.3 - Класифікація методів зниження рівня несиметрії напруг

1.2. Технічні засоби варіювання коефіцієнта трансформації силового трансформатора.

У сучасних розподільчих електричних мережах (РЕМ) використовується широкий спектр пристроїв, що забезпечують нормовані рівні відхилення напруги за допомогою коригування коефіцієнтів трансформації силових трансформаторів [6]. Більшість сучасних силових трансформаторів оснащені обмотками з регулюючими відгалуженнями, які підключаються до різних типів перемикачів. Доцільніше встановлювати ці пристрої на високовольтній стороні трансформатора. Це пов'язано з тим, що на ВН стороні протікають значно менші струми, а значить, пристрої перемикання є більш економічними і надійними порівняно з установкою на низьковольтній стороні.

Залежно від відповідної конструкції, пристрої перемикання регулюючих відгалужень обмоток силових трансформаторів можливо поділити на два основні типи:

1. Пристрої, в яких перемикання відгалужень здійснюється без підключення до мережі, тобто при відключенні обмоток трансформатора від електричної мережі (трансформатори з ПБЗ).
2. Пристрої, що дозволяють перемикати регулюючі відгалуження під навантаженням без відключення обмоток трансформатора від мережі (трансформатори з РПН).

Найпоширенішими в РЕМ являються трансформатори з ПБЗ [14]. Як правило, обмотка високої напруги (ВН) такого трансформатора містить одне основне і чотири регулюючі відгалуження. Основне відгалуження має номінальну напругу, що відповідає номінальній напрузі мережі, до якої приєднано трансформатор (номінальний коефіцієнт трансформації). Інші чотири регулюючі відгалуження дозволяють змінювати коефіцієнт трансформації на значення -5% , $-2,5\%$, $+2,5\%$ та $+5\%$. Принципова схема

трансформатора з основним і чотирма регулюючими відгалуженнями представлена на рисунку 1.4.

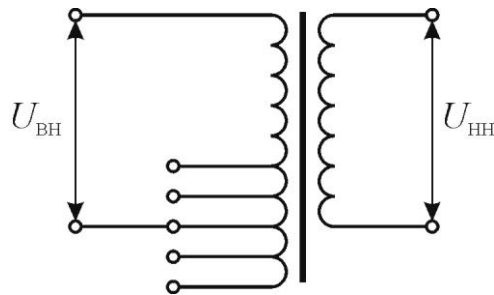


Рисунок 1.4 - Принципова схема силового трансформатора з ПБЗ

Переваги пристрою перемикання з ПБЗ полягають у його відносно низькій вартості, простоті конструкції та високій надійності, якщо порівнювати з іншими типами пристроїв. Однак основний недолік цього пристрою полягає в його обмеженій мобільності [13]. Оскільки перемикання регулюючих відгалужень у трансформаторах з ПБЗ здійснюється при повному відключенні обмоток ВН і НН від електричної мережі, що призводить до тимчасової перерви в електропостачанні, цей процес не може проводитись часто. Зазвичай перемикання здійснюється не більше ніж два рази на рік, в основному під час сезонної зміни навантажень [6, 14]. Це обмеження унеможливорює використання трансформаторів з ПБЗ для впровадження системи автоматичного регулювання напруги в реальному часі, що перешкоджає ефективному управлінню рівнями ПЯЕ.

У свою чергу, більш ефективним є метод перемикання відгалужень трансформатора без відключення його обмоток від мережі, що реалізовано у трансформаторах з пристроєм РПН [15, 16, 17]. Трансформатори з РПН мають більшу кількість регулюючих відгалужень, що дозволяє значно збільшити діапазон регулювання напруги, який може варіюватися від $\pm 10\%$ до $\pm 16\%$, при кроці регулювання від $1,25\%$ до $2,5\%$ [6, 14]. Наприклад, для трансформатора ТМН-10000/35 діапазон регулювання становить $\pm 11,7\%$ з дев'ятьма ступенями регулювання по $1,3\%$ кожен [18]. Завдяки тому, що

перемикання відгалужень у трансформаторах з РПН відбувається без розриву струмових ланцюгів, ці перемикання можуть здійснюватися протягом доби. Це дозволяє використовувати трансформатори з РПН для реалізації різноманітних алгоритмів автоматичного регулювання напруги.

На рис. 1.5 наведена класифікація пристроїв РПН за конструктивним виконанням.

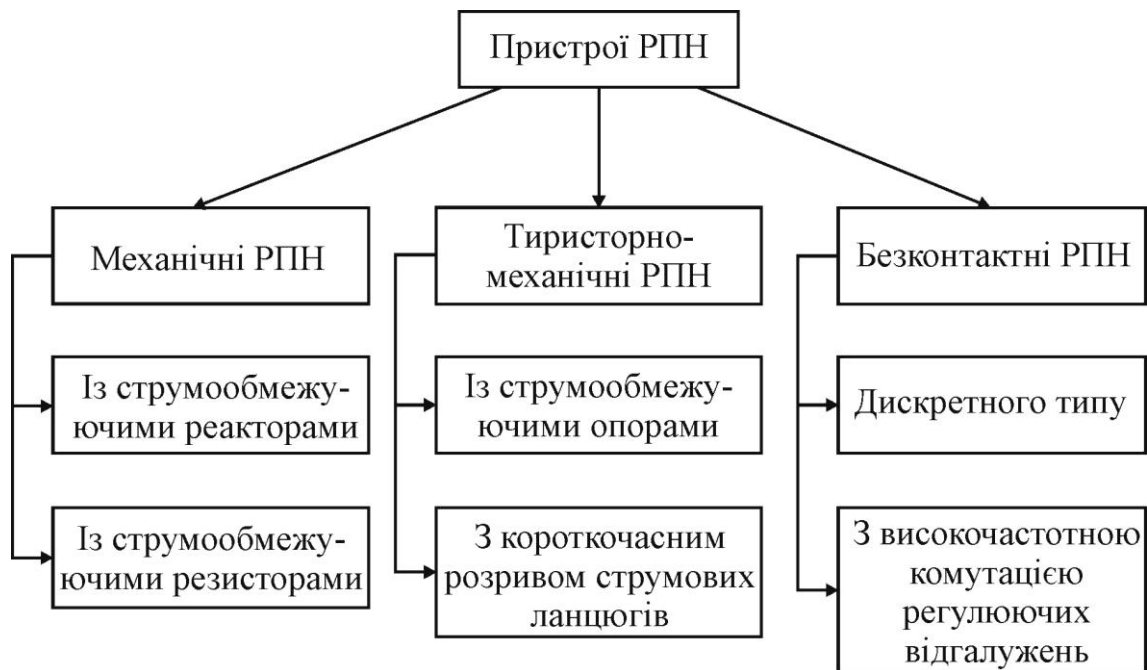


Рисунок 1.5 - Класифікація пристроїв РПН за конструктивним виконанням

У розподільчих електричних мережах найчастіше використовуються трансформатори з регулюванням під навантаженням (РПН). На рисунку 1.6 показана базова схема знижувального двохобмоткового силового трансформатора з РПН. Високовольтна обмотка трансформатора з РПН ділиться на дві частини: нерегульовану та регулюючу. Регулююча обмотка містить кілька відгалужень, підключених до затисків 1 – 7.

Секція регулюючої обмотки з відгалуженнями 1 – 3 з'єднується узгоджено з основною обмоткою: при переході з відгалуження 3 на відгалуження 2 коефіцієнт трансформації підвищується. Інша секція регулюючої обмотки (відгалуження 5 – 7) підключається у протифазі до

витків основної обмотки: при перемиканні з відгалуження 5 на відгалуження 7 коефіцієнт трансформації зменшується. Варто зазначити, що число регулюючих відгалужень у секціях, ввімкнених узгоджено та у протифазі з основною обмоткою, може відрізнятися.

Перемикаючий механізм регулюючої секції обмотки вмикає рухомі контакти П1 і П2, контактори К1 і К2, а також струмообмежувальний реактор L. Центральна точка реактора L підключена до нерегульованої секції обмотки трансформатора.

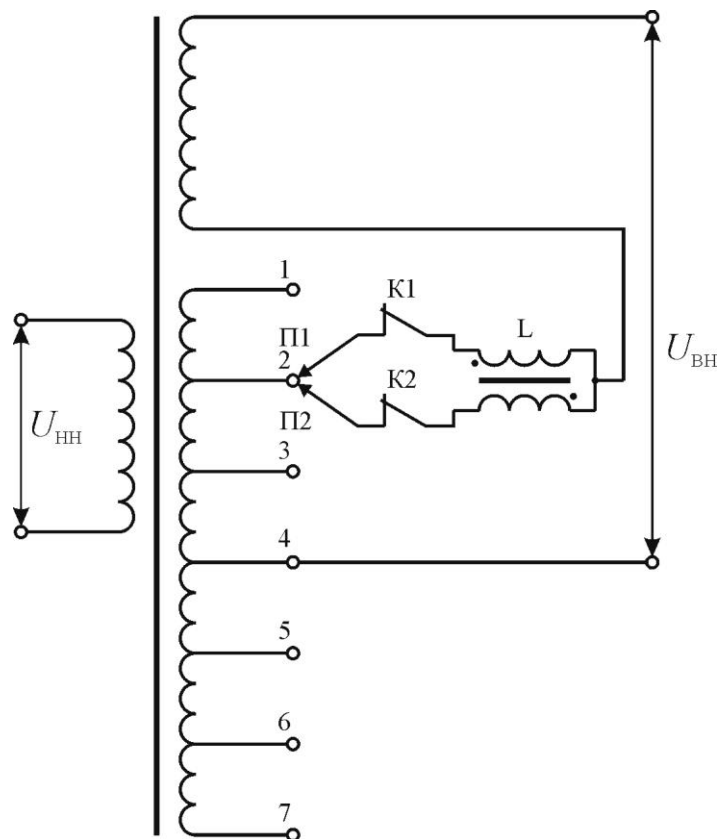


Рисунок 1.6 - Принципова схема силового трансформатора з РПН

Для обмеження струму короткого замикання, який протікає через частину обмотки, замкнуту в проміжному положенні, можуть використовуватися також активні опори, які відомі як струмообмежувальні резистори.

Основні недоліки механічних пристроїв регулювання під навантаженням (РПН) включають:

1. Обмежена надійність. Контакти механізму швидко зношуються через електроерозію, яка виникає під впливом електричної дуги в момент перемикання відгалужень. Це змушує обмежувати кількість перемикань, що погіршує якість електроенергії.

2. Низька швидкодія. Використання електромеханічного приводу обумовлює високу інерційність системи, що призводить до тривалого часу перемикання (до 20 секунд). Це унеможлиблює ефективну реакцію на швидкі коливання та зміни напруги.

Окрім цього, у трансформаторах із механічним РПН, які встановлюються в розподільчих електричних мережах (РЕМ), зазвичай використовується один перемикач для трьох фаз. Це не дозволяє виконувати пофазне регулювання коефіцієнта трансформації, що робить такі трансформатори непридатними для автоматизованих систем управління (АСУ), спрямованих на зменшення відхилень напруги та несиметрії фаз.

Деякі проблеми, характерні для РПН, усунуті в тиристорно-механічних системах. У таких системах під час перемикання відгалужень відсутня електрична дуга, оскільки для комутації струмових ланцюгів використовуються симетричні модулі, що складаються з двох тиристорів, з'єднаних зустрічно-паралельно. Тиристорно-механічні пристрої можуть бути виконані за принципом механічних РПН зі струмообмежувальними елементами і подібною схемою комутації (наприклад, шляхом заміни контакторів К1 і К2 на рисунку 1.5 тиристорними модулями) або за схемою з короткочасним розривом струмових кіл.

Перевагами тиристорно-механічних систем перед механічними є більша надійність завдяки відсутності електроерозійного зношування контактів і дещо вища швидкість перемикання.

Серед недоліків тиристорно-механічних РПН можна виділити необхідність ретельного налаштування системи контролю моменту проходження струму через нульову відмітку. Це потрібно для уникнення тривалих періодів безструмових пауз, які можуть призвести до пошкодження напівпровідникових елементів. Також, через використання спільного перемикача для трьох фаз, такі пристрої не можуть нормально виконувати пофазне регулювання коефіцієнта трансформації. Це обмежує їх застосування для побудови автоматизованих систем управління, спрямованих на зниження відхилень і несиметрії напруги.

Найбільш перспективним варіантом для зміни коефіцієнта трансформації є безконтактні пристрої РПН. У цих системах комутація струмових ланцюгів здійснюється за допомогою потужних напівпровідникових елементів, таких як тиристори, симістори або IGBT транзистори.

Залежно від конструктивних особливостей, безконтактні регулятори РПН поділяються на два основних типи: системи з високочастотною комутацією регулюючих відгалужень і дискретні регулятори [17].

Регулятори з високочастотною комутацією працюють за принципом багаторазового перемикання регулюючих відгалужень силового трансформатора протягом одного напівперіоду змінної напруги. Це дає змогу плавно змінювати вихідну напругу в межах, визначених коефіцієнтами трансформації двох сусідніх відгалужень [17]. Основна перевага даного типу регуляторів — здатність забезпечувати плавне регулювання напруги, що дозволяє досягати високої точності стабілізації як у статичних, так і в динамічних режимах. Однак складність конструкції, значна кількість напівпровідникових елементів, які впливають на енергетичну ефективність, а також спотворення форми синусоїдальної кривої напруги обмежують використання цього типу пристроїв.

Безконтактні РПН дискретного типу здійснюють регулювання через ступінчасте перемикання відгалужень трансформаторної обмотки. Перемикання відбувається в момент, коли струм обмотки проходить через нуль, що виключає появу дугових явищ і додаткових втрат. Такі регулятори можуть бути встановлені як на високовольтній стороні трансформатора, так і на низьковольтній.

Ключова перевага дискретних регуляторів полягає у їх простішій конструкції та меншому спотворенні напруги. Водночас вони не забезпечують плавного регулювання напруги, що може бути критичним у певних додатках, де важливий високий рівень стабілізації напруги в динамічних умовах.

На рисунку 1.7 представлена принципова схема тиристорного регулятора РПН дискретного типу, що розташований на високовольтній стороні силового трансформатора.

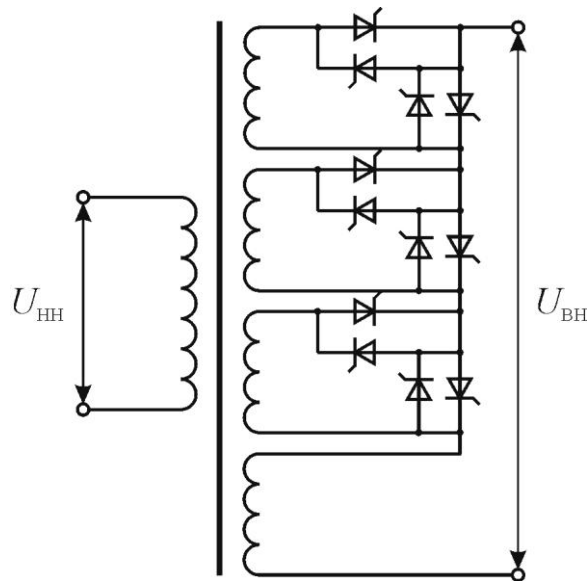


Рисунок 1.7 - Принципова схема тиристорного РПН дискретного типу.

У цій схемі регулювання напруги здійснюється шляхом послідовного перемикання регулюючих відгалужень обмотки трансформатора. Тиристорні ключі, які забезпечують комутацію, активуються в момент, коли струм обмотки проходить через нуль.

Така конструкція дозволяє уникнути появи електричних дуг і зменшує рівень зношування обладнання, підвищуючи його надійність і термін експлуатації. Використання тиристорів забезпечує швидке й точне перемикання, що особливо важливо для стабілізації напруги в динамічних режимах роботи. Система оптимально підходить для застосування в електромережах, де потрібна висока ефективність і мінімальний вплив на якість електроенергії.

Тиристорні РПН дискретного типу вирізняються простотою конструкції, високою енергоефективністю та здатністю регулювати напругу без спотворення синусоїдальної форми вихідного сигналу.

Одним з методів було запропоновано створення таких пристроїв на базі трансформаторів із переключенням без збудження (ПБЗ) шляхом встановлення потужних тиристорних ключів на регулюючі відгалуження обмоток трансформатора. Ця модернізація потребує порівняно невеликих фінансових і технічних ресурсів, але значно розширює можливості регулювання напруги в трансформаторах із ПБЗ, надаючи їм усі переваги безконтактних РПН дискретного типу.

Переваги безконтактних пристроїв РПН.

1. Висока швидкодія. Завдяки відсутності механічних компонентів затримки при перемиканні обмежуються лише часом перехідних процесів у мережі. Це дозволяє оперативно реагувати на швидкі зміни напруги.
2. Довговічність. Відсутність електричної дуги та механічного зношування забезпечує практично необмежений ресурс роботи.
3. Висока точність регулювання. Пристрої здатні ефективно стабілізувати напругу навіть у динамічних умовах.
4. Надійність і ремонтпридатність. Напівпровідникові елементи мають високий рівень стійкості до несправностей і легко замінюються в разі виходу з ладу.

5. Пофазне регулювання. Завдяки використанню напівпровідникових ключів кожна фаза може регулюватися незалежно, що дозволяє змінювати коефіцієнти трансформації окремо для кожної фази.

Ці особливості роблять безконтактні РПН ідеальним рішенням для автоматизованих систем управління (АСУ), спрямованих на зменшення рівня відхилення і асиметрії напруги в електромережах. Такі пристрої здатні забезпечити високу якість електроенергії в умовах сучасних навантажень і нестабільних режимів роботи.

1.3. Огляд пристроїв автоматизації зміни коефіцієнта трансформації силового трансформатора.

Для автоматичного керування зміною коефіцієнта трансформації силового трансформатора розроблено достатньо широкий спектр автоматизованих систем управління (АСУ), які діють на основі певних законів регулювання напруги.

Найпростішим принципом регулювання за відхиленням є управління за відхиленням напруги, що передбачає зміну коефіцієнта трансформації залежно від величини відхилення фактичної напруги від заданого значення.

У літературі описано пристрій, який реалізує такий принцип регулювання. Його функціональна схема наведена на рисунку 1.8.

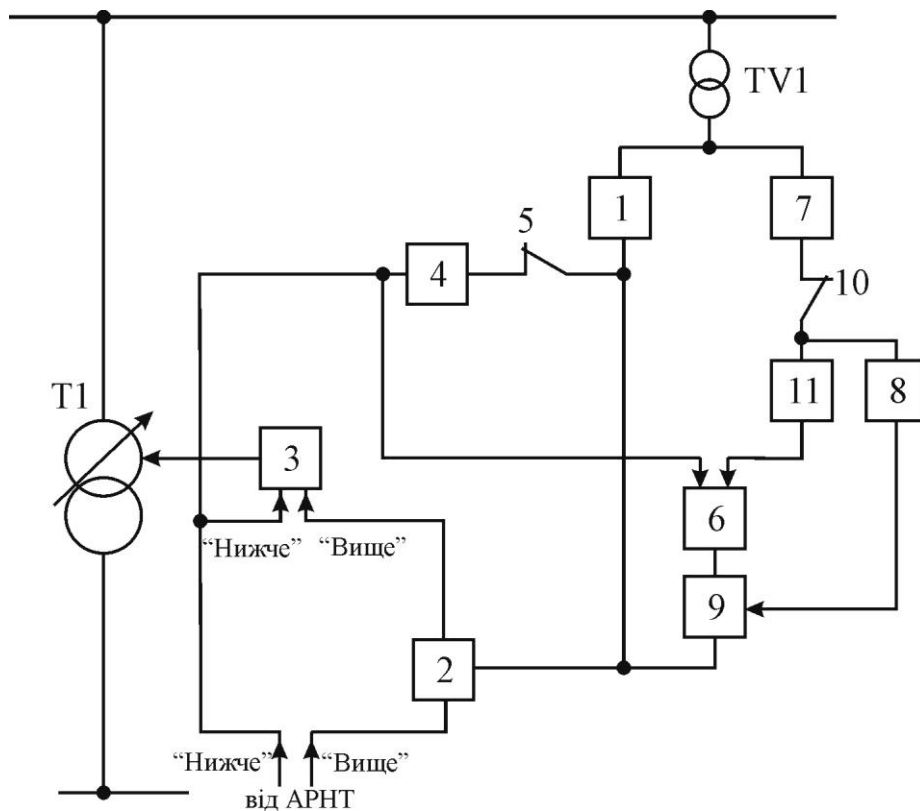


Рисунок 1.8 - Функціональна схема пристрою регулювання напруги

Компоненти схеми (рис. 1.7):

1. Реле мінімальної напруги (1) — активується, коли напруга знижується нижче допустимого рівня.
2. Логічні елементи «НІ» (2, 9) — виконують функцію інверсії сигналів для забезпечення коректної роботи логіки схеми.
3. Приводний механізм (3) — здійснює фізичну зміну положення відгалужень трансформатора.
4. Органи витримки часу (4, 8) — забезпечують задану затримку перед виконанням комутації.
5. Шляхові контакти (5, 10) — фіксують положення механізму після перемикання.
6. Елемент пам'яті (6) — зберігає інформацію про стан системи для подальшого аналізу або відновлення роботи після аварійних ситуацій.

7. Реле максимальної напруги (7) — активується, якщо напруга перевищує встановлений рівень.

8. Силовий трансформатор (T1) — об'єкт регулювання.

9. Датчик напруги (TV) — забезпечує зворотний зв'язок, фіксуючи поточне значення напруги в мережі.

Принцип роботи пристрою полягає в тому, що коли напруга на виході трансформатора відхиляється від допустимого діапазону, спрацьовує відповідне реле (мінімальної чи максимальної напруги).

Сигнал із реле проходить через орган витримки часу, що забезпечує стабільність роботи і виключає хибне спрацювання через короточасні коливання напруги.

Далі сигнал надходить до приводного механізму, який змінює положення відгалужень трансформатора.

Логічні елементи і шляхові контакти координують процес, забезпечуючи правильний порядок дій і фіксацію стану системи.

Цей підхід до регулювання напруги є ефективним для підтримання стабільності електропостачання в умовах постійно змінюваного навантаження, хоча його функціональність обмежується простотою закону регулювання.

Автоматичне регулювання напруги за відхиленням має кілька істотних недоліків. Зокрема, цей метод не враховує струм споживачів, що унеможлиблює реалізацію зустрічного регулювання напруги, при якому корекція враховує вплив струму навантаження на напругу. Крім того, зазначений спосіб не дозволяє виконувати пофазну зміну коефіцієнтів трансформації, що обмежує його ефективність у випадках асиметричних навантажень або напруг.

Удосконалений підхід до регулювання напруги передбачає врахування спадів напруги в елементах електромережі, викликаних струмом навантаження. Цей метод, відомий як зустрічне регулювання напруги,

дозволяє більш точно підтримувати рівень напруги на кінцевих точках мережі, враховуючи реальні умови роботи.

Функціональна схема АРТ-1Н, наведена на рисунку 1.9,

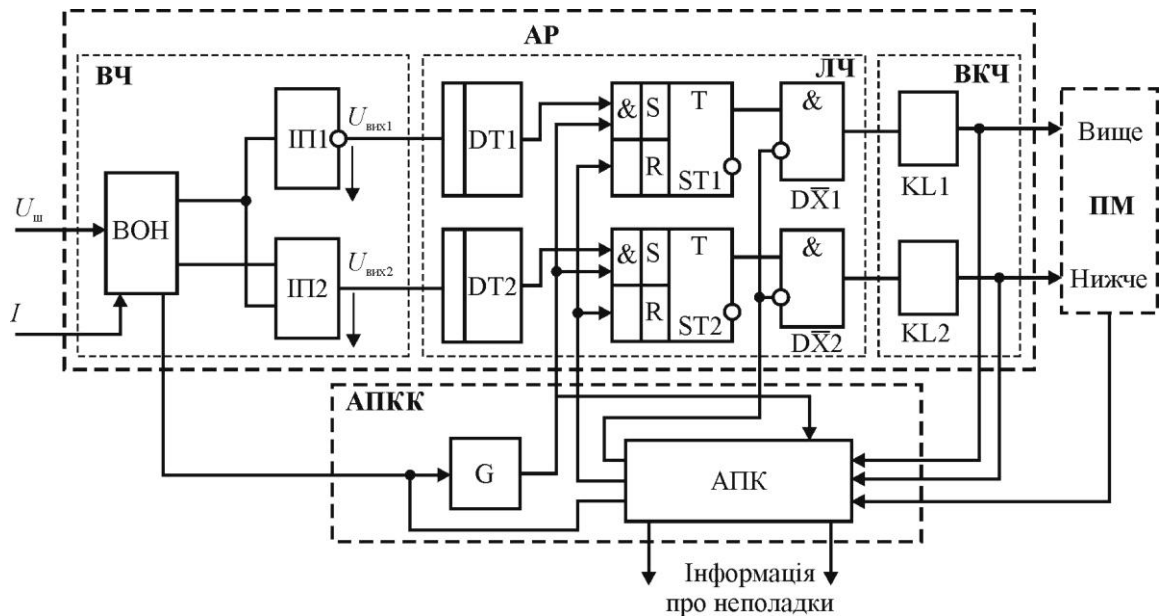


Рисунок 1.9 - Функціональна схема автоматичного регулятора типу АРТ-1Н

АРТ-1Н — один із найбільш поширених пристроїв, що реалізує закон зустрічного регулювання. Цей регулятор забезпечує перемикання регулюючих відгалужень обмотки трансформатора з урахуванням відхилень напруги та впливу струму навантаження.

Функціональна схема АРТ-1Н, наведена на рисунку 1.8, включає наступні основні компоненти: Датчик напруги — контролює рівень напруги в мережі; Датчик струму навантаження — визначає величину і напрямок струму; Електронний блок обробки сигналів — аналізує дані від датчиків і розраховує необхідну корекцію напруги; Привод перемикання відгалужень — реалізує фізичну зміну коефіцієнта трансформації; Зворотний зв'язок — дозволяє контролювати ефективність виконаного регулювання.

Переваги методу зустрічного регулювання напруги:

1. Точніше підтримання стабільності напруги на споживачах.

2. Можливість врахування змін у навантаженні та стані мережі.

3. Зниження втрат у мережі завдяки оптимальному розподілу напруги.

Цей підхід дозволяє досягти більш ефективної роботи електромережі, особливо в умовах нерівномірного або змінного навантаження, підвищуючи якість електропостачання.

До основних недоліків даного пристрою АРТ-1Н можна віднести кілька аспектів. По-перше, він не відслідковує напрям зміни напруги, що призводить до лишніх перемикачів. Це відбувається тому, що регулятор не визначає, чи є відхилення напруги позитивним або негативним, що може призвести до зайвої зміни відгалужень, навіть коли це не потрібно. Це збільшує знос компонентів та знижує ефективність роботи даного пристрою.

По-друге, АРТ-1Н не здатний відпрацьовувати різкі відхилення напруги. У випадку різких чи значних змін рівня напруги, наприклад, через різкі коливання навантаження, регулятор може не встигати швидко реагувати, що призводить до зниження якості електричної енергії. Це може викликати перехідні процеси, які не встигають стабілізуватися, і в результаті впливає на нормальну роботу споживачів електричної енергії.

Ці недоліки зменшують загальну ефективність пристрою, особливо в умовах великих або часто змінюваних навантажень, де точність та швидкість реагування можуть бути критичними.

Scye' спосіб регулювання напруги, з врахуванням струму навантаження. Цей метод автоматичного регулювання напруги враховує вплив струму навантаження. Для того, щоб уникнути надмірного підвищення напруги на споживачах, які розташовані близько до підстанції, під час протікання великого струму в лінії, пристрій передбачає автоматичне коригування налаштувань регулятора напруги, якщо значення напруги перевищить встановлену межу струмової компенсації. Оскільки описаний метод передбачає коригування налаштувань автоматичного регулятора АРТ-1Н, він має ті ж самі обмеження.

Щодо методу автоматичного регулювання напруги, який орієнтований на мінімізацію економічних втрат через стабільне відхилення напруги, його принцип полягає в тому, що перемикання регулюючих відгалужень відбувається тільки тоді, коли це призводить до істотного зниження втрат через стабільне відхилення напруги. Такий підхід дозволяє підвищити надійність роботи системи, зменшуючи кількість перемикачів в механічному РПН.

Для підвищення надійності електропостачання зменшенням числа перемикачів пропонується враховувати знак похідної огинаючої напруги. Це дозволяє уникати зайвих перемикачів у випадках, коли напруга в мережі виходить за межі встановлених уставок зони нечутливості регулятора, але при цьому має тенденцію вернутися в цю зону через зміни параметрів режиму електричної мережі.

Також було розроблено систему автоматичного управління (САУ) на основі нечіткої логіки для керування пристроєм РПН. Блок-схема нечіткого контролера для керування пристроєм РПН, зображена на рис. 1.10.

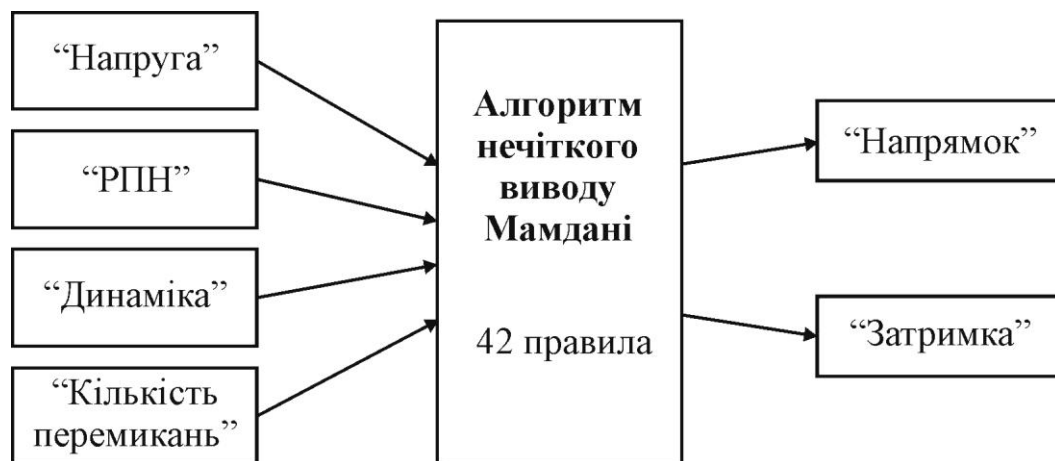


Рисунок 1.10 - Блок-схема нечіткого регулятора з пристроєм РПН

Використання математичного інструментарію нечіткої логіки для регулювання напруги сприяло значному підвищенню надійності енергозабезпечення завдяки зменшенню частоти перемикань механічного РПН, при цьому майже не погіршувалась якість електричної енергії.

Один із підходів передбачається використання нейро-нечіткої мережі для комбінованого управління автоматичним пристроєм зміни коефіцієнта трансформації та регулювання ємності батарей статичних конденсаторів. Використання такої мережі для прогнозування змін реактивних навантажень протягом доби дає змогу здійснювати точніше регулювання напруги та реактивної потужності, що дозволяє мережі працювати в оптимальних умовах. Однак до недоліків цього методу можна віднести значну складність і значні витрати на його впровадження.

Також пропонується централізоване керування пристроями РПН силових трансформаторів у розподільчих мережах з метою зниження числа перемикань та поліпшення стабільності регулювання. Для реалізації цього регулювання рекомендується використовувати нечіткий контролер.

Один з підходів передбачає дворівневу систему регулювання напруги, що дозволяє одночасно підвищити якість електричної енергії та надійність енергопостачання шляхом спільного керування пристроями РПН на трансформаторах підстанцій і кінцевих підстанціях. Для досягнення цієї мети передбачається модернізація ПБЗ на кінцевих підстанціях шляхом установки безконтактних пристроїв РПН, які мають набагато більший ресурс перемикань. Таким чином, перемикання регулюючих відгалужень на трансформаторі підстанції системи проводиться лише у випадку, коли трансформатори на кінцевих підстанціях вичерпали свої можливості для регулювання, що дозволяє досягти одночасного поліпшення якості напруги та підвищення надійності систем електропостачання, зменшуючи при цьому число перемикань механічного пристрою РПН трансформатора в енергосистемі.

Вищезгадані методи регулювання напруги та відповідні пристрої орієнтовані або на підвищення кращої надійності електропостачання через зменшення числа перемикачів пристроїв РПН (що актуально для механічних РПН), або на поліпшення якості електроенергії шляхом зменшення стабільного відхилення напруги. Однак ці методи автоматичної зміни коефіцієнта трансформації ніяк не впливають на рівень несиметрії напруги, оскільки вони не передбачають можливості пофазної зміни коефіцієнта трансформації.

Для зменшення рівня несиметрії низьковольтної чотирьохпровідної електричної мережі, яка виникає як через несиметрію живильної напруги на стороні ВН трансформатора, так і через несиметричне навантаження фаз, пропонується використання симетрувального трансформатора з обмотками, з'єднаними за схемою «трикутник/зірка з нулем». Така конструкція перемикаючого пристрою дозволяє змінювати коефіцієнт трансформації для кожної фази відокремлено. Алгоритм роботи системи автоматичного управління симетрувальним трансформатором полягає в розв'язанні оптимізаційної задачі, яка забезпечує ефективне зменшення несиметрії напруги та покращення якості електричного живлення:

$$\begin{cases} \underline{U}_2 \rightarrow \min \\ \underline{I}_2 \leq \underline{I}_{2\text{зад}} \\ \underline{U}_0 \leq \underline{U}_{0\text{доп}} \end{cases}, \quad (1.1)$$

де $\underline{U}_2$ – напруга зворотної послідовності;

$\underline{I}_2$ – струм зворотної послідовності;

$\underline{I}_{2\text{зад}}$ – заданий комплекс струму зворотної послідовності, визначений за умови економічності втрат;

$\underline{U}_0$ – комплекс напруги нульової послідовності;

$\underline{U}_{0\text{доп}}$ – допустиме значення напруги нульової послідовності на стороні НН трансформатора, відповідно ДЕСТ 13109-97.

Недоліком методу автоматичного управління зміною коефіцієнтів трансформації силового трансформатора є те, що він не враховує можливість зниження стабільного відхилення напруги.

Для одночасного зниження рівня несиметрії та стабільного відхилення напруги в низьковольтній чотирьохпровідній мережі запропоновано використання симетрувального трансформатора зі схемою з'єднання обмоток «трикутник/зигзаг з нулем». Ця схема дозволяє уникнути виникнення напруги нульової послідовності на шинах низької напруги трансформатора. Врахування стабільного відхилення трьохфазної напруги при регулюванні досягається шляхом вводу однакових поправок, пропорційних відхиленню напруги, в аналітичні вирази для визначення коефіцієнтів трансформації кожної фази.

Однак недоліком цього підходу є те, що відхилення напруги враховується як обмеження в оптимізаційному процесі, що означає, що основним завданням цієї САУ є управління, яке фокусується на зменшенні рівня несиметрії напруги, а не на зниженні стабільного відхилення.

В наступному методі запропоновано інтерпретувати завдання регулювання режиму симетрувального трансформатора за схемою з'єднання «трикутник/зигзаг з нулем» як завдання багатокритеріальної оптимізації:

$$\begin{cases} U_2 \rightarrow \min; \\ |\Delta U_1| \rightarrow \min; \\ |\Delta U_{\phi i}| \rightarrow \min, i = a, b, c, \end{cases} \quad (1.2)$$

де U_2 – діюча величина напруги зворотної послідовності;

$|\Delta U_1|$ – відхилення від номінальної напруги прямої послідовності по модулю;

$|\Delta U_{\phi i}|$ – відхилення від номінальної i -ї фазної напруги i -ї фазної напруги пор модулю.

Запропонований підхід до впровадження системи автоматичного управління (САУ) зміною коефіцієнта трансформації є найбільш ефективним для забезпечення багатфункціональності силових трансформаторів. Він дозволяє одночасно знижувати рівні усталеного відхилення і несиметрії напруг у електричній мережі. Такий підхід оптимізує роботу трансформаторів, покращує якість електричної енергії та стабільність напруги.

Однак, одним із недоліків цього алгоритму є необґрунтованість вибору методу розв'язку багатокритеріальної оптимізаційної задачі. Вибір методу для вирішення такої задачі потребує більш детальнішого обґрунтування, оскільки різні методи можуть мати різний рівень ефективності залежно від конкретних умов роботи трансформатора та електромережі. Відсутність чіткого визначення оптимального підходу до даної задачі може призвести до неефективного використання ресурсів або до недостатнього урахування всіх потрібних параметрів в процесі регулювання.

1.4. Шляхи зниження відхилення та несиметрії напруги в РЕМ за допомогою автоматизації зміни коефіцієнта трансформації.

Найбільш широко застосовуваними в розподільчих електричних мережах (РЕМ) є системи автоматичного управління (САУ), в яких реалізовано два основних закони регулювання напруги: за відхиленням напруги та зустрічне регулювання.

Структурна схема САУ пристрою регулювання напруги (РПН) для силового трансформатора із схемою з'єднання обмоток «зірка/трикутник», в якій реалізовано закон регулювання напруги за відхиленням, зазвичай

включає в себе різні елементи для контролю напруги, зокрема датчики, регулятори та інші компоненти, потрібні для коректного управління трансформатором. На рис. 1.11 зображена така схема, що включає всі ключові елементи для виконання цього типу регулювання напруги.

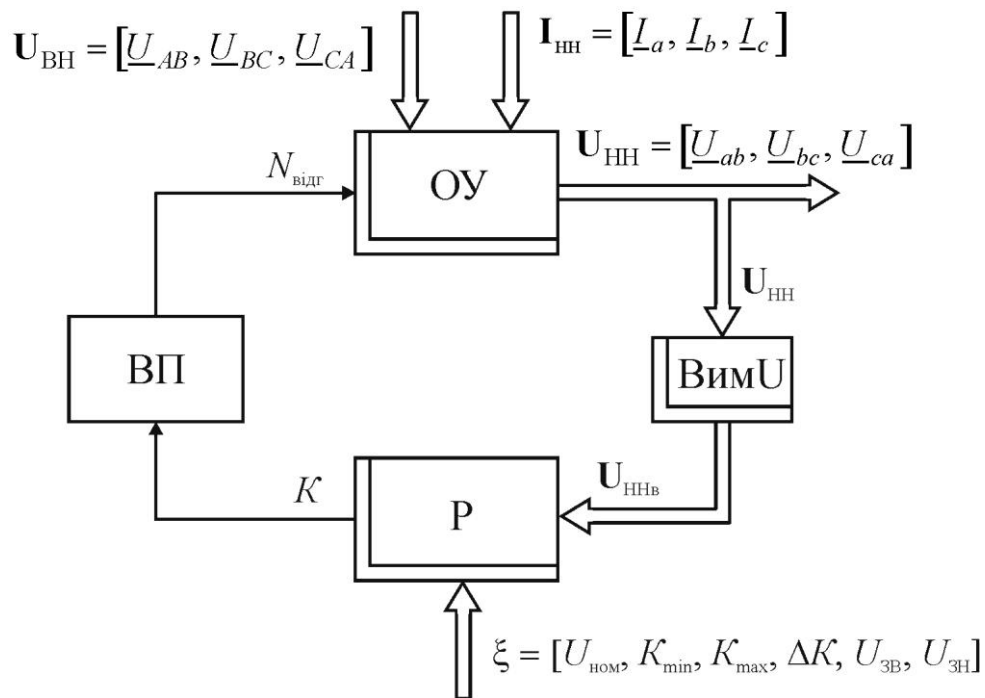


Рисунок 1.12 - Структурна схема управління пристроєм РПН , в якій реалізовано закон регулювання напруги за її відхиленням

K – значення коефіцієнта трансформації;

$N_{\text{відг}}$ – номер відгалуження обмотки ВН;

$K_{\min}$, $K_{\max}$ – мінімальна та максимальна величина коефіцієнту трансформації;

ΔK – крок регулювання коефіцієнту трансформації;

$U_{\text{зв}}$, $U_{\text{зн}}$ – величини напруг нижнього та верхнього порогу зони нечутливості регулятора;

$\Theta_{\text{нд}}$ – множина нормально припустимих значень показників якості;

ВимU – вимірювальний перетворювач напруги (трансформатор напруги);

ВП – пристрій РПН (виконавчий пристрій);

ОУ – об’єкт управління (трансформатор);

Р – регулятор силового трансформатора.

Схема блоку регулятора пристрою РПН представлена на рис. 1.13.

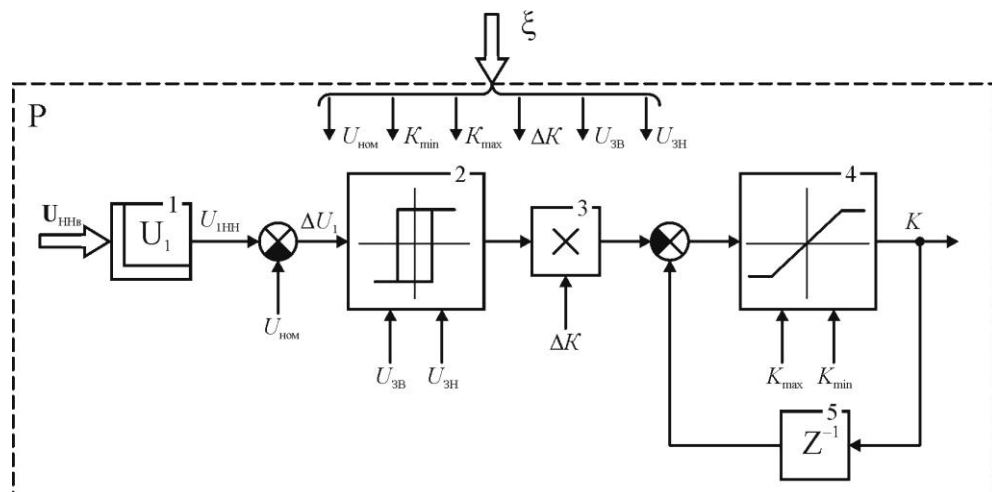


Рисунок 1.13 - Структурна схема регулятора пристрою РПН трансформатора, в якій реалізується закон регулювання напруги за відхиленням.

Структурна схема САУ, в якій реалізується закон зустрічного регулювання напруги представлена на рис. 1.14.

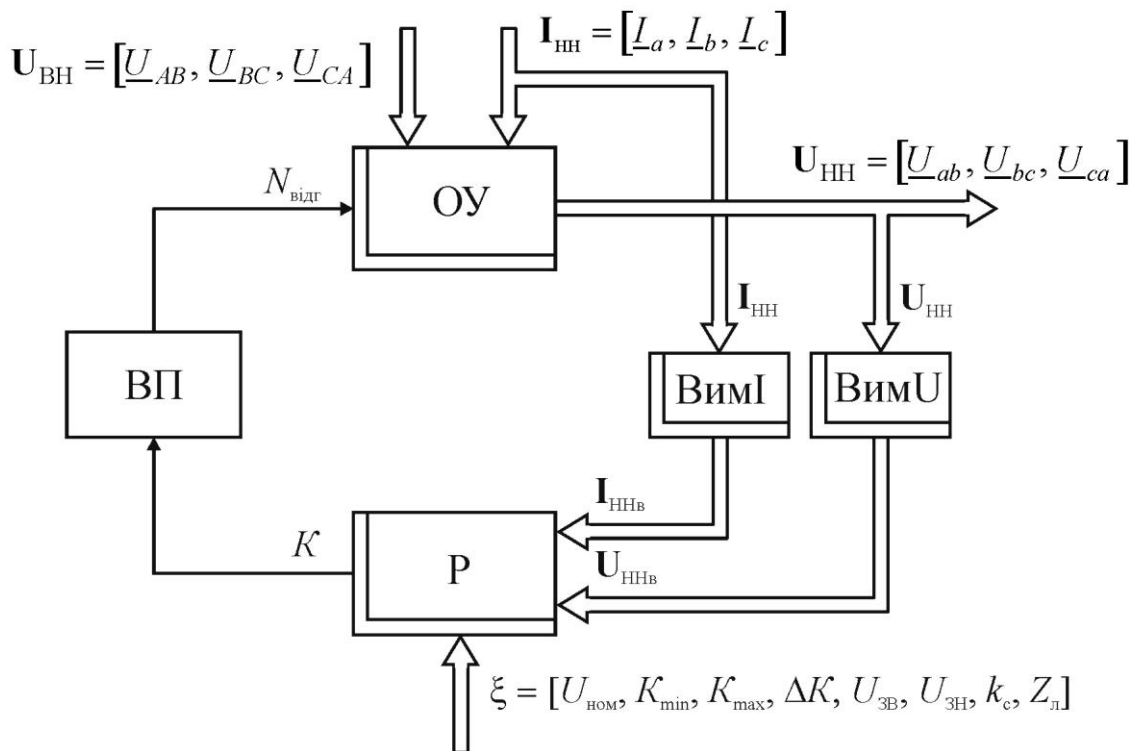


Рисунок 1.14 - Структурна схема управління пристроєм РПН, в якій реалізовано закон зустрічного регулювання напруги

На рис. 1.12: ВимI – трансформатор струму;

$Z_{\text{л}}$ – повний опір лінії, що приєднана до НН трансформатора;

k_c – коефіцієнт статизму регулювання:

$$k_c = \frac{U_{\text{х.х.}} - U_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} \cdot 100\%, \quad (1.3)$$

Структурна схема регулятора пристрою РПН зображена на рис. 1.15.

Аналіз останніх наукових досліджень, що стосуються методів автоматизації зміни коефіцієнта трансформації силових трансформаторів, показав, що більшість з них орієнтовані на застосування механічних РПН як об'єктів управління. У цих роботах розв'язуються проблеми, пов'язані з підвищенням надійності електричних мереж через обмеження частоти

перемикань РПН, що зменшує якість електричної енергії, або, навпаки, з покращенням якості регулювання напруги, що знижує надійність системи.

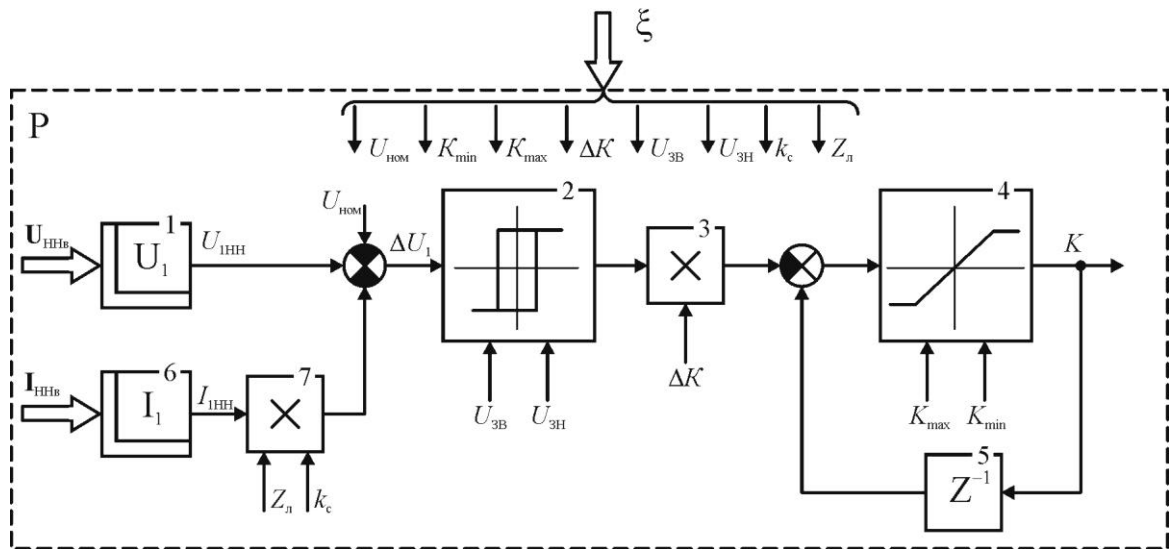


Рисунок 1.15 - Схема блоку регулятора пристрою РПН, в якій реалізовано закон зустрічного регулювання напруги.

Застосування безконтактних РПН в трансформаторах змінює вимоги до САУ для таких пристроїв і вимагає нових підходів до їх розробки. Оскільки безконтактні РПН мають численні переваги, такі як висока швидкість реакції, великий ресурс перемикань та висока надійність, вони також дозволяють здійснювати пофазну зміну коефіцієнта трансформації трансформатора. Це відкриває можливості для використання трансформаторів з безконтактним РПН як багатофункціональних пристроїв для одночасного зменшення як рівня відхилення, так і несиметрії напруг у мережах.

Запропоновані підходи до створення систем автоматичного управління (САУ) для симетрувальних трансформаторів, зокрема інтерпретація задачі одномоментного зниження відхилення та несиметрії напруг як багатокритеріальної оптимізації, частково вирішують проблему зменшення цих відхилень в електричній мережі. Ці підходи можуть бути використані для розробки САУ безконтактними РПН силових трансформаторів. Однак, з

огляду на кілька недоліків, таких як необґрунтованість вибору методу розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації та обмеження застосування таких САУ тільки до розподільчих мереж низької напруги, виникає необхідність подальших досліджень для вдосконалення автоматизації управління пристроєм РПН в силових трансформаторах.

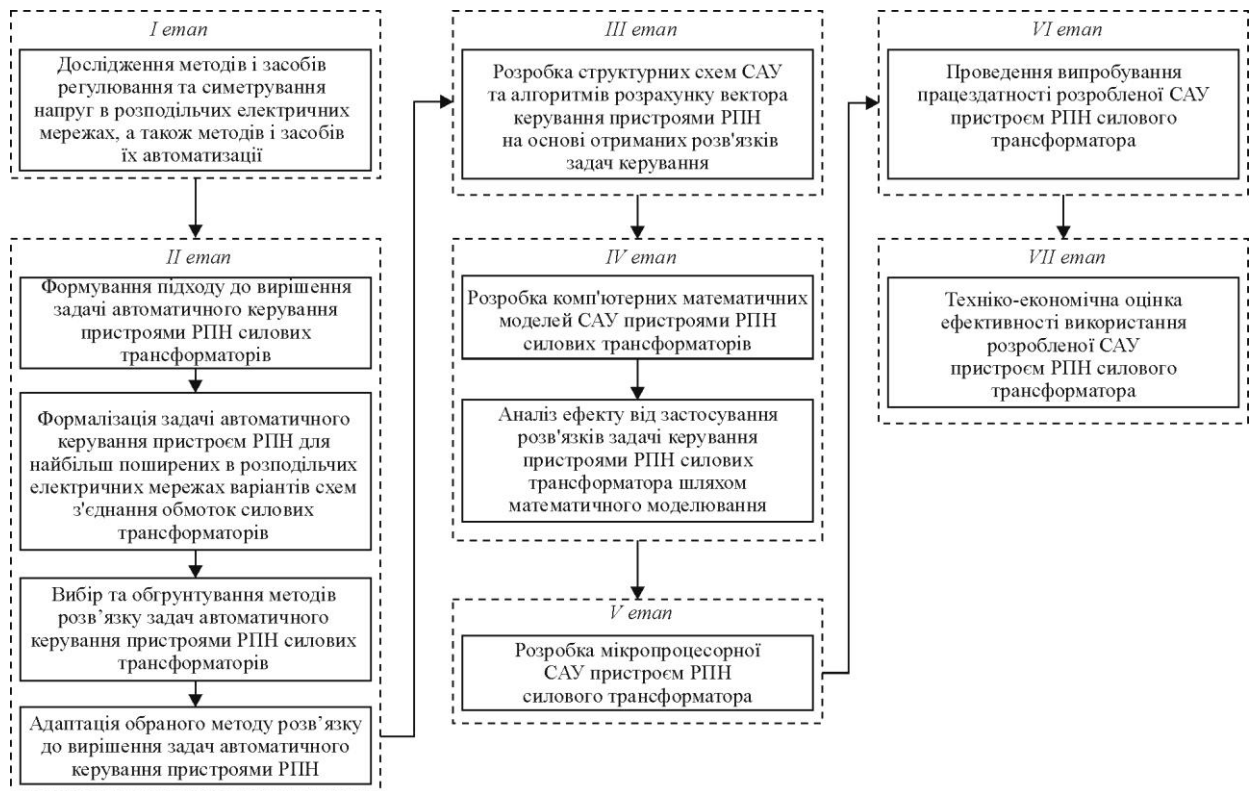


Рисунок 1.16 - Етапи розв'язання задачі автоматизації управління пристроєм РПН силового трансформатора

Аналіз існуючих методів та технічних засобів регулювання напруги в розподільчих електричних мережах показав, що основною причиною недостатньої ефективності покращення якості електроенергії є відсутність одночасного зниження рівнів відхилення та несиметрії напруг, яке можливо шляхом пофазного автоматичного регулювання коефіцієнтів трансформації силових трансформаторів.

Також аналіз технічних засобів зміни коефіцієнта трансформації трансформатора виявив, що самим ефективним є безконтактний пристрій РПН. Окрім своїх очевидних переваг, таких як висока швидкодія, надійність і значний ресурс перемикачів, цей пристрій дозволяє використовувати пофазну зміну коефіцієнта трансформації силового трансформатора. Це відкриває можливість для регулювання не лише рівня відхилення напруги, а й рівня несиметрії напруг.

В результаті аналізу методів та засобів автоматизації управління регулюючими пристроями силових трансформаторів було виявлено, що існуючі методи недооцінюють функціональність трансформаторів з безконтактними РПН. Вони дозволяють впливати не лише на рівень усталеного відхилення напруги, а й на рівень несиметрії напруг, завдяки пофазній зміні коефіцієнтів трансформації. Це вимагає проведення подальших досліджень щодо автоматизації управління безконтактними пристроями РПН силових трансформаторів.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ПІДХОДИ ДО ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЯМИ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ

Силовий трансформатор із безконтактним пристроєм РПН виконує функцію багатозадачного засобу, спрямованого на покращення показників якості електроенергії. Його робота дозволяє здійснювати регулювання, яке впливає не лише на рівні сталих відхилень напруги, а й на показники її несиметрії.

Для автоматизації управління пристроєм РПН трансформатора, яке забезпечує одночасне зниження відхилень і несиметрії напруги в електромережах розподілу, потрібно розв'язати наступні задачі:

- дослідити взаємозалежність між параметрами на вході та виході трансформатора при несиметричному навантаженні;
- описати алгоритм автоматизованого управління РПН з урахуванням вимог до зниження рівнів відхилення і несиметрії напруги для найпоширеніших схем з'єднання обмоток у розподільчих мережах;
- обрати і обґрунтувати метод вирішення задачі керування РПН трансформаторів.

Цей розділ роботи присвячено дослідженню та вирішенню зазначених питань.

2.1. Математичне відображення зв'язків між вхідними та вихідними параметрами пристрою керування.

Для одночасного регулювання рівнів відхилення та несиметрії напруги необхідно виконувати зміну коефіцієнтів трансформації окремо для кожної фази силового трансформатора. Це завдання, як зазначалося раніше, може бути реалізоване за допомогою безконтактного пристрою РПН.

На рисунку 2.1 зображено структурну схему системи автоматичного управління пристроєм РПН силового трансформатора, що забезпечує пофазну зміну коефіцієнтів трансформації.

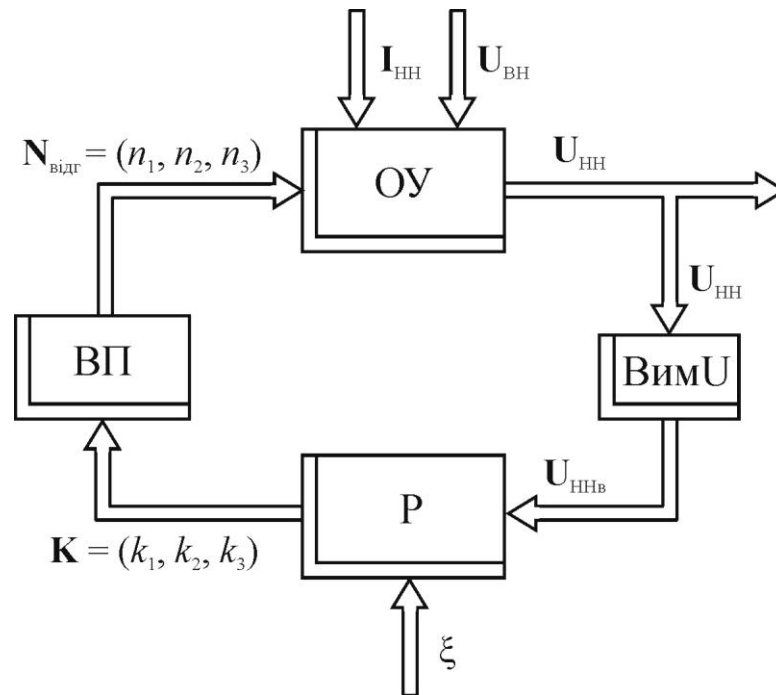


Рисунок 2.1 - Структурна схема управління пристроєм РПН з пофазною зміною коефіцієнтів трансформації

На відміну від класичної моделі САУ для пристрою РПН, наведеної на рисунку 1.9, вихідний сигнал регулятора в розглянутій системі представлений не скалярною величиною, а вектором.

У випадку несиметрії навантаження абсолютне усунення рівнів усталеного відхилення та несиметрії напруг за зворотною і нульовою послідовностями шляхом пофазного регулювання коефіцієнтів трансформації неможливе. Тому для автоматизації системи управління, спрямованої на одночасне зниження рівнів відхилення та несиметрії напруг, слід використовувати підхід, орієнтований на пошук компромісного рішення. Такий метод дозволяє знизити обидва показники до допустимих меж,

визначених стандартом ДЕСТ 13109-97, навіть якщо повна компенсація неможлива.

У цьому контексті завдання управління РПН слід формулювати як багатокритеріальну оптимізаційну задачу. На відміну від скалярної оптимізації, де оптимізується тільки один показник, багатокритеріальний підхід дозволяє одночасно мінімізувати (або максимізувати) декілька важливих критеріїв, досягаючи більш збалансованого результату за всіма параметрами.

Методи автоматичного регулювання напруги із використанням силових трансформаторів з безконтактними пристроями РПН, з використанням на принципів багатокритеріальної оптимізації, описані в роботах [20-26].

Вибір схеми з'єднання обмоток силового трансформатора та режиму роботи нейтралі розподільчої електромережі суттєво впливає на вектор параметрів управління ξ , модель трансформатора як предмета управління, а значить, і на формулювання завдання керування.

Для досягнення одночасного зниження рівнів відхилення та несиметрії напруги задачі автоматичного управління пристроєм РПН трансформатора доцільно формулювати у вигляді завдань багатокритеріальної оптимізації. Це дозволяє враховувати особливості трьох найпоширеніших схем з'єднання обмоток:

1. «Зірка/трикутник» – схема, характерна для знижувального трансформатора номінальною напругою 35/10 кВ.
2. «Трикутник/зірка з нулем» – застосовується у знижувальних трансформаторах з напругою 10/0,4 кВ.
3. «Трикутник/зигзаг з нулем» – також використовується в знижувальних трансформаторах напругою 10/0,4 кВ.

Розглянемо випадок, коли у складі електричної мережі використовується трансформатор зі схемою з'єднання обмоток

«зірка/трикутник». Структура електричної мережі для такої конфігурації представлена на рисунку 2.2.

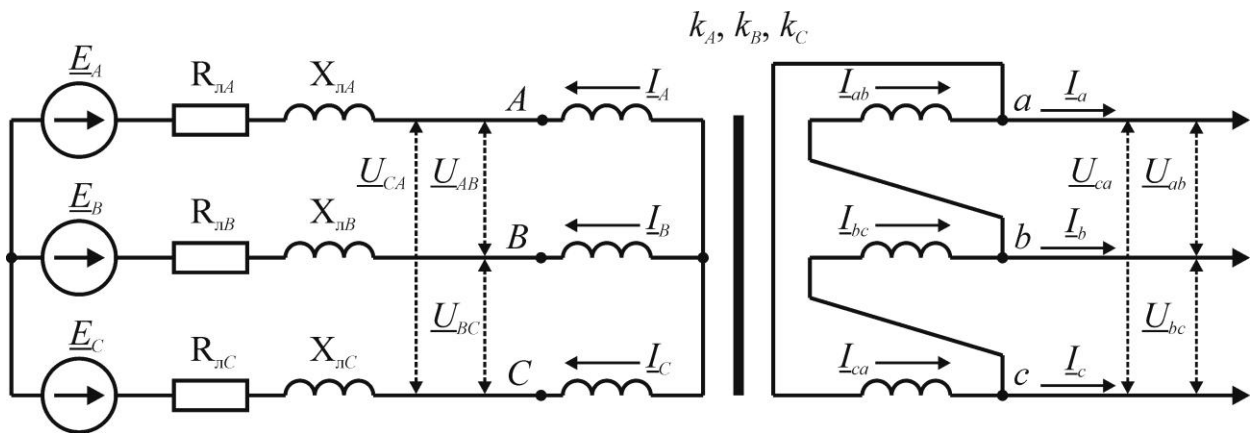


Рисунок 2.2 - Схема заміщення мережі, що зі з'єднання обмоток трансформатора «зірка/трикутник»

k_A, k_B, k_C – коефіцієнти трансформації для фаз А, В, С:

$$k_A = \frac{w_{A\text{ВН}}}{w_{A\text{НН}}}; k_B = \frac{w_{B\text{ВН}}}{w_{B\text{НН}}}; k_C = \frac{w_{C\text{ВН}}}{w_{C\text{НН}}}, \quad (2.1)$$

де $w_{A\text{ВН}}, w_{B\text{ВН}}, w_{C\text{ВН}}$ – число витків обмотки ВН трансформатора в фазах А, В, С;

$w_{A\text{НН}}, w_{B\text{НН}}, w_{C\text{НН}}$ – число витків обмотки НН трансформатора в фазах А, В, С;

Для схеми з'єднання обмоток силового трансформатора типу «зірка/трикутник», наведеної на рисунку 2.2, взаємозв'язок між параметрами напруги і струму на високовольтній стороні та напругами на низьковольтній стороні можна описати наступним чином:

$$\begin{cases} \underline{U}_{ab} = \frac{-(\underline{U}_A - \underline{I}_A \underline{Z}_k)}{k_A} = \frac{\underline{U}'_A}{k_A}; \\ \underline{U}_{bc} = \frac{-(\underline{U}_B - \underline{I}_B \underline{Z}_k)}{k_B} = \frac{\underline{U}'_B}{k_B}; \\ \underline{U}_{ca} = \frac{-(\underline{U}_C - \underline{I}_C \underline{Z}_k)}{k_C} = \frac{\underline{U}'_C}{k_C}, \end{cases} \quad (2.2)$$

де $\underline{Z}_k$ – комплексне значення опору к.з. трансформатора.

Для електричної мережі, зображеної на рис. 2.2, напруги прямої $\underline{U}_1$ та зворотної $\underline{U}_2$ послідовностей на стороні низької напруги можуть бути визначені за допомогою методу симетричних складових. Враховуючи формули (2.2), напруги визначаються наступним чином:

$$\underline{U}_1 = \frac{1}{3}(\underline{U}_{ab} + a\underline{U}_{bc} + a^2\underline{U}_{ca}) = \frac{1}{3}\left(\frac{\underline{U}'_A}{k_A} + a\frac{\underline{U}'_B}{k_B} + a^2\frac{\underline{U}'_C}{k_C}\right), \quad (2.3)$$

$$\underline{U}_2 = \frac{1}{3}(\underline{U}_{ab} + a^2\underline{U}_{bc} + a\underline{U}_{ca}) = \frac{1}{3}\left(\frac{\underline{U}'_A}{k_A} + a^2\frac{\underline{U}'_B}{k_B} + a\frac{\underline{U}'_C}{k_C}\right), \quad (2.4)$$

У випадку, коли електрична мережа має силовий трансформатор зі схемою з'єднання «зірка/трикутник з нулем», врахування специфіки взаємозв'язку напруг прямої та зворотної послідовностей із коефіцієнтами трансформації фаз А, В, С дозволяє уточнити критерії управління. Вирази (2.3) і (2.4) забезпечують основу для формулювання задачі багатокритеріальної оптимізації в даній конфігурації.

При схемі «зірка/трикутник з нулем» нульова послідовність напруг може проявлятися через з'єднання нейтралі, що ускладнює характер перетворень напруг між сторонами високої та низької напруги. Така схема заміщення зображена на рисунку 2.3.

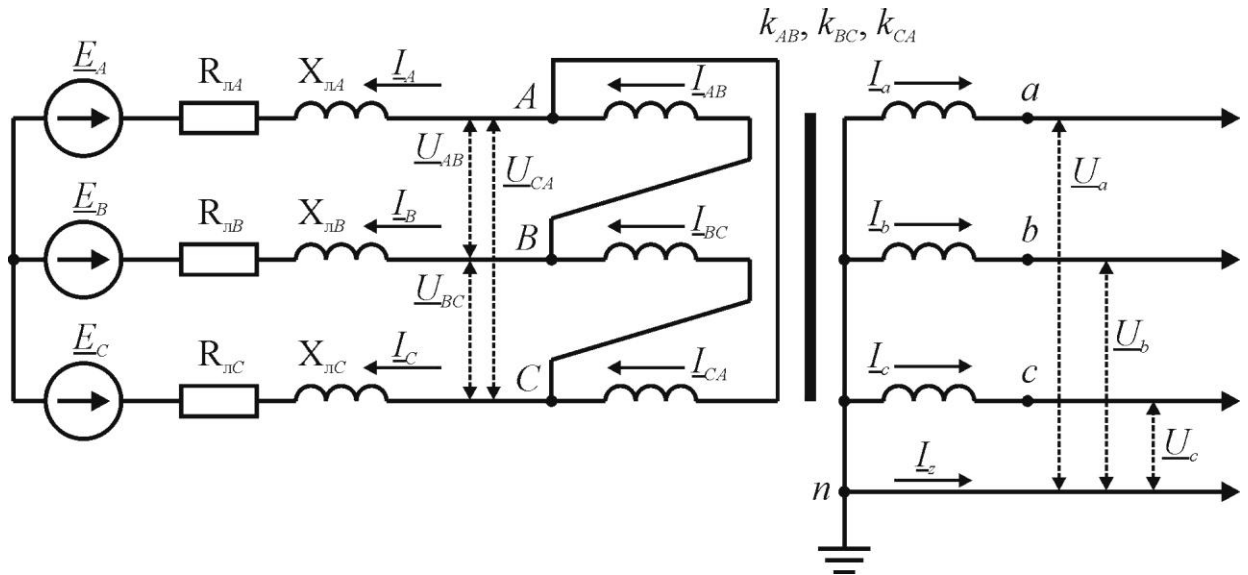


Рисунок 2.3 - Схема заміщення із схемою з'єднання обмоток трансформатора «трикутник/зірка з нулем»

Взаємозв'язок між напругами і струмами на стороні ВН та напругами на стороні НН силового трансформатора для схеми на рис. 2.3 може бути записаний у наступному вигляді [12]:

$$\begin{cases} \underline{U}_a = \frac{-(\underline{U}_{AB} - \underline{I}_{AB} \underline{Z}_k)}{k_{AB}} = \frac{\underline{U}'_{AB}}{k_{AB}}; \\ \underline{U}_b = \frac{-(\underline{U}_{BC} - \underline{I}_{BC} \underline{Z}_k)}{k_{BC}} = \frac{\underline{U}'_{BC}}{k_{BC}}; \\ \underline{U}_c = \frac{-(\underline{U}_{CA} - \underline{I}_{CA} \underline{Z}_k)}{k_{CA}} = \frac{\underline{U}'_{CA}}{k_{CA}}. \end{cases} \quad (2.5)$$

Для мережі, представленій на рис. 2.3, напруги прямої $\underline{U}_1$, зворотної $\underline{U}_2$ та нульової $\underline{U}_0$ послідовностей на стороні низької напруги визначаються відповідно до методу симетричних складових, відповідно формулі (2.5):

$$\underline{U}_1 = \frac{1}{3}(\underline{U}_a + a\underline{U}_b + a^2\underline{U}_c) = \frac{1}{3}\left(\frac{\underline{U}'_{AB}}{k_{AB}} + a\frac{\underline{U}'_{BC}}{k_{BC}} + a^2\frac{\underline{U}'_{CA}}{k_{CA}}\right), \quad (2.6)$$

$$\underline{U}_2 = \frac{1}{3}(\underline{U}_a + a^2 \underline{U}_b + a \underline{U}_c) = \frac{1}{3} \left(\frac{\underline{U}'_{AB}}{k_{AB}} + a^2 \frac{\underline{U}'_{BC}}{k_{BC}} + a \frac{\underline{U}'_{CA}}{k_{CA}} \right), \quad (2.7)$$

$$\underline{U}_0 = \frac{1}{3}(\underline{U}_a + \underline{U}_b + \underline{U}_c) = \frac{1}{3} \left(\frac{\underline{U}'_{AB}}{k_{AB}} + \frac{\underline{U}'_{BC}}{k_{BC}} + \frac{\underline{U}'_{CA}}{k_{CA}} \right). \quad (2.8)$$

Вирази (2.6)–(2.8) встановлюють взаємозв'язок між напругами прямої, зворотної та нульової послідовностей та коефіцієнтами трансформації фаз А, В, С силового трансформатора. Ці співвідношення можливо використовувати як основу для визначення критеріїв у задачі управління для силового трансформатора зі схемою з'єднання обмоток типу «трикутник/зірка з нулем».

При регулюванні напруги необхідно враховувати значення фазних напруг U_ϕ , оскільки це необхідно для забезпечення допустимих рівнів напруги на затискачах однофазних споживачів і уникнення зростання допустимих відхилень напруги на фазах трьохфазних споживачів.

Розглянемо випадок, коли в електричній мережі використовується силовий трансформатор зі схемою з'єднання обмоток типу «трикутник/зигзаг з нулем». Схема заміщення такого трансформатора наведена на рис. 2.4.

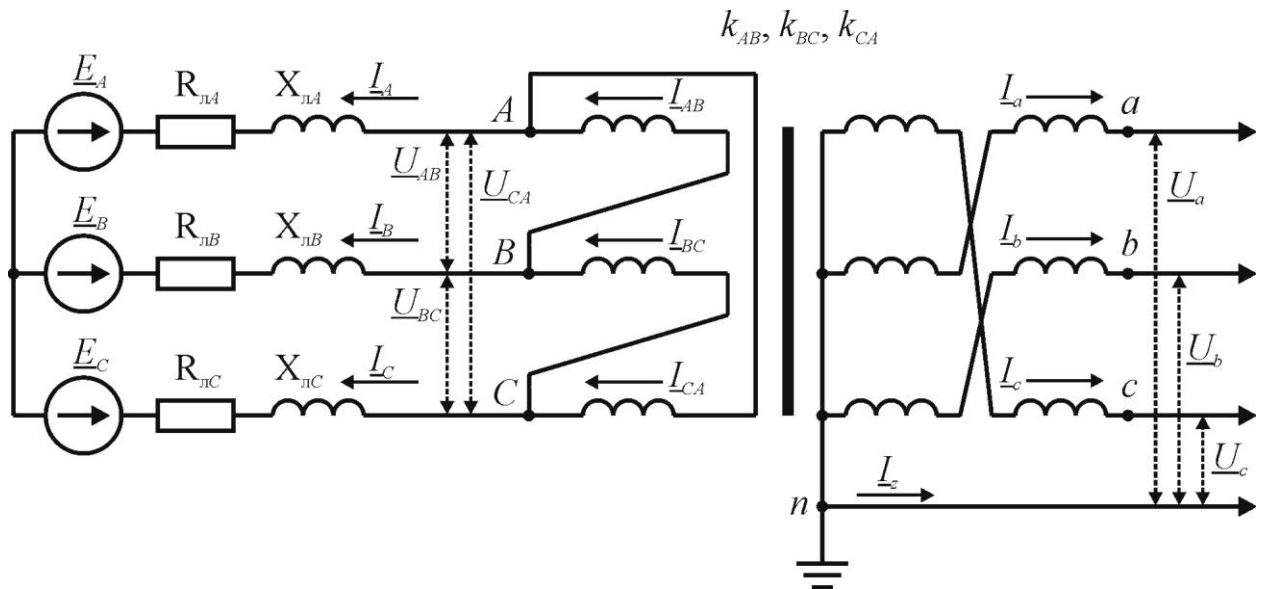


Рисунок 2.4 - Схема заміщення електромережі, із схемою з'єднання обмоток трансформатора типу «трикутник/зірка з нулем»

Для мережі, зображеної на рисунку 2.4, на стороні низької напруги спостерігається наявність напруг прямої $\underline{U}_1$ та зворотної $\underline{U}_2$ послідовностей. Для визначення цих параметрів шляхом методу симетричних складових використовуються відповідні вирази, враховуючи вирази (2.6-2.8):

$$\begin{aligned}\underline{U}_1 &= \frac{1}{3}(\underline{U}_a + a\underline{U}_b + a^2\underline{U}_c) = \\ &= \frac{1}{3}\left(\frac{\underline{U}'_{AB}}{k_{AB}} - \frac{\underline{U}'_{BC}}{k_{BC}} + a\left(\frac{\underline{U}'_{BC}}{k_{BC}} - \frac{\underline{U}'_{CA}}{k_{CA}}\right) + a^2\left(\frac{\underline{U}'_{CA}}{k_{CA}} - \frac{\underline{U}'_{AB}}{k_{AB}}\right)\right),\end{aligned}\quad (2.9)$$

$$\begin{aligned}\underline{U}_2 &= \frac{1}{3}(\underline{U}_a + a^2\underline{U}_b + a\underline{U}_c) = \\ &= \frac{1}{3}\left(\frac{\underline{U}'_{AB}}{k_{AB}} - \frac{\underline{U}'_{BC}}{k_{BC}} + a^2\left(\frac{\underline{U}'_{BC}}{k_{BC}} - \frac{\underline{U}'_{CA}}{k_{CA}}\right) + a\left(\frac{\underline{U}'_{CA}}{k_{CA}} - \frac{\underline{U}'_{AB}}{k_{AB}}\right)\right).\end{aligned}\quad (2.10)$$

Вирази (2.10) – (2.11) встановлюють зв'язок між напругами прямої та зворотної послідовностей та коефіцієнтами трансформації фаз А, В, С трансформатора. Ці співвідношення можуть бути застосовані при розробці

критеріїв для задачі управління пристроєм РПН трансформатора, що має схему з'єднання обмоток типу «трикутник/зигзаг з нулем».

2.2. Шляхи вирішення задач керування пристроями РПН силових трансформаторів.

На основі наведених рівнянь, що описують зв'язок між вхідними та вихідними параметрами трансформатора, можна сформулювати задачі керування пристроями РПН для кожної з трьох схем з'єднання обмоток.

Задачу керування пристроєм РПН для силового трансформатора зі схемою з'єднання обмоток «зірка/трикутник» можна записати у наступному вигляді:

$$\begin{cases} |\Delta U_1(\mathbf{K})| = |U_1(\mathbf{K}) - U_{\text{ном}}| \rightarrow \min; \\ U_2(\mathbf{K}) \rightarrow \min; \\ \mathbf{K} \in \Omega, \end{cases} \quad (2.11)$$

U_1 – значення напруги прямої послідовності;

ΔU_1 – різниця значень напруг прямої послідовності та номінальної напруги;

$U_{\text{ном}}$ – значення номінальної напруги;

U_2 – значення напруги зворотної послідовності;

Ω – область припустимих значень вектора коефіцієнтів трансформації;

Отже, постановка задачі керування пристроєм РПН трансформатора зі схемою з'єднання обмоток типу «трикутник/зірка з нулем» записується у вигляді:

$$\begin{cases} |\Delta U_1(\mathbf{K})| = |U_1(\mathbf{K}) - U_{\text{ном}}| \rightarrow \min; \\ U_2(\mathbf{K}) \rightarrow \min; \\ U_0(\mathbf{K}) \rightarrow \min; \\ |\Delta U_{\phi i}(\mathbf{K})| \rightarrow \min; \\ \mathbf{K} \in \Omega, \end{cases} \quad (2.12)$$

Формулювання такої задачі управління як задачі виду багатокритеріальної оптимізації запишемо у вигляді:

$$\begin{cases} |\Delta U_1(\mathbf{K})| = |U_1(\mathbf{K}) - U_{\text{ном}}| \rightarrow \min; \\ U_2(\mathbf{K}) \rightarrow \min; \\ |\Delta U_{\phi i}(\mathbf{K})| \rightarrow \min; \\ \mathbf{K} \in \Omega. \end{cases} \quad (2.13)$$

Для реалізації методу зустрічного регулювання напруги, в виразах (2.11), (2.12), (2.13) використовують напругу на низькій стороні $U_{\text{НН}}$ замість номінальної $U_{\text{ном}}$ з урахуванням струмової компенсації.

2.3. Методи керування пристроєм РПН силового трансформатора.

Теоретично, рішення задачі багатокритеріальної оптимізації представляє собою множину точок, де кожна точка з цієї множини, поступаючи іншим точкам за кількома критеріями, перевищує їх хоча б по одному критерію. Така множина точок називається множиною ефективних або парето-оптимальних рішень. Проте такий розв'язок не є кінцевим, оскільки для більшості задач необхідно знайти єдиний розв'язок, який буде належати множині парето-оптимальних рішень. Для отримання остаточного рішення задачі багатокритеріальної оптимізації потрібно додатково враховувати певну інформацію, яка дозволить вибрати остаточний розв'язок із множини ефективних рішень.

Відповідно до ДЕСТ 13109-97, для оцінки якості електричної енергії застосовуються нормально допустимі та гранично допустимі величини ПЯЕ (показники якості електричної енергії). Рівні ПЯЕ (включаючи рівень постійного відхилення напруги та коефіцієнти асиметрії напруги за зворотною та нульовою послідовностями) на затискачах електричних

споживачів за певний період часу не повинні перевищувати допустимі значення з імовірністю 95%. Важливо, що ці вимоги стосуються всіх ПЯЕ без винятку, без надання переваги одному з показників на шкоду іншим.

Отже, для розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації (2.4), (2.9) та (2.12) потрібно обрати метод, який найбільш повно враховуватиме вимоги ДЕСТ 13109-97 відносно рівнів ПЯЕ.

Існують різні групи методів для розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації:

- методи, які ґрунтуються на накладенні обмежень на критерії;
- методи, засновані на лінійному комбінуванні критеріїв;
- методи, що орієнтовані на пошук компромісного розв'язку;
- методи інтерактивного програмування;
- методи цільового програмування.

Далі розглянемо найбільш відомі методи вирішення задач багатокритеріальної оптимізації.

1. Метод головного критерію відноситься до методів, що ґрунтуються на застосуванні обмежень на критерії оптимізації. У цьому випадку задача багатокритеріальної оптимізації перетворюється на задачу умовної скалярної оптимізації, де один із критеріїв вибирається як основний, а всі інші — як обмеження, що накладаються на основну задачу:

$$\begin{cases} Q_1(\mathbf{K}) \rightarrow \min; \\ Q_2(\mathbf{K}) \leq Q_{2\max}; \\ \dots \\ Q_i(\mathbf{K}) \leq Q_{i\max}; \\ \mathbf{K} \in \Omega, \end{cases} \quad (2.14)$$

2. Метод лінійного згортання використовується, коли маємо відносну значимість кожного з критеріїв. Це метод лінійного об'єднання всіх критеріїв за допомогою введення вагових коефіцієнтів для кожного з них. Таким чином, кожен критерій помножується на відповідний ваговий коефіцієнт, що

відображає його важливість, і результати додаються, утворюючи єдиний загальний критерій для оптимізації:

$$\begin{cases} F_1(\mathbf{K}) = \sum_{i=1}^m \alpha_i Q_i(\mathbf{K}) \rightarrow \min; \\ \mathbf{K} \in \Omega, \end{cases} \quad (2.15)$$

3. Максимінні (мінімаксні) методи відносяться до методів, які зосереджені на пошуку компромісного розв'язку. Мінімаксний метод для вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації формулюють таким чином: метою є мінімізація найгіршого значення серед всіх критеріїв, тобто зменшення максимальних значень всіх критеріїв до найкращого можливого рівня.

В рамках цього методу обирається стратегія, яка забезпечує оптимальний результат за найгіршим критерієм, що дозволяє знайти компроміс між різними вимогами та досягти балансованого результату для всіх критеріїв:

$$\begin{cases} F_2(\mathbf{K}) = \max_{i=1, \dots, m} Q_i(\mathbf{K}) \rightarrow \min \\ \mathbf{K} \in \Omega, \end{cases} \quad (2.16)$$

4. Адаптивний метод відноситься до методів інтерактивного програмування і базується на використанні оціночної думки під час вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації. Цей метод застосовують для вирішення складних задач, які важко формалізувати, а також для яких потрібні знання та досвід експерта. Оскільки метод вимагає участі людини в процесі прийняття рішень, то він не може бути основою для автоматизованої системи управління.

5. Лексикографічна оптимізація є частиною методів цільової оптимізації і використовується, коли критерії можна розташувати за ступенем важливості (ранжувати). У цьому випадку оптимізація здійснюється по черзі за кожним критерієм в порядку їх значущості.

Загальний недолік усіх вищезгаданих методів полягає в невизначеності щодо обґрунтування важливості критеріїв $Q_i(\mathbf{K})$, що може призвести до суб'єктивності у прийнятті рішень.

6. Метод наближення до утопічної (ідеальної) точки в просторі критеріїв є ще одним науковим підходом у рамках методів цільової оптимізації. Цей метод дозволяє подолати невизначеність у визначенні важливості критеріїв $Q_i(\mathbf{K})$, оскільки він орієнтований на досягнення максимально можливого значення кожного критерію, що наближає рішення до ідеального стану. За допомогою цього методу знаходиться точка в просторі критеріїв, яка представляє собою найкраще можливе значення для всіх критеріїв одночасно, і система намагається наблизитись до цієї точки.

Формалізація задач автоматичного керування безконтактними пристроями РПН для силових трансформаторів із різними схемами з'єднання обмоток, такими як «зірка/трикутник», «трикутник/зірка з нулем» і «трикутник/зигзаг з нулем», показала, що дані задачі можна трактувати як задачі багатокритеріальної оптимізації.

Після аналізу взаємозв'язків між струмами і напругами на високій та низькій напругах трансформатора із зазначеними схемами з'єднання обмоток було визначено число та форму критеріїв для кожного з варіантів задач. Зокрема, задача для трансформатора з'єданого за схемою «зірка/трикутник» містить два важливих критерії, для схеми «трикутник/зірка з нулем» — шість важливих критеріїв, а для «трикутник/зигзаг з нулем» — п'ять важливих критеріїв.

Після розгляду різних методів розв'язку задач керування безконтактними пристроями РПН для силових трансформаторів з різними схемами з'єднання обмоток як задач багатокритеріальної оптимізації було виявлено, що найбільш ефективним методом є метод наближення до утопічної точки в просторі критеріїв. Завдяки цьому методу можна найбільш повно врахувати вимоги ДЕСТ 13109-97 щодо рівнів ПЯЕ, що нормують допустимі відхилення та несиметрії напруг у розподільчих електричних мережах.

З МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ УПРАВЛІННЯ ПРИСТРОЯМИ РПН СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Перевірку коректності отриманих теоретичних результатів і висновків, а також оцінку ефективності їх впровадження можливо провести через математичне моделювання процесу автоматичного управління пристроєм РПН для силового трансформатора.

Для створення математичних моделей системи автоматичного управління (САУ) з безконтактним пристроєм РПН для кожного з трьох варіантів з'єднання обмоток трансформатора використано програмне забезпечення Matlab, зокрема його розширення для моделювання та аналізу динамічних систем – Simulink. Моделювання САУ здійснювалося в умовних номінальних одиницях у фазних координатах.

Для того, щоб оцінити отриманий ефект від розв'язків задач керування, необхідно отримати реальні дані керування. Це можна зробити, використовуючи результати вимірювань параметрів режиму розподільчих електричних мереж як вихідні дані для моделювання. В якості цих вихідних даних для моделювання були використані результати дослідно-експериментальних вимірювань параметрів електричного режиму, проведених в розподільчих електричних мережах ПАТ «Кіровоградобленерго» за допомогою сертифікованого аналізатора мереж FLUKE 1744 Memobox.

3.1. Моделювання управління пристроєм РПН силового трансформатора.

Для оцінки ефективності застосування розв'язків задач керування (2.11), (2.12), (2.13), а також для вивчення їх стійкості необхідно здійснити

моделювання систем автоматичного управління (САУ) для пристроїв РПН силових трансформаторів.

Незважаючи на різницю в структурних схемах, для них можна виділити наступні спільні компоненти:

- Об'єкт управління – розподільча електрична мережа, що включає понижувальний силовий трансформатор із пристроєм РПН, що працює під навантаженням.
- Вимірювальний прилад – трансформатор напруги (для схеми з'єднання обмоток трансформатора «зірка/трикутник») або дільник напруги (для схем з'єднання обмоток «трикутник/зірка з нулем» та «трикутник/зигзаг з нулем»).
- Прилад прийняття керуючого рішення – обчислювальна система, що функціонує відповідно алгоритмам, розробленим на основі рішень задач керування (2.11), (2.12), (2.13).
- Пристрій управління – система автоматичного керування безконтактним пристроєм РПН силового трансформатора.

Для моделювання систем автоматичного регулювання напруги використаємо математичний апарат передаточних функцій [5].

РЕМ із силовим трансформатором та лінією електропередач може моделюється Г-подібною схемою заміщення. Тоді передаточна функція Г-подібної схеми заміщення буде мати наступний вигляд [5]:

$$W_{\text{рем}}(p) = \frac{1}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}, \quad (3.1)$$

де T_1, T_2 – значення постійних часу:

$$T_1 = RC, \quad (3.2)$$

де R – значення подовжнього активного опору;
 C – поперечна ємність схеми заміщення.

$$T_2 = \sqrt{LC}, \quad (3.3)$$

де L – значення поздовжньої індуктивності схеми заміщення.

Співвідношення T_1 і T_2 викликає перехідний процес при зміні регулюючого відгалуження трансформатора та може приймати аперіодичний або коливальний вигляд.

Передаточна функція ТН:

$$W_{\text{тн}}(p) = \frac{k_{\text{тн}}(T_1 p + 1)}{(T_2 p + 1)}, \quad (3.4)$$

де $k_{\text{тн}}$ – коефіцієнт трансформації ТН;

T_1, T_2 – значення постійних часу ТН.

Вигляд передаточної функції дільника напруги має вигляд:

$$W_{\text{д}}(p) = \frac{1}{k_{\text{д}}}, \quad (3.5)$$

де $k_{\text{д}}$ – значення коефіцієнту дільника напруги.

У основі моделювання пристроїв прийняття керуючого рішення лежать розроблені алгоритми для розрахунку вектора керування. Враховуючи високу швидкодію безконтактного пристрою РПН, який здатен проводити декілька перемикань за один період змінної напруги промислової частоти, можна не враховувати затримки часу, які виникають у СІФУ та безпосередньо в самому пристрої РПН. Тому для спрощення даної моделі допустимо, що перемикання регулюючих відгалужень силового трансформатора відбувається безпосередньо після розрахунку оптимальних значень вектора керування, без затримок часу.

Для реалізації математичних моделей систем автоматичного регулювання напруги буде використано пакет прикладних програм Matlab

Simulink. Для цього потрібно створити комп'ютерне моделювання систем автоматичного регулювання напруги для кожного варіанту схем з'єднання обмоток силових трансформаторів.

3.2. Комп'ютерна модель управління пристроєм РПН силового трансформатора із схемою з'єднання обмоток «зірка/трикутник».

Рис. 3.1 демонструє загальну модель управління пристроєм РПН силового трансформатора.

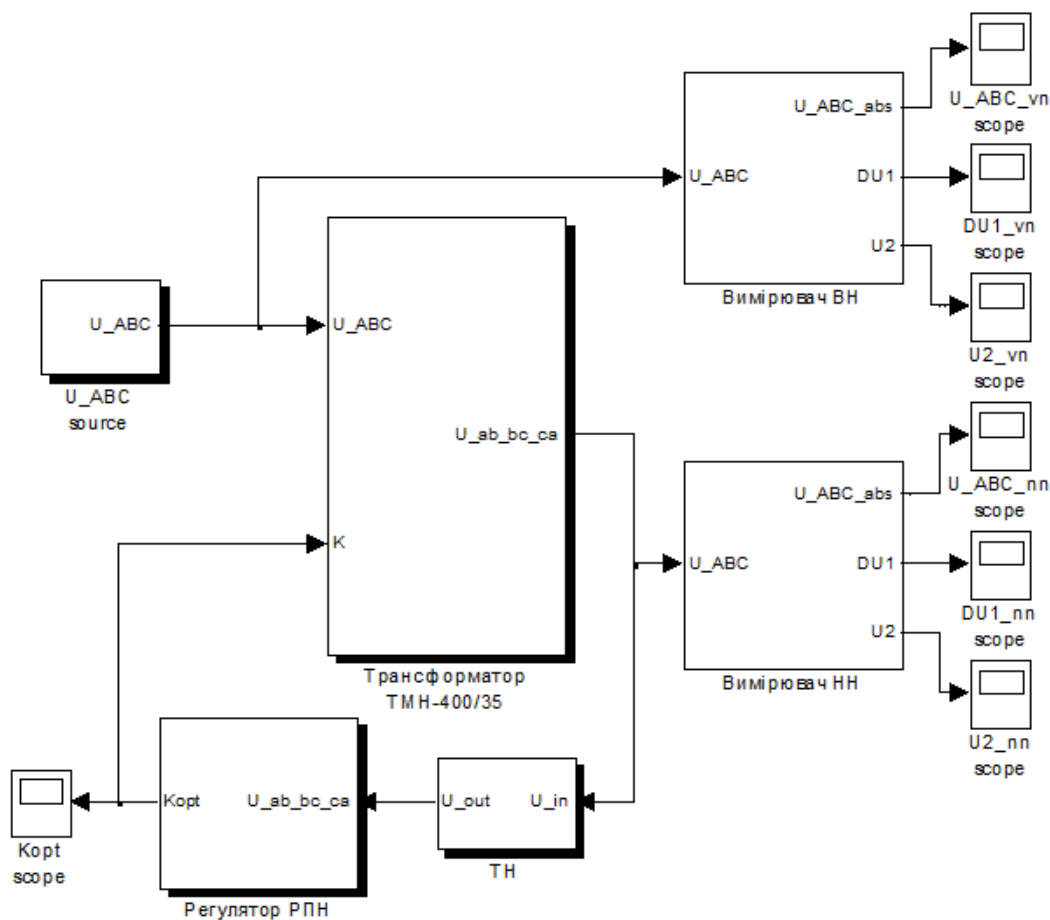


Рисунок 3.1 - Модель управління пристроєм РПН трансформатора для Matlab Simulink, із з'єднанням обмоток «зірка/трикутник»

Загальна модель САУ пристроєм РПН складається з моделей блоку вихідних даних, силового трансформатора ТМН-400/35 зі з'єднанням

обмоток «зірка/трикутник», вимірювача ПЯЕ на стороні високої напруги, вимірювача ПЯЕ на стороні низької напруги, трансформатора напруги, пристрою прийняття керуючого рішення.

Модель блоку вихідних даних представлена на рис. 3.2.

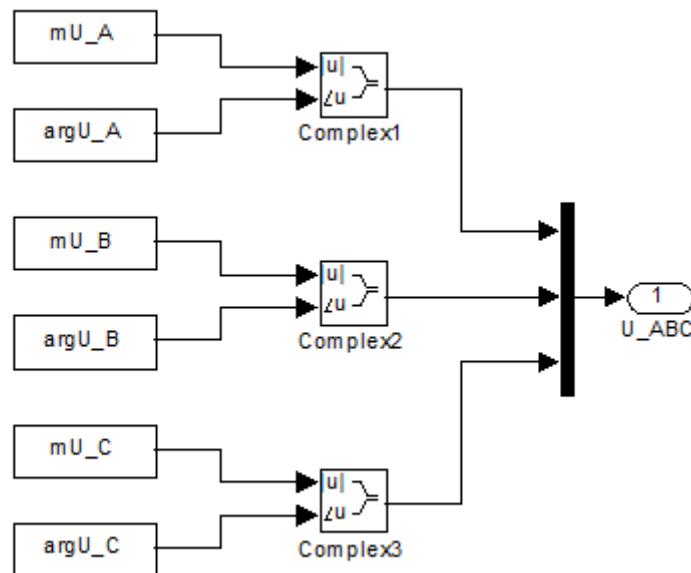


Рисунок 3.2 - Модель блоку вихідних даних

Модель блоку вихідних даних містить наступні блоки:

- | | |
|--------------------------------------|--|
| - mU_A, mU_B, mU_C | - блок зчитування текстових файлів модулів комплексів напруг |
| - argU_A, argU_B, argU_C | - блок зчитування з текстових файлів аргументів комплексів напруг; |
| - «Complex1», «Complex2», «Complex3» | - блок формування комплексних параметрів по заданим модулям і аргументам |

Модель трансформатору ТМН-400/35 представлена на рис. 3. 3.

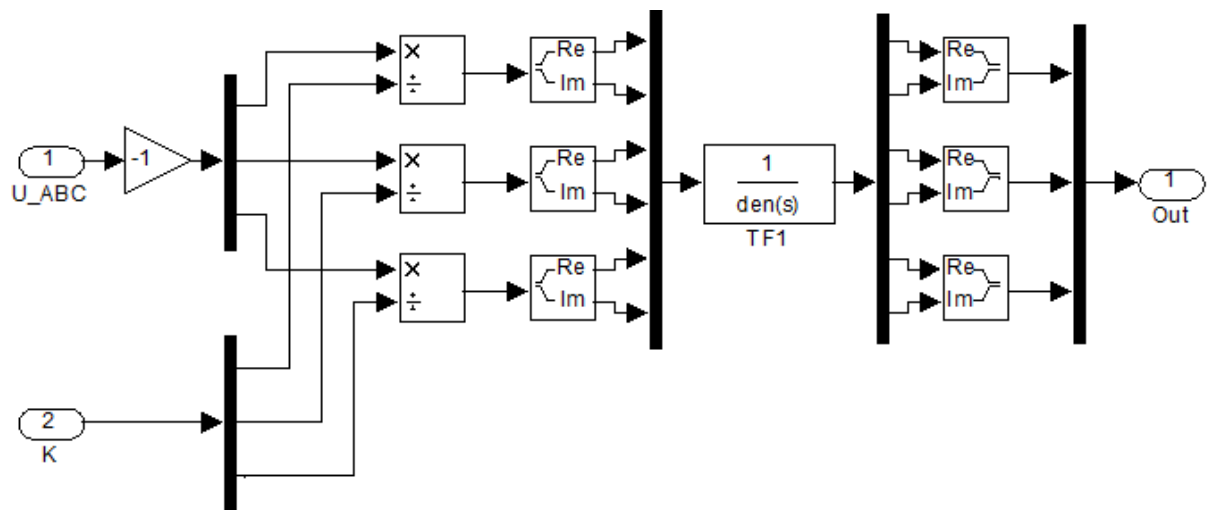


Рисунок 3.3 - Модель трансформатора ТМН-400/35

У цьому блоці реалізуються рівняння (2.2), які описують зв'язок між напругами на високовольтній та низьковольтній сторонах силового трансформатора. Блок «TF1» відповідає за реалізацію передаточної функції розподільчої електричної мережі відповідно до виразу (3.2).

Блок «ТН» реалізує передаточну функцію трансформатора напруги згідно з формулою (3.5).

На рис. 3. 4 представлена модель блоку «Вимірювач ВН».

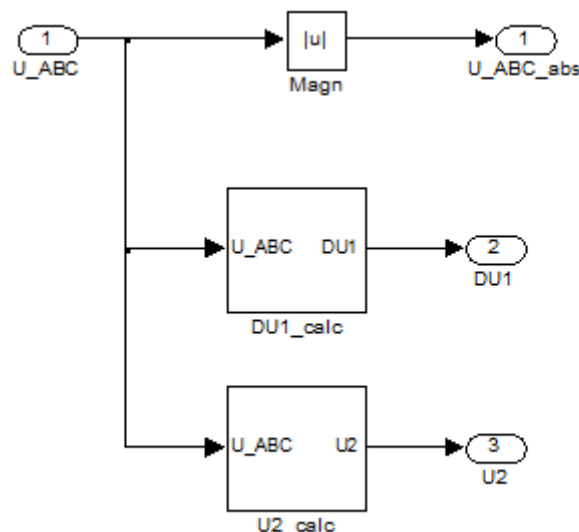


Рисунок 3.4 - Моделювання блоку «Вимірювач ВН» для Matlab Simulink

Блок «Вимірювач ВН» проводить вимірювання діючих значень напруг, рівнів сталого відхилення напруги і несиметрії напруг зворотної послідовності. Модель блоку вимірювання сталого відхилення напруги «DU1_calc» показана на рис. 3. 5.

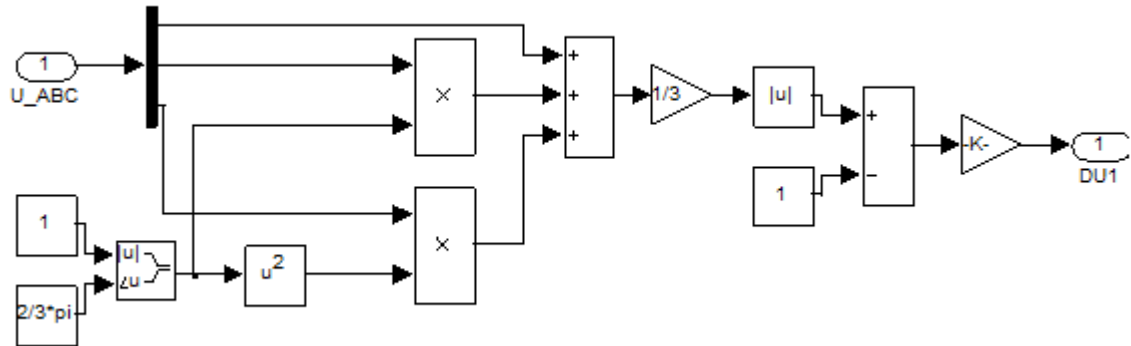


Рисунок 3.5 - Моделювання блоку «DU1_calc» для Matlab Simulink

Визначення напруги прямої послідовності проводиться в блоці «DU1_calc» відповідно рівнянь (2.2).

Моделювання блоку вимірювання рівня напруги за зворотною послідовністю «U2_calc» показано на рис. 3. 6.

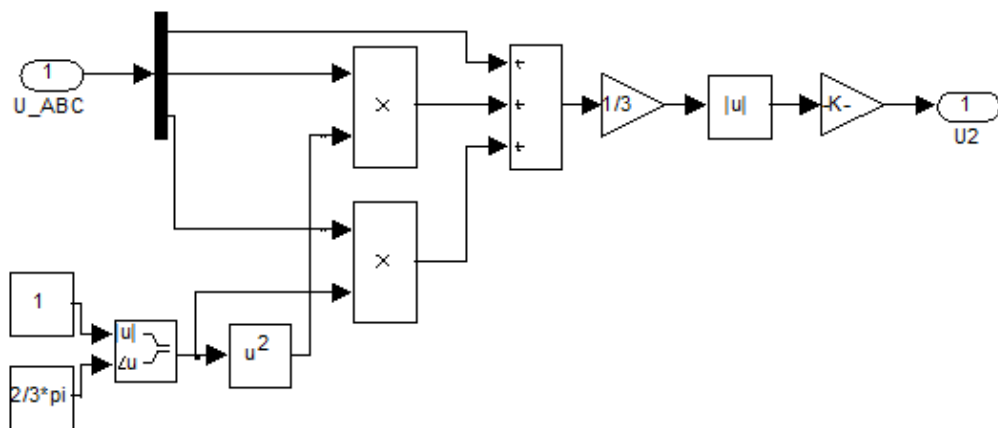


Рисунок 3.6 - Моделювання блоку «U2_calc» для Matlab Simulink

Визначення напруги зворотної послідовності проводиться в блоці «DU1_calc» відповідно рівнянь (2.3).

Моделювання блоку «Вимірювач НН» подвбно моделюванню блоку «Вимірювач ВН».

За основу моделювання блоку «Регулятор РПН», представленому на рис. 3.7, взято розроблений алгоритм розрахунків вектора керування пристроєм РПН трансформатора зі схемою з'єднання обмоток типу «зірка/трикутник» (рис. 3.2).

Моделювання блоку «Регулятор РПН» складається з наступних блоків:

- «Subsystem2» (рис. 3.8) – блоку для розрахунку величин комплексів напруг на боці високої напруги силового трансформатора по визначеним значенням та комплексів напруг на боці низької напруги відповідно рівнянь (2.2).

- «DUut» (рис. 3.9) – блоку обчислень координати утопічної точки ΔU_{1yt} .

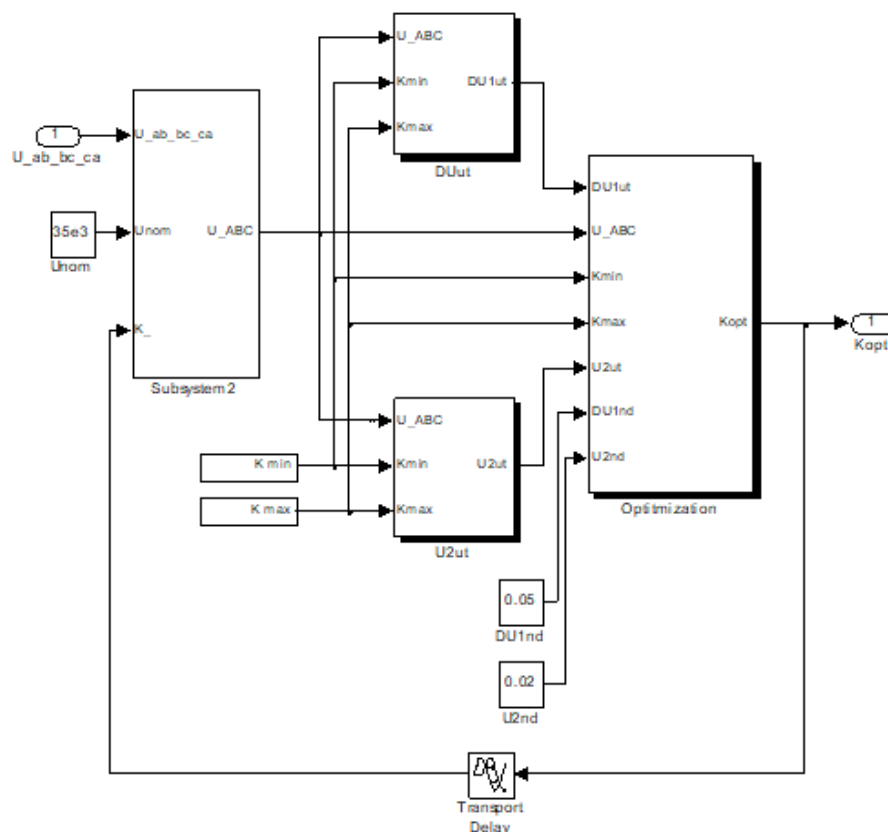


Рисунок 3.7 - Моделювання блоку «Регулятор РПН»

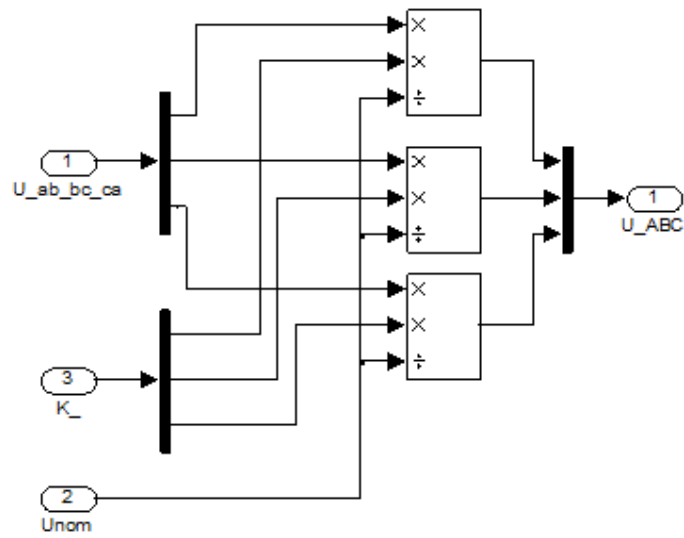


Рисунок 3.8 - Моделювання блоку «Subsystem2»

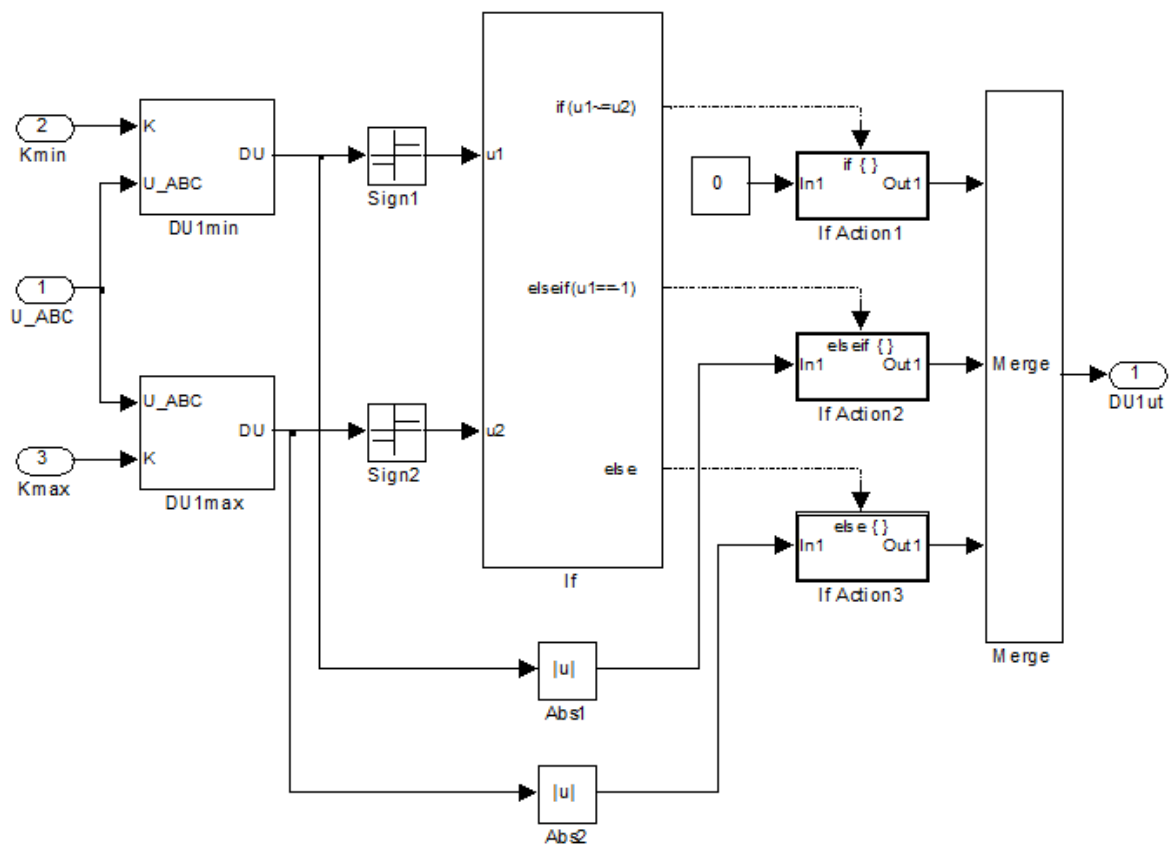


Рисунок 3.9 - Моделювання блоку «DUut»

– U2ut» (рис. 3.10) – блок для розрахунку координати утопічної точки. Його робота базується на алгоритмі визначення координати утопічної точки, показаному на рис. 3.4 та 3.5.

– «Kmin», «Kmax» – блоки для задання меж зміни коефіцієнта трансформації силового трансформатора.

– «DU1nd», «U2nd» – блоки, які задають величини нормально допустимих значень для сталого відхилення напруги та несиметрії напруги по зворотній послідовності, відповідно до ДЕСТ 13109-97.

– «Optimisation» (рис. 3.11) – блок для визначення кінцевого рішення задачі багатокритеріальної оптимізації (2.12). Він працює на основі алгоритму, що описує процес отримання кінцевого розв’язку задачі (2.12), блок-схема якого показана на рис. 3.6.

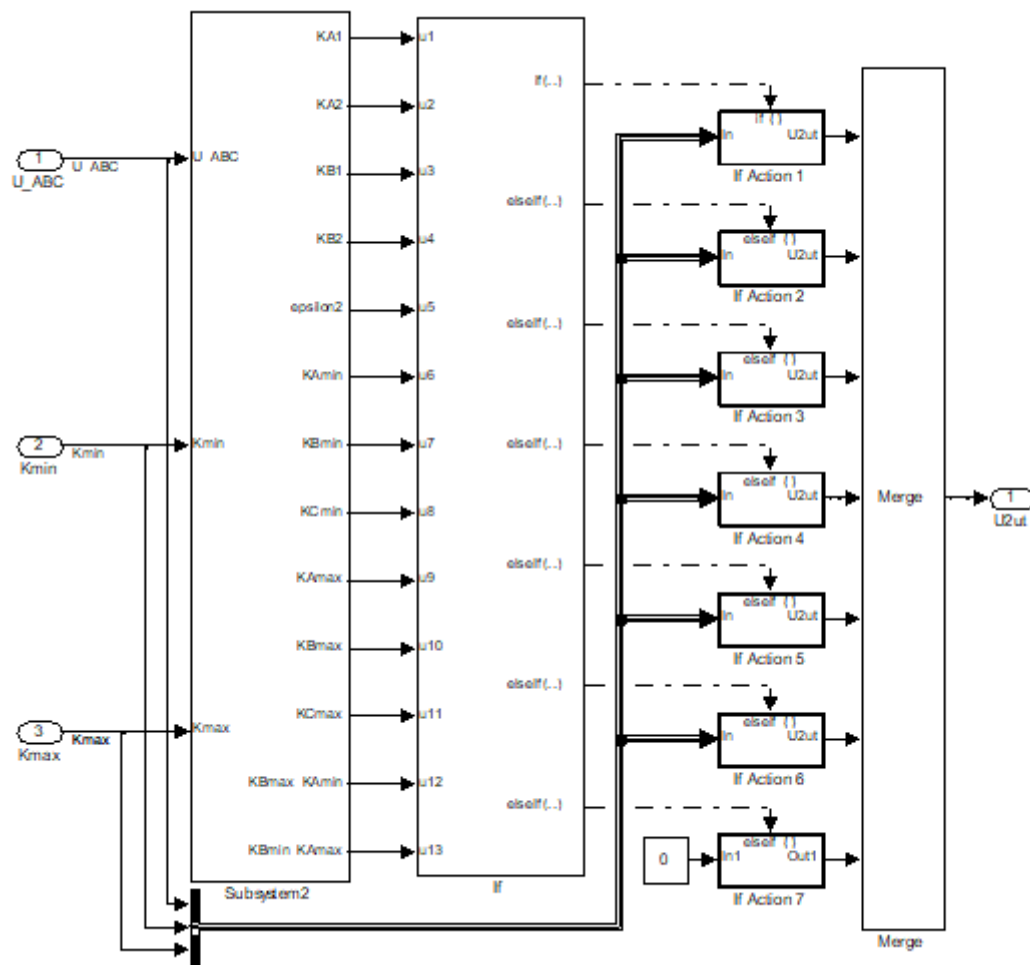


Рисунок 3.10 - Моделювання блоку «U2ut»

3.3. Комп'ютерна модель управління пристроєм РПН трансформатора зі схемою об'єднання обмоток «трикутник/зірка з нулем».

На рис. 3.12 представлена загальна структура системи автоматичного управління для пристрою РПН. Модель включає такі основні компоненти:

- «U_AB_BC_CA» – блок, що відповідає за вихідні дані;
- «Трансформатор ТМН-250/10» – модель трансформатора ТМН-250/10 з підключенням обмоток за схемою «трикутник/зірка з нулем»;
- «Вимірювач ВН» – система для вимірювання показників якості електричної енергії на високовольтній стороні;
- «Вимірювач НН» – система для вимірювання показників на низьковольтній стороні трансформатора;
- «ДН» – модель для визначення дільника напруги;
- «Регулятор РПН» – пристрій, який визначає керуюче рішення.

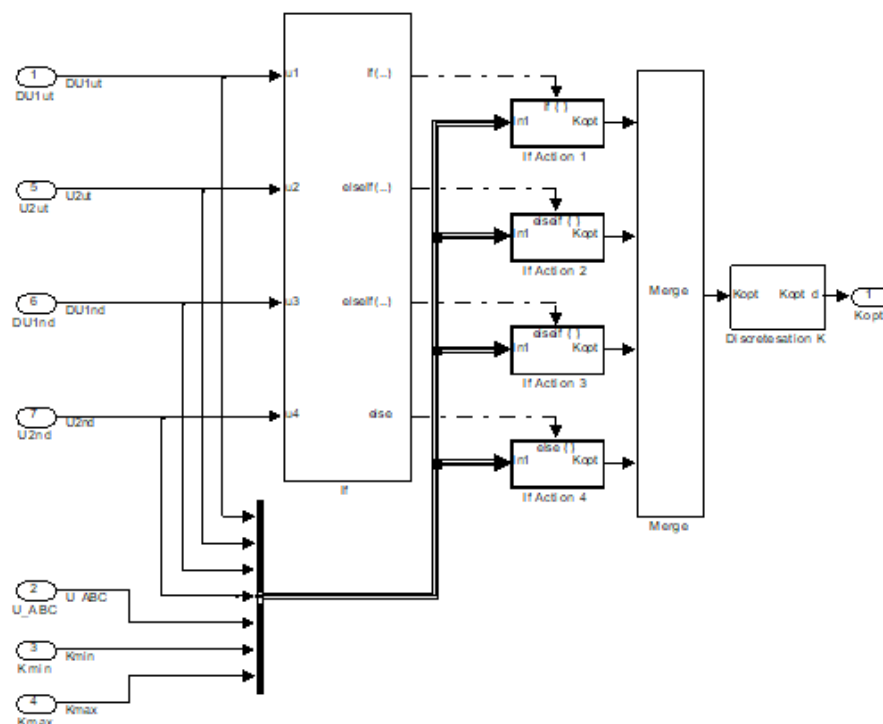


Рисунок 3.11 - Моделювання блоку «Optimisation»

Конструкція цієї моделі схожа на модель САУ для пристрою з РПН трансформатора із схемою типу «зірка/трикутник». Тому в основному будуть зазначені лише основні відмінності між даними моделями.

Наприклад, блок «Вимірювач НН» (рис. 3.13) включає додатково не лише блоки для обчислення напруги, але й інші елементи, такі як «U0_calс» (рис. 3.14) і «DUf_calс» (рис. 3.15), які здійснюють спеціалізовані функції для цього конкретного варіанту схеми з'єднання обмоток.

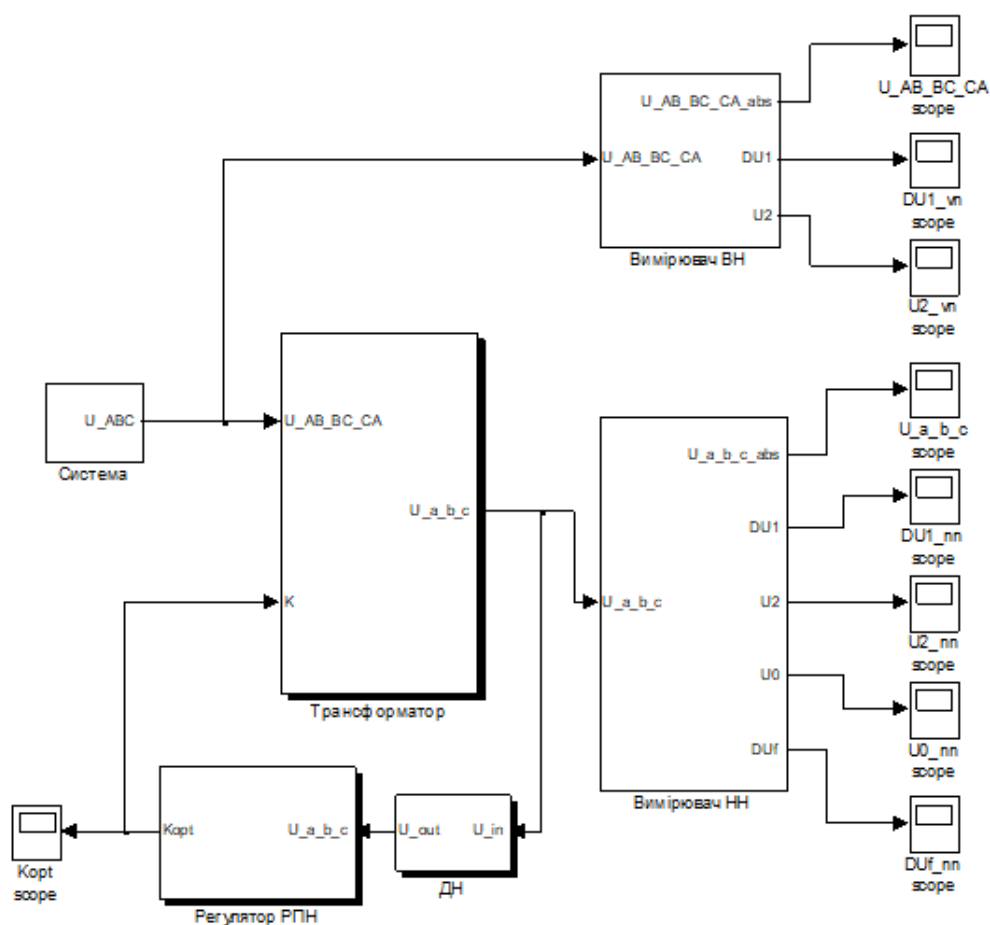


Рисунок 3.12 - Загальне моделювання управління пристроєм РПН трансформатора, обмотки якого з'єднані по схемі «трикутник/зірка з нулем».

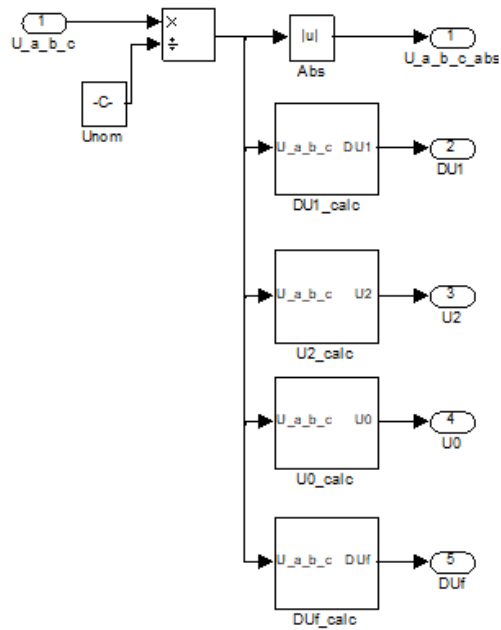


Рисунок 3.13 - Моделювання блоку «Вимірювач НН»

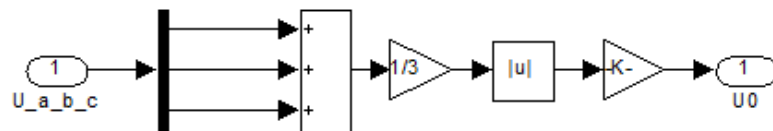


Рисунок 3.14 - Моделювання блоку «U0_calc»

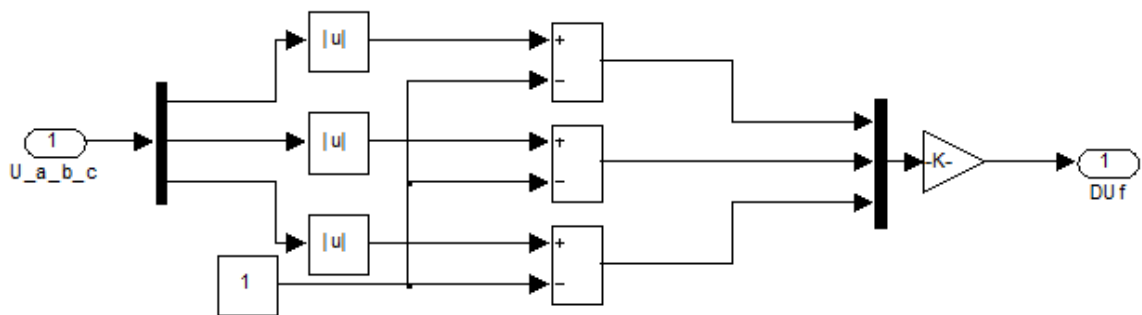


Рисунок 3.15 - Моделювання блоку «DUF_calc»

У блоці «U0_calc» для визначення напруги нульової послідовності використано рівняння згідно з формулою (2.8).

Блок «ДН», що моделює дільник напруги, реалізує передаточну функцію, що описана формулою (3.5).

Модель блоку «Регулятор РПН» показана на рис. 3.16 і працює за алгоритмом, розробленим для обчислення вектора керування безконтактним пристроєм РПН трансформатора, що має схему з'єднання обмоток типу «трикутник/зірка з нулем» (рис. 3.8).

Блоки «U0ut» і «DUf_ut» відповідають за обчислення координат утопичної точки та значення, що описуються представленими формулами (2.47) і (2.58) відповідно. Їхня робота аналогічна роботі блоків «U2ut» та «DUut» з моделювання на рис. 3.7.

Таким чином, структура і принцип роботи моделювання на рис. 3.16 є подібними до тієї, що показана на рис. 3.17.

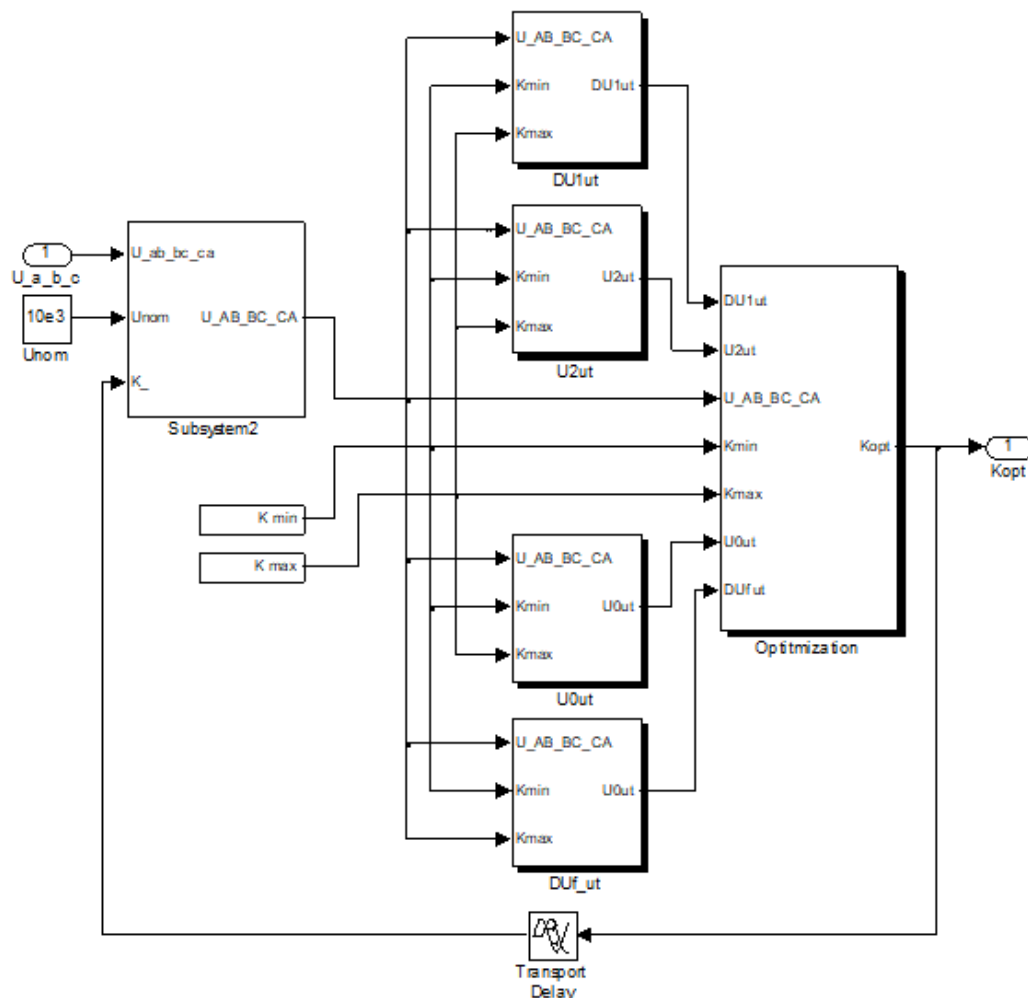
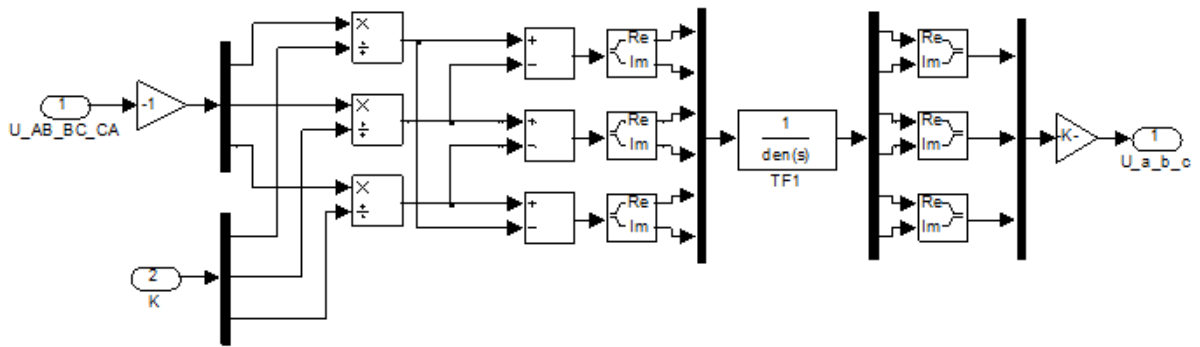


Рисунок 3.16 - Моделювання блоку «Регулятор РПН»



У цьому блоці реалізуються вирази (2.10), що описують залежність між напругами на високій та низькій напругах силового трансформатора, у якого схема з'єднання обмоток «трикутник/зигзаг з нулем».

Модель блоку «Регулятор РПН», показана на рис. 3.19, подібна до моделі на рис. 3.16, з тією лише різницею, що вона не має блоку «U0ut», який відповідає за розрахунок координати утопічної точки.

1. Для функціонування розробленої системи управління необхідно мати вихідні дані про параметри електричного режиму мережі (лінійні та фазні напруги), які використовуються для моделювання об'єкта управління (трансформатора з РПН) щодо досліджуваних процесів.
2. Блок прийняття управляючого рішення включає технічну інформацію про керуючий пристрій (безконтактний пристрій РПН дискретного типу), визначаючи мінімальні та максимальні величини коефіцієнтів трансформації та крок регулювання.

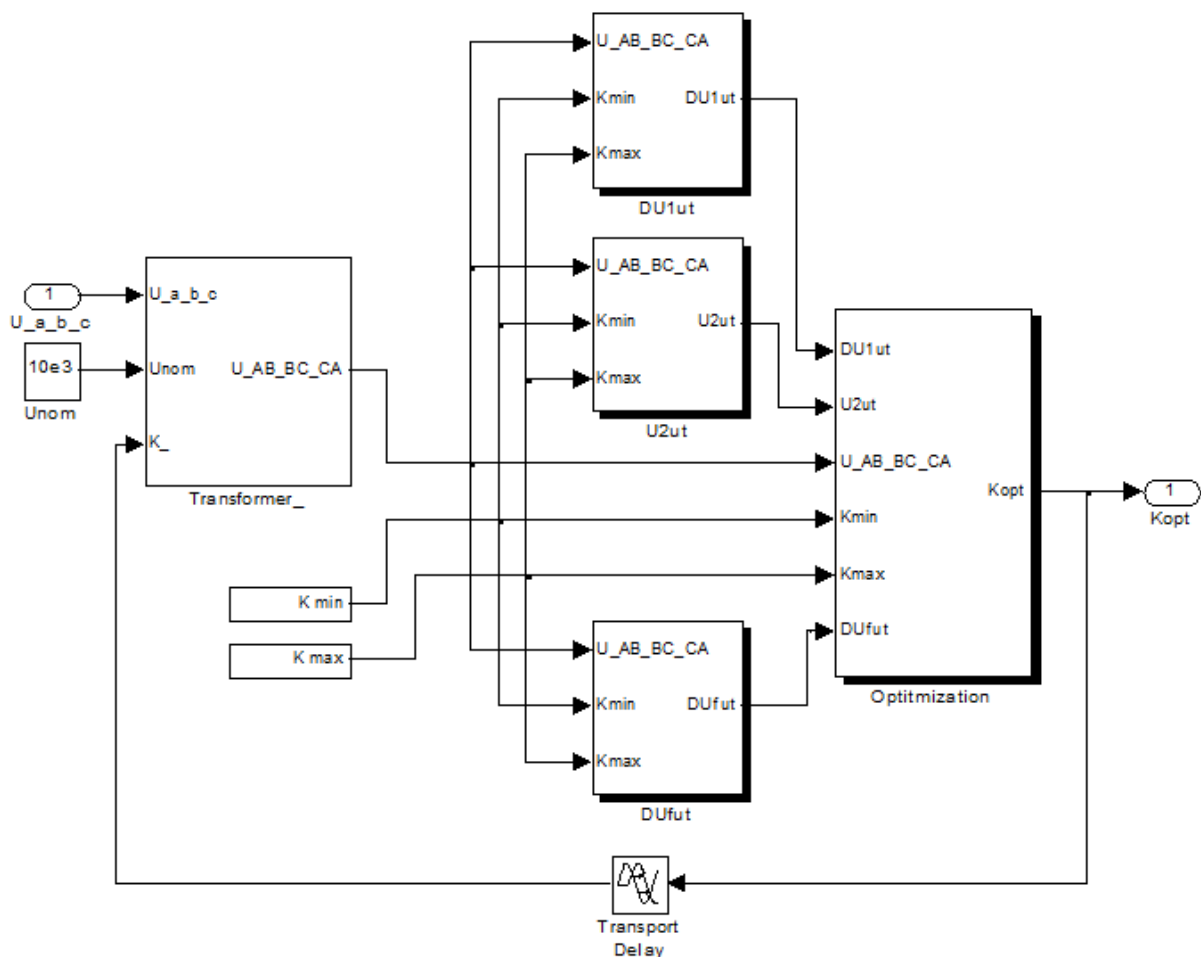


Рисунок 3.19 - Моделювання блоку «Регулятор РПН».

3.5. Обробка результатів комп'ютерного моделювання системи управління пристроєм РПН силового трансформатора.

Для оцінки ефективності вирішення задач керування (2.12), (2.13), (2.14) будуть використані комп'ютерні математичні моделі САУ, розроблені розділом раніше. Вхідними параметрами для моделей стали результати дослідницько-експериментальних вимірювань електричних режимів (лінійні та фазні напруги), проведених у розподільчих мережах ПАТ «Кіровоградобленерго» за допомогою сертифікованого аналізатора мереж FLUKE 1744 Memobox.

Для порівняння задач була вибрана базова модель САУ, де блок прийняття керуючого рішення працює згідно з законом управління (1.1). Комп'ютерна модель даного блоку, що реалізує зазначений закон управління, була змодельована в середовищі Matlab Simulink і представлена на рис. 3.20.

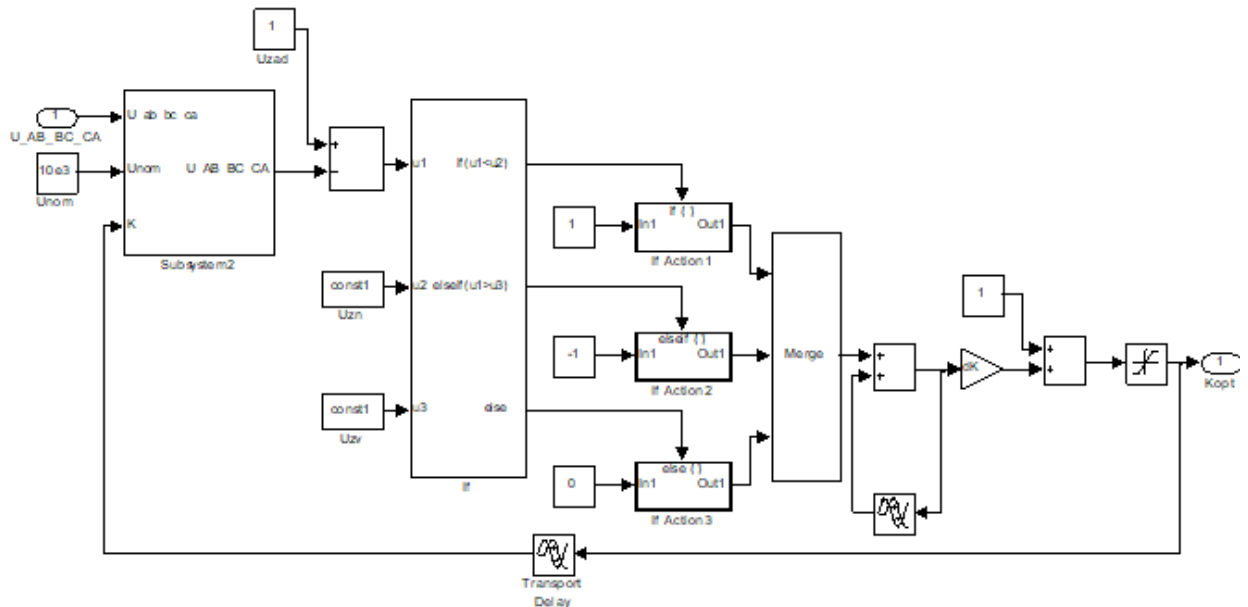


Рисунок 3.20 - Моделювання блоку «Регулятор РПН» базової системи управління.

Процес комп'ютерного моделювання роботи системи управління пристроєм РПН включає наступні етапи. Для кожного окремого значення вимірних параметрів режиму виконувалися розрахунки векторів керування та параметрів режиму на стороні низької напруги силового трансформатора, які встановлюються після регулювання, у двох випадках:

- при використанні базової моделі блоку прийняття управляючого рішення в САУ пристроєм РПН;
- при застосуванні розробленої в рамках дослідження моделі блоку прийняття управляючого рішення.

Створені комп'ютерні моделі забезпечують наявність можливості обчислення і збереження значень показників якості електроенергії. Це

дозволило виконати їх статистичний аналіз та відобразити результати у вигляді графіків.

Як зазначалося у першому розділі, для оцінки математичного ефекту від застосування розв'язків задач керування (2.11), (2.12), (2.13) необхідно провести статистичну обробку значень показників якості електроенергії, отриманих у процесі моделювання. Для виконання моделювання було використано масив даних, зібраний протягом доби.

3.6. Результати моделювання системи управління пристроєм РПН трансформатора зі з'єднанням обмоток «зірка/трикутник».

Для оцінки результативності застосування розв'язку завдання керування (2.12) виконано моделювання роботи розробленої САУ та базової системи. Отримані дані піддалися математичному статистичному аналізу, який включав обчислення математичного очікування, середньоквадратичного відхилення (СКВ), а також інтегральної ймовірності того, що значення показників якості електроенергії (ПЯЕ) залишатимуться в межах норм, визначених як нормально допустимі.

Імовірність знаходження значень ПЯЕ у таких межах обчислюється за формулою:

$$P(x \leq x_{\text{н.д.}}) = \frac{n_{\text{н.д.}}}{n_{\Sigma}}, \quad (3.6)$$

де P – величина інтегральної ймовірності потрапляння; x – значення показників якості; $x_{\text{н.д.}}$ – нормально припустиме значення ПЯЕ; $n_{\text{н.д.}}$ – число спостережень, що потрапляють в нормально припустимі межі; n_{Σ} – загальне число спостережень.

Результати моделювання роботи системи управління пристроєм РПН для різних варіантів показані на рис. 3.21 – 3.26.

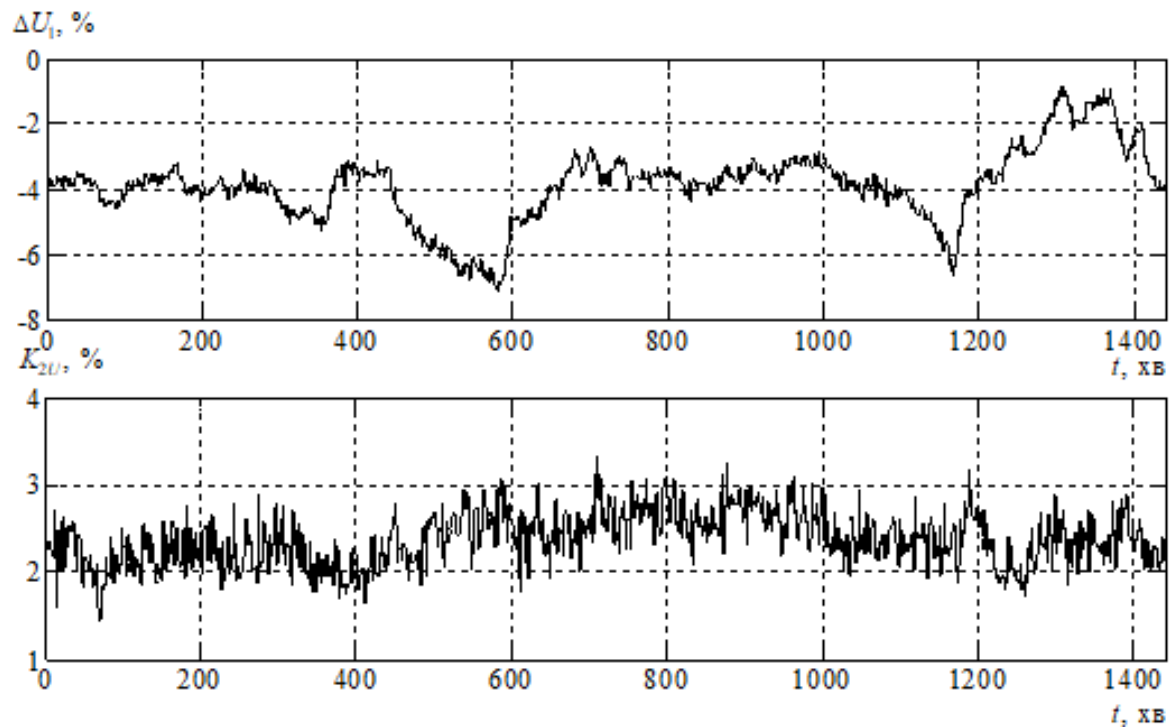


Рисунок 3.21 - Графіки варіювання ΔU_1 та K_{2U} на боці високої напруги трансформатора

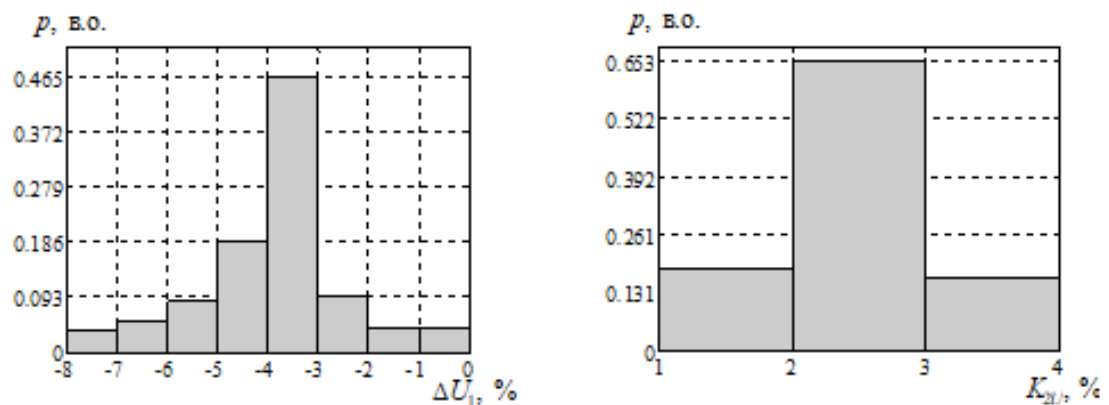


Рисунок 3.22 - Гістограми розподілу імовірностей ΔU_1 та K_{2U} на боці високої напруги трансформатора

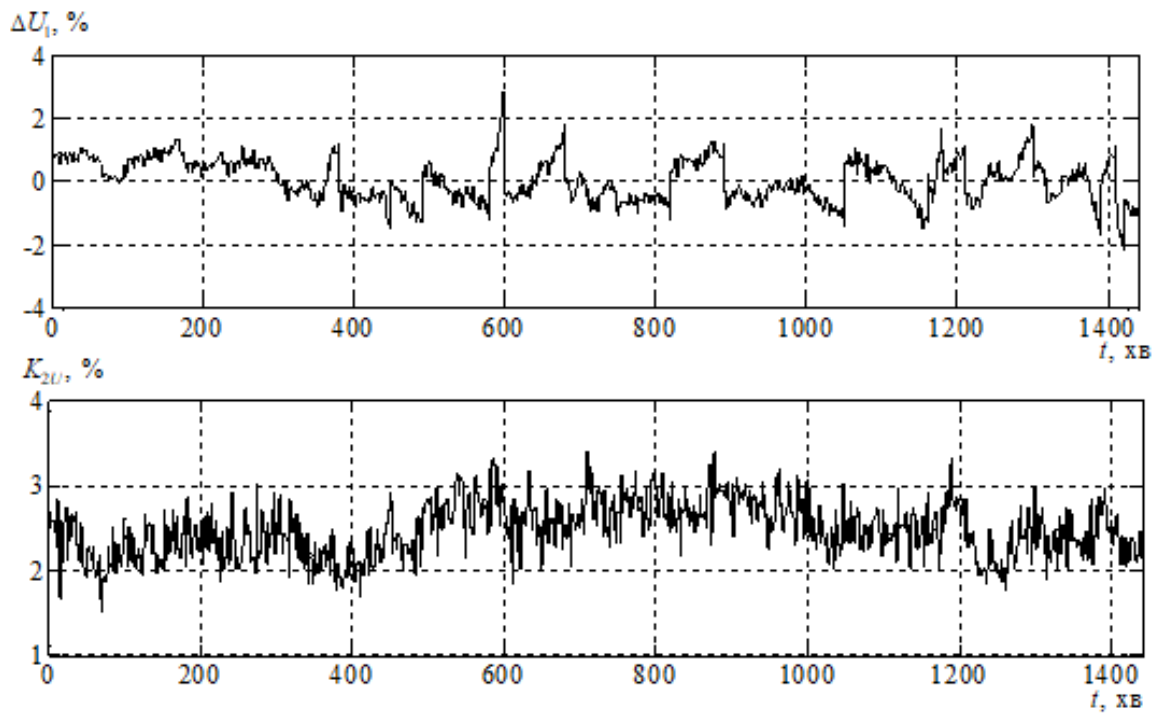


Рисунок 3.23 - Графіки варіювання ΔU_1 та K_{2U} на боці низької напруги трансформатора (базова система управління)

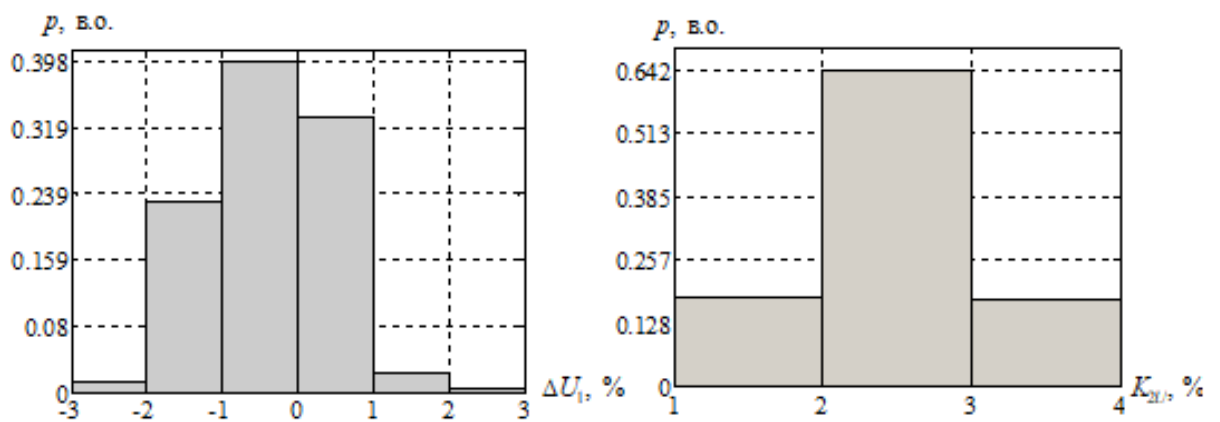


Рисунок 3.24 -. Гістограми розподілу імовірностей ΔU_1 та K_{2U} на боці низької напруги трансформатора (базова система управління)

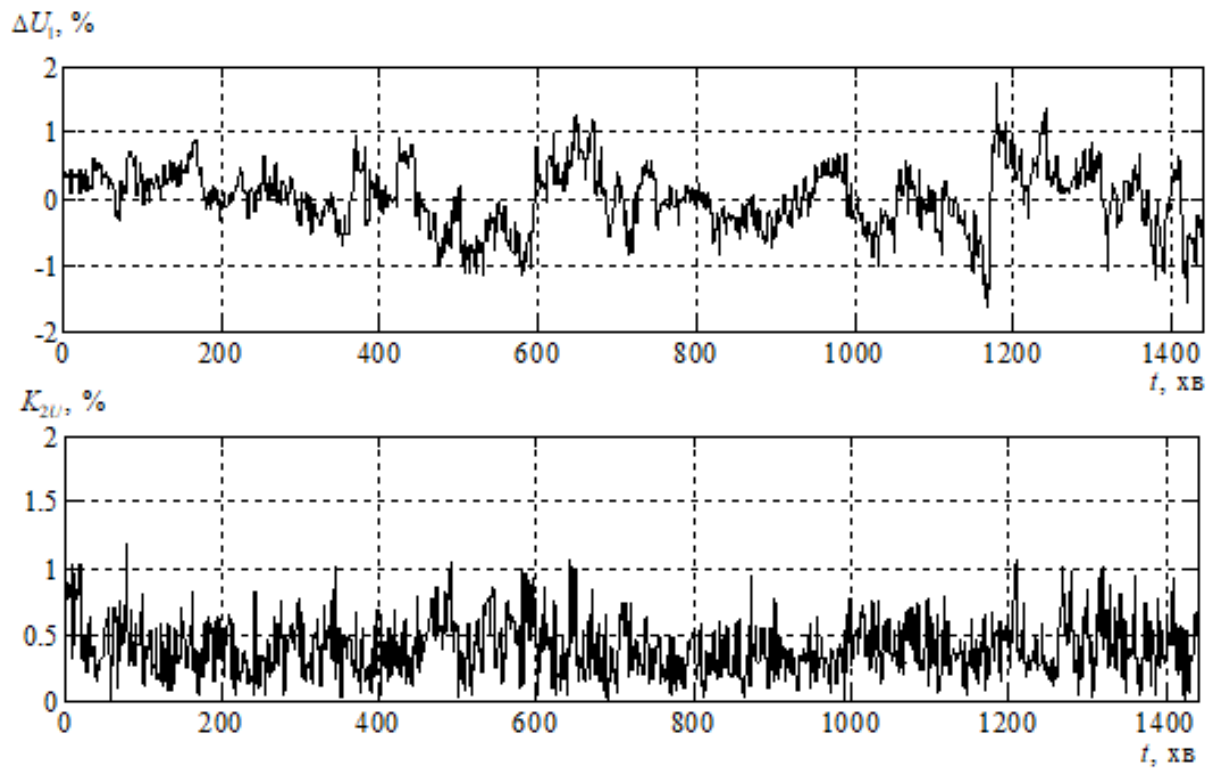


Рисунок 3.25 - Графіки варіювання ΔU_1 та K_{2U} на юоці низької напруги трансформатора (розроблена система управління)

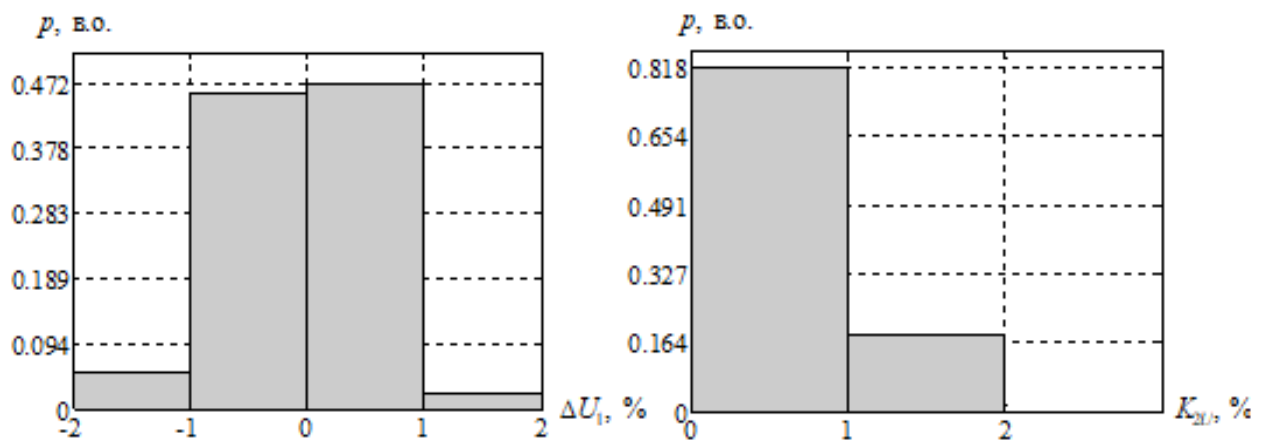


Рисунок 3.26 - Гістограми розподілу імовірностей ΔU_1 та K_{2U} на боці низької напруги трансформатора (розроблена система управління)

Таблиця 3.1. Результати статистичної обробки показників якості

№ з/п	Показник якості	Число попадань допуст. межі	Число не попадань в допуст. межі	Інтегральна ймовірність, $P(x \leq x_{н.д.})$, в.о.
Сторона високої напруги трансформатора				
1.	ΔU_1	1254	188	0,88
2.	K_{2U}	162	1277	0,12
Сторона низької напруги трансформатора (базова модель)				
3.	ΔU_1	1441	0	1,0
3.	K_{2U}	162	1278	0,12
Сторона низької напруги трансформатора (розроблена модель)				
5.	ΔU_1	1441	0	1,0
6.	K_{2U}	1441	0	1,0

Результати моделювання та подальшого статистичного аналізу показали, що вихідний режим (напруга на стороні високої напруги силового трансформатора) характеризується значними відхиленнями параметрів якості електроенергії (ПЯЕ) від гранично допустимих значень, встановлених ГОСТ 13109-97, як за показником ΔU_1 ($P(\Delta U_1 \leq 5\%) = 0,87$), так і за показником K_{2U} ($P(K_{2U} \leq 2\%) = 0,11\%$). При використанні базової моделі системи автоматичного управління (САУ) для пристрою РПН спостерігається зниження лише рівня ΔU_1 на стороні низької напруги ($P(\Delta U_1 \leq 5\%) = 1$), тоді як рівень K_{2U} не змінюється ($P(K_{2U} \leq 2\%) = 0,11\%$).

У свою чергу, моделювання запропонованої в роботі САУ продемонструвало, що її впровадження забезпечує одночасне зменшення

рівнів обох показників ΔU_1 ($P(\Delta U_1 \leq 5\%) = 1$) і K_{2U} ($P(K_{2U} \leq 2\%) = 1\%$) на стороні низької напруги силового трансформатора. Додатково, результати техніко-економічного аналізу підтверджують вищу ефективність запропонованої САУ у порівнянні з базовим варіантом, що робить її застосування доцільним для покращення якості енергопостачання.

Оскільки безконтактний пристрій РПН являється дискретним регулятором із значним кроком дискретизації, це створює обмеження на точність встановлення оптимального значення вектора керування. Така особливість впливає на кращу точність функціонування системи автоматичного управління (САУ).

Тому для оцінки впливу дискретності регулятора необхідно виконати порівняльний аналіз роботи САУ в умовах безперервного та дискретного керування. З цією метою доцільно використати імітаційні моделі. Результати моделювання для обох варіантів роботи САУ, а також їхня статистична обробка, представлені на рисунках та у таблиці. Ці дані дозволяють об'єктивно оцінити ефективність і точність роботи системи за умов реального дискретного регулювання.

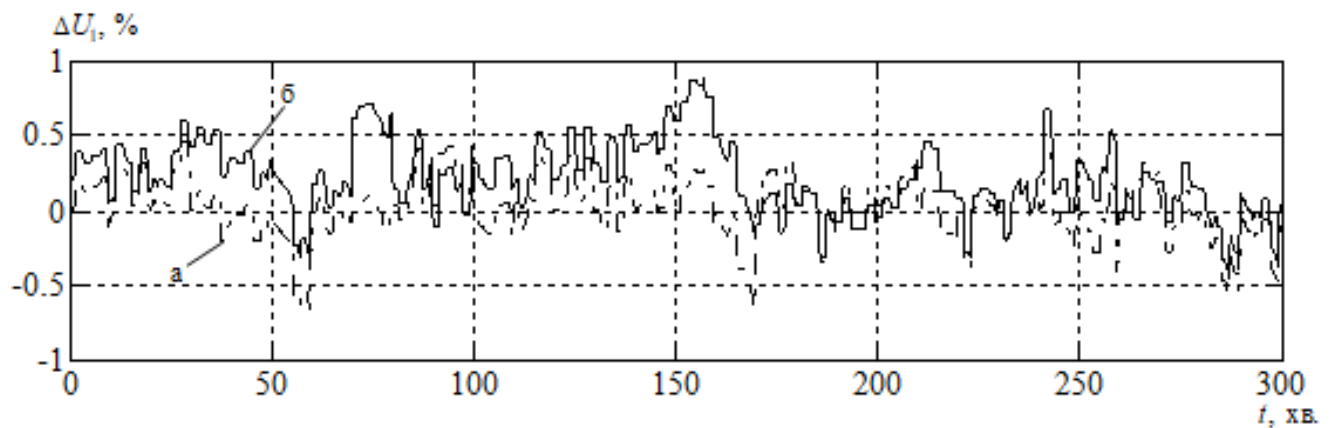


Рисунок 3.27 - Графіки зміни ΔU_1 з врахуванням та без врахування дискретності РПН

а) без врахування дискретності РПН; б) з врахуванням дискретності РПН

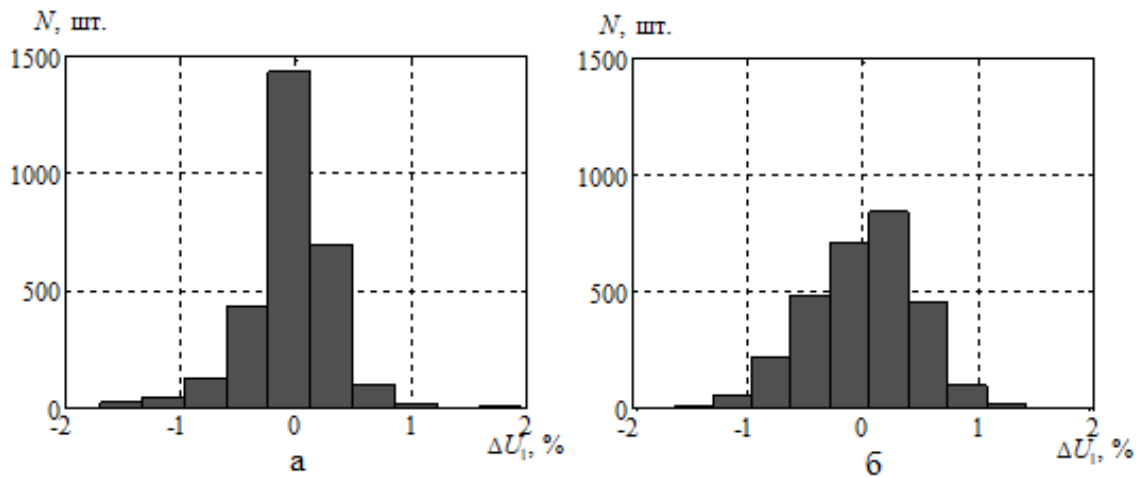


Рисунок 3.28 - Гістограми розподілу імовірностей ΔU_1

а) без врахування дискретності РПН; б) з врахуванням дискретності РПН

Таблиця 3.2. Результати статистичної обробки показників якості з врахуванням і без врахування дискретності РПН

№ з/п	Показники	Без врахування дискретності РПН			З врахуванням дискретності РПН		
		Математичне очікув., $M, \%$	СКВ, $\sigma, \%$	Інтегральна імовірність, $P(x \leq x_{н.д.}),$ в.о.	Математичне очікув., $M, \%$	СКВ, $\sigma, \%$	Інтегральна імовірність, $P(x \leq x_{н.д.}),$ в.о.
1.	ΔU_1	-0,033	0,374	1,0	0,203	0,466	1,0
2.	K_{2U}	0,349	0,208	1,0	0,402	0,239	1,0

Згідно з результатами статистичної обробки параметрів якості електроенергії, наведеної в таблиці 3.2, моделювання, яке враховує дискретність пристрою РПН, демонструє збільшення абсолютних значень математичного очікування та середньоквадратичного відхилення для обох параметрів якості у порівнянні з варіантом без врахування дискретності.

Однак таке збільшення не має істотного впливу на загальну точність регулювання.

Це підтверджується значеннями інтегральних імовірностей показників якості, які для випадку дискретної моделі САУ залишаються в межах, визначених стандартом, зазначеним у джерелі [1]. Отже, врахування дискретного характеру пристрою РПН не призводить до порушення встановлених вимог до параметрів якості електроенергії, забезпечуючи прийнятний рівень роботи системи автоматичного управління.

3.7. Результати комп'ютерного моделювання системи управління пристроєм РПН трансформатора зі схемою з'єднання обмоток «трикутник/зірка з нулем».

Для визначення ефекту від застосування розв'язку задачі керування (2.12) було проведено моделювання роботи розробленої (рис. 3.12) та базової (рис. 3.29) САУ. Результати моделювання та статистичної обробки ПЯЕ для обох варіантів показані на рис. 3.29 – 3.34 та у табл. 3.3.

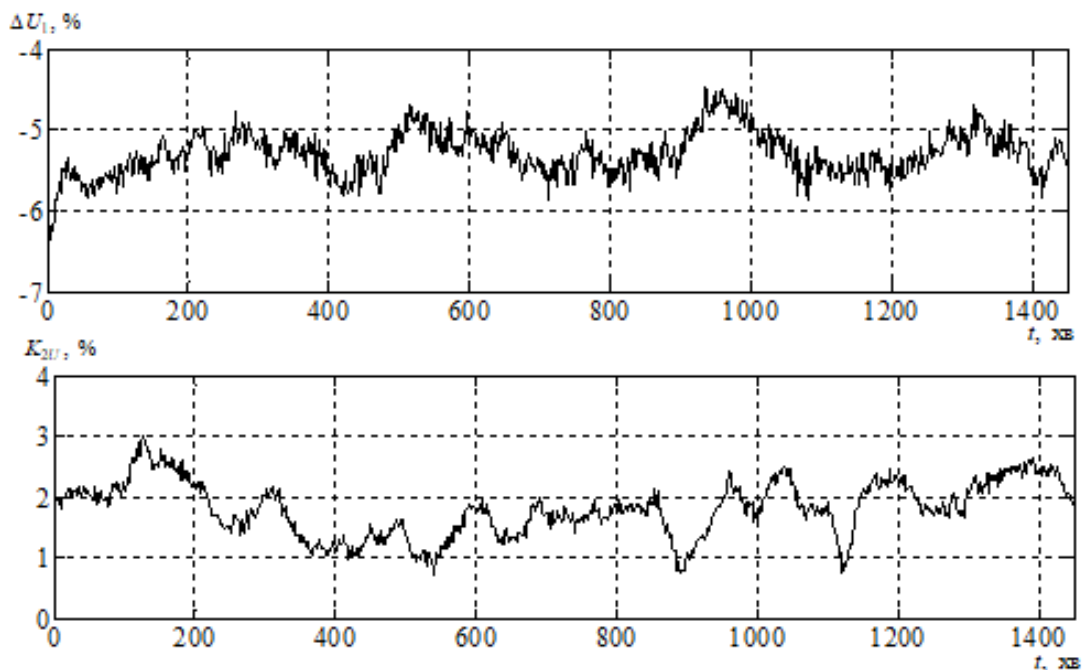


Рисунок 3.29 - Графік зміни ΔU_1 та K_{2U} зі сторони високої напруги трансформатора

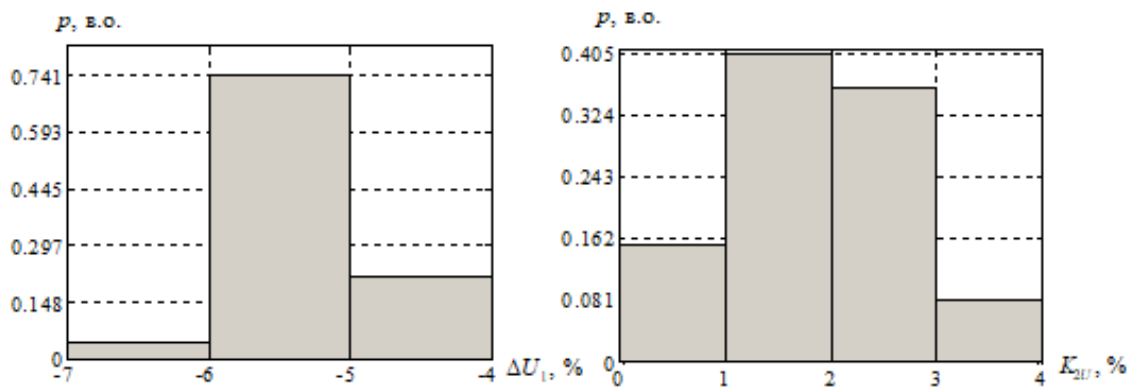


Рисунок 3.30 - Гістограми розподілу імовірностей ΔU_1 та K_2 зі сторони високої напруги трансформатора

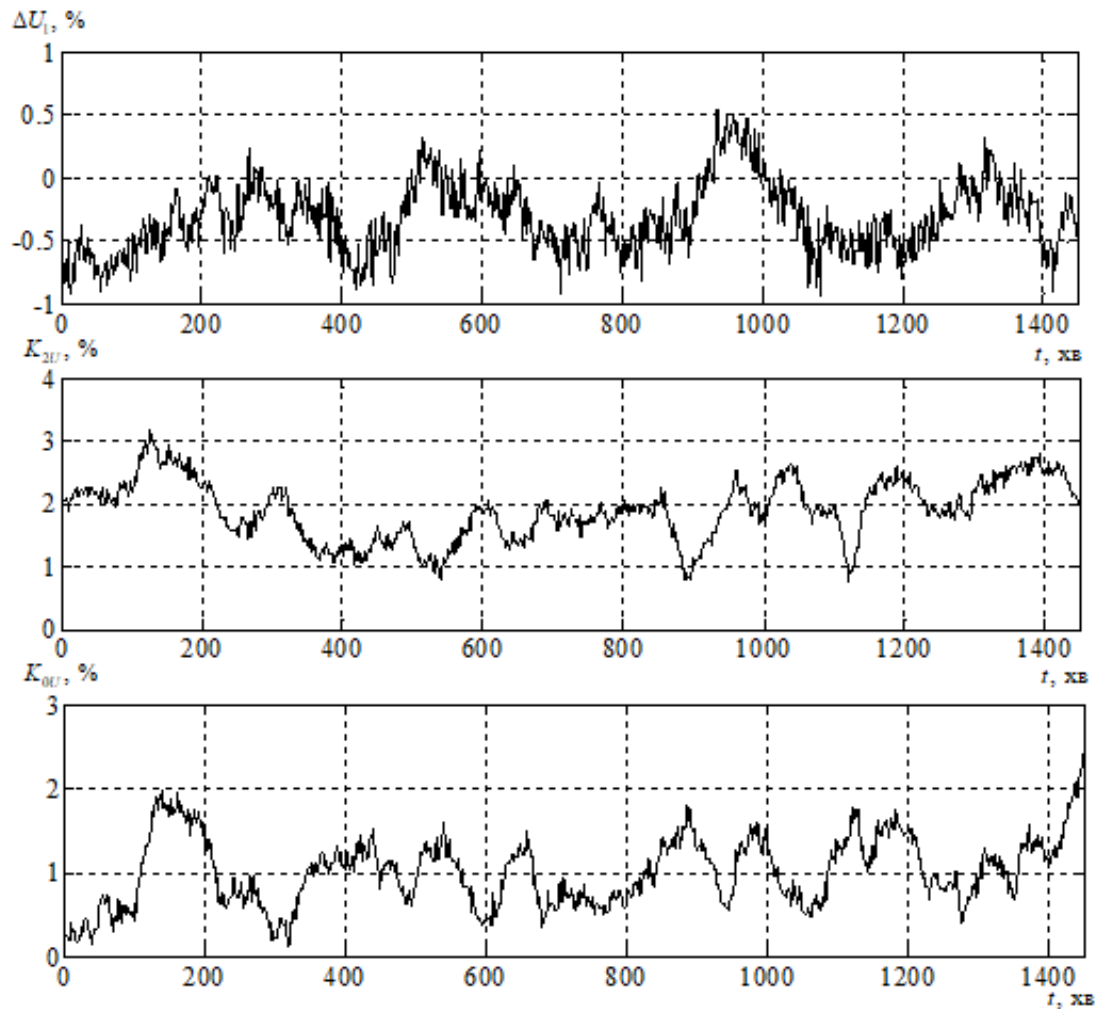


Рисунок 3.31 - Графіки зміни ΔU_1 , K_{2U} та K_{0U} зі сторони низької напруги трансформатора (базова систма управління)

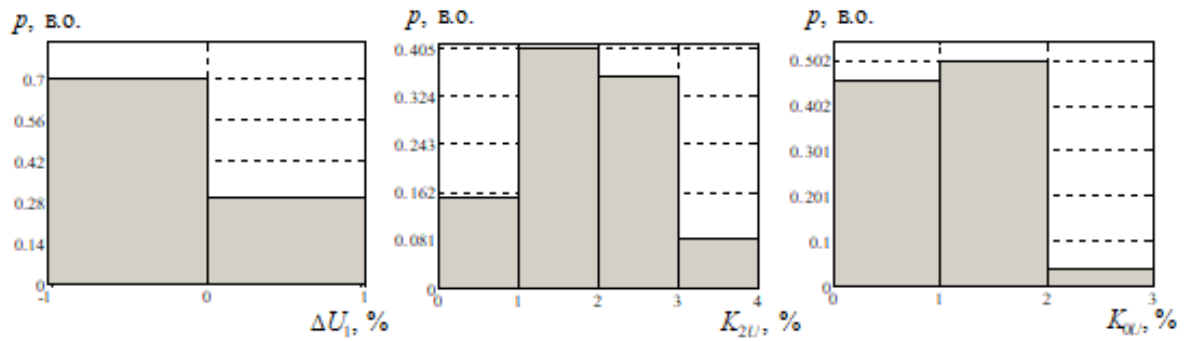


Рисунок 3.32 - Гістограми розподілу імовірностей ΔU_1 , K_2 та K_0 зі сторони низької напруги трансформатора (базова систма управління)

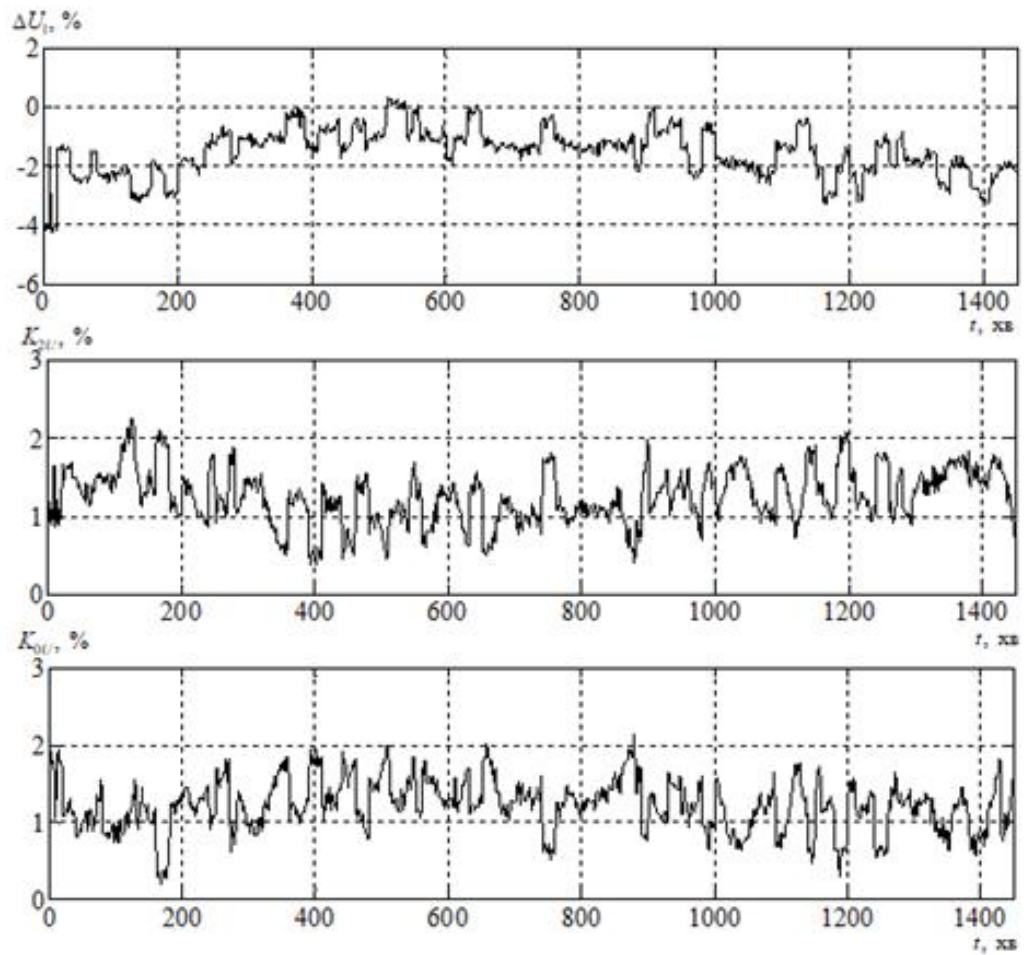


Рисунок 3.33 - Графіки зміни ΔU_1 , K_{2U} та K_{0U} зі сторони НН силового трансформатора (розроблена САУ)

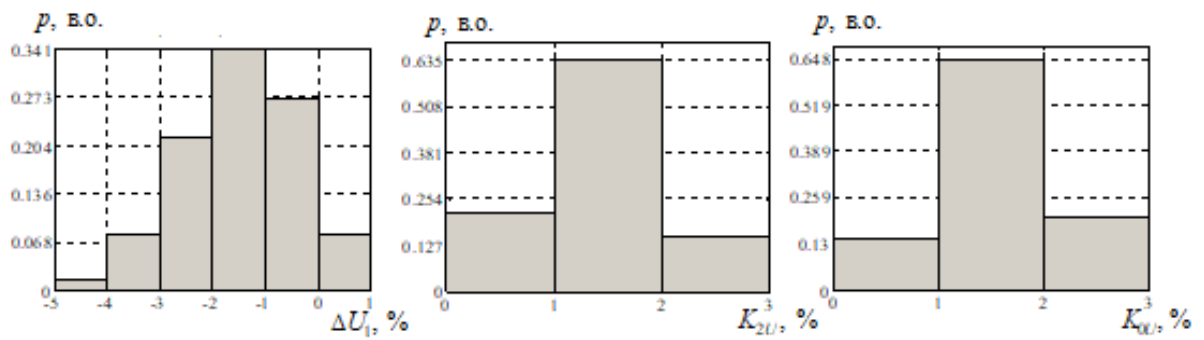


Рисунок 3.34 - Гістограми розподілу імовірностей ΔU_1 , K_{2U} та K_{0U} зі сторони НН силового трансформатора (розроблена САУ)

Таблиця 3.3. Результати статистичної обробки показників якості для варіантів

№ з/п	показники	Число попадань в норм. допуст. межі	Число непопадань в норм. допуст. межі	Інтегральна імовірність, $P(x \leq x_{н.д.})$, в.о.
Сторона високої напруги трансформатора				
1.	ΔU_1	182	1258	0,14
2.	K_{2U}	948	492	0,67
Сторона низької напруги трансформатора (базова система управління)				
3.	ΔU_1	1441	0	1,0
3.	K_2	848	594	0,67
5.	K_{0U}	1418	24	0,99
6.	ΔU_a	1441	0	1,0
7.	ΔU_b	1441	0	1,0
8.	ΔU_c	1441	0	1,0
Сторона низької напруги трансформатора (розроблена система управління)				
9.	ΔU_1	1441	0	1
10.	K_{2U}	1414	28	0,98
11.	K_{0U}	1437	4,0	0,99
12.	ΔU_a	1441	0	1
13.	ΔU_b	1441	0	1
13.	ΔU_c	1441	0	1

На основі результатів моделювання та подальшого статистичного аналізу параметрів якості електроенергії (ПЯЕ) можна зазначити, що вихідний режим (напруга на стороні високої напруги силового трансформатора) демонструє значні відхилення від допустимих значень ПЯЕ, регламентованих стандартом ГОСТ 13109-97, як за параметром ΔU_1 ($P(\Delta U_1 \leq 5\%) = 0,13$), так і за K_{2U} ($P(K_{2U} \leq 2\%) = 0,66$). Використання базової моделі дозволяє зменшити лише рівень ΔU_1 на стороні низької напруги ($P(\Delta U_1 \leq 5\%) = 1$), однак інші параметри залишаються поза межами нормованих значень ($P(K_{2U} \leq 2\%) = 0,66$).

Застосування запропонованої в дослідженні моделі системи автоматичного управління (САУ) дає змогу одночасно знизити рівні ΔU_1 ($P(\Delta U_1 \leq 5\%) = 0,13$) та K_{2U} ($P(K_{2U} \leq 2\%) = 1$) на стороні НН силового трансформатора. Значення фазних напруг ΔU_a , ΔU_b , ΔU_c при використанні як базової, так і нової моделі не виходять за рамки допустимих. Додатково, впровадження запропонованої САУ сприяє покращенню показника K_{0U} у порівнянні з базовим варіантом.

Отже, результати підтверджують, що запропонована САУ є ефективнішою за базову модель.

У таблиці 3.3 представлені результати статистичного аналізу параметрів якості електроенергії (ПЯЕ) для випадків моделювання роботи систем автоматичного управління (САУ) у неперервному та дискретному режимах.

Таблиця 3.3. Результати статистичного аналізу параметрів якості електроенергії, з врахуванням та без врахування дискретності РПН

№ з/п	Показник	Без врахування дискретності РПН			З врахуванням дискретності РПН		
		Математичне очікув., M , %	СКВ, σ , %	Інтегральна імовірність, $P(x \leq x_{н.д.})$, в.о.	Математичне очікув., M , %	СКВ, σ , %	Інтегральна імовірність, $P(x \leq x_{н.д.})$, в.о.
1.	ΔU_1	-1,478	0,634	1,0	-1,493	0,866	1,0
2.	K_{2U}	1,251	0,268	0,998	1,294	0,395	0,981
3.	K_{0U}	1,131	0,251	1,0	1,225	0,376	0,991
3.	ΔU_a	-1,673	1,169	1,0	-1,711	1,246	1,0
5.	ΔU_b	-1,199	0,583	1,0	-1,198	1,264	1,0
6.	ΔU_c	-1,486	0,644	1,0	-1,542	1,252	1,0

Аналіз статистичних даних ПЯЕ (табл. 3.4) показує, що для моделювання з урахуванням дискретної роботи пристрою РПН спостерігається збільшення абсолютних значень математичного очікування та середньоквадратичного відхилення всіх параметрів у порівнянні з моделлю, яка не враховує дискретність регулятора. Водночас це збільшення не має істотного впливу на якість регулювання, що підтверджується інтегральними ймовірностями ПЯЕ. У випадку моделювання з урахуванням дискретності пристрою РПН ці значення залишаються в межах, визначених нормативними документами.

3.8. Результати комп'ютерного моделювання роботи САУ пристроєм РПН трансформатора зі з'єднанням обмоток «трикутник/зизгаг з нулем».

Для оцінки ефективності застосування запропонованого підходу до розв'язання задач керування було виконано моделювання роботи як розробленої САУ, так і базової. Під час моделювання використовувалися дані вихідного режиму.

Результати моделювання, а також статистичної обробки параметрів якості електроенергії (ПЯЕ), представлені на рисунках 3.35–3.36 та у таблиці 3.5. Вони дозволяють порівняти ефективність базового та розробленого варіантів системи управління, оцінюючи їх вплив на точність і якість регулювання напруги в розподільчих електромережах.

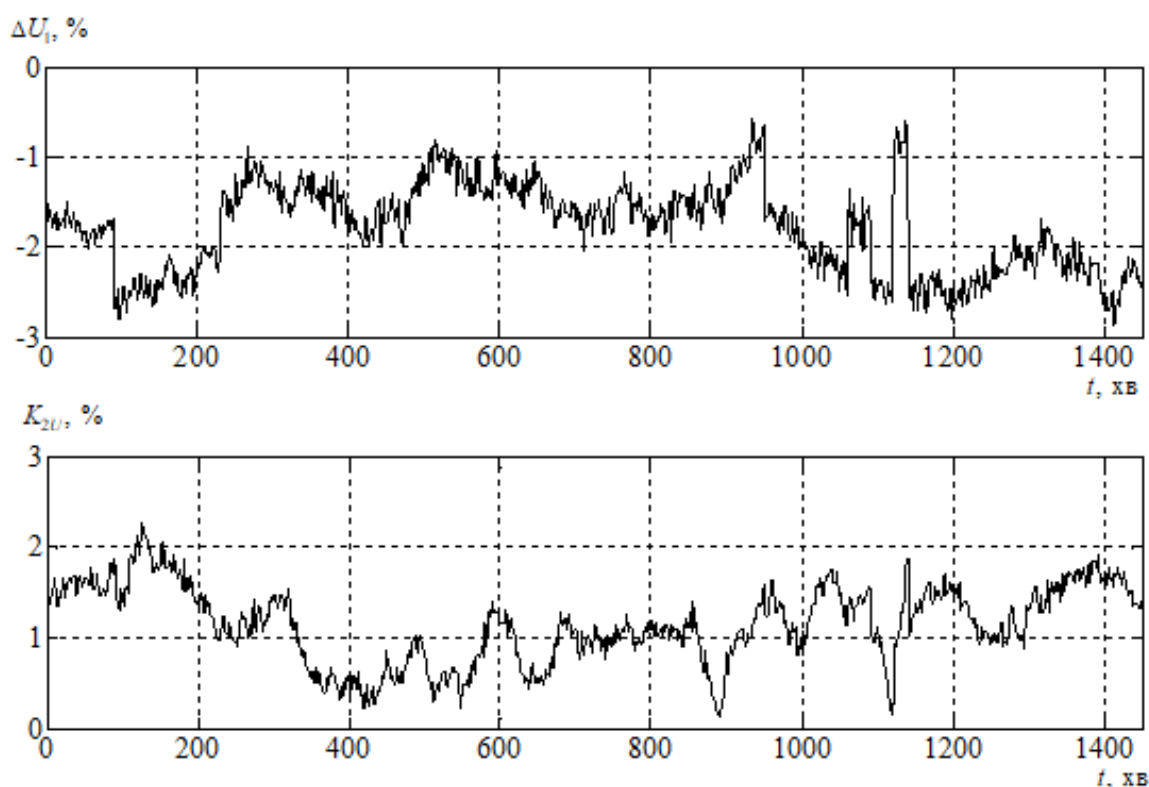


Рисунок 3.35 - Графіки варіювання ΔU_1 та K_{2U} на стороні низької напруги трансформатора (розроблена система управління)

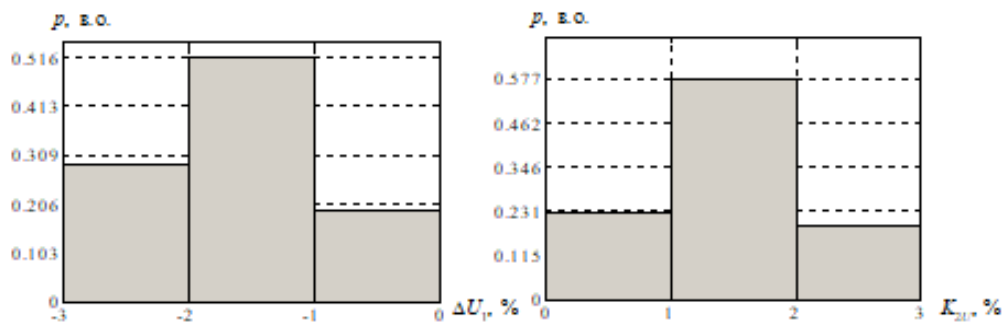


Рисунок 3.36 - Гістограми розподілу імовірностей ΔU_1 та K_{2U} на стороні низької напруги трансформатора (розроблена система управління)

Таблиця 3.5. Статистичні показники якості електричної енергії для оптимального і класичного регулювання

№ з/п	Показник якості	Число попадань в норм. допуст. межі	Число не попадань в норм. допуст. межі	Інтегральна імовірність, $P(x \leq x_{н.д.})$, в.о.
Сторона низької напруги трансформатора (розроблена модель)				
1.	ΔU_1	1441	0	1,0
2.	K_{2U}	1414	27,0	0,99
3.	ΔU_a	1441	0	1,0
3.	ΔU_b	1441	0	1,0
5.	ΔU_c	1441	0	1,0

Результати моделювання та статистичної обробки параметрів якості електроенергії показали, що застосування базової моделі САУ забезпечує зниження лише рівня ΔU_1 на стороні низької напруги ($P(\Delta U_1 \leq 5\%) = 1$), тоді як рівні K_{2U} на тій самій стороні залишаються значно вищими за гранично допустимі значення ($P(K_{2U} \leq 2\%) = 0,66$).

Натомість використання запропонованої в роботі моделі САУ забезпечує одночасне зменшення рівнів ΔU_1 ($P(\Delta U_1 \leq 5\%) = 1$) і K_{2U} ($P(K_{2U} \leq 2\%) = 0,98$), що свідчить про її кращу ефективність у регулюванні

напруги. При цьому параметри ΔU_a , ΔU_b , ΔU_c перехідні для обох варіантів моделювання залишаються в межах нормально допустимих значень, визначених стандартами.

Таким чином, запропонована модель САУ демонструє значно вищу ефективність у порівнянні з базовою. Детальні результати статистичної обробки ПЯЕ для випадків роботи неперервної та дискретної САУ представлені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6. Результати статистичної обробки показників якості з врахуванням та без врахування дискретності РПН

№ з/п	Показник	Без врахування дискретності РПН			З врахуванням дискретності РПН		
		Математичне очікув., M , %	СКВ, σ , %	Інтегральна імовірність, $P(x \leq x_{н.д.})$, в.о.	Математичне очікув., M , %	СКВ, σ , %	Інтегральна імовірність, $P(x \leq x_{н.д.})$, в.о.
1.	ΔU_1	-1,786	0,476	1,0	-1,818	0,514	1,0
2.	K_{2U}	1,113	0,368	0,996	1,533	0,432	0,981
3.	ΔU_a	-2,413	0,568	1,0	-2,473	0,659	1,0
3.	ΔU_b	-0,717	0,343	1,0	-0,769	0,542	1,0
5.	ΔU_c	-2,207	0,776	1,0	-2,216	0,778	1,0

Результати статистичної обробки параметрів якості електроенергії (ПЯЕ), представлені в таблиці 3.6, показують, що, аналогічно до попередніх випадків, збільшення абсолютних значень математичного очікування M та середньоквадратичного відхилення σ для всіх ПЯЕ при моделюванні з урахуванням дискретності пристрою РПН не має істотного впливу на загальну якість регулювання.

Це свідчить про те, що навіть за умов дискретності регулятора система автоматичного управління забезпечує відповідність параметрів якості

електроенергії встановленим нормам, зберігаючи ефективність регулювання на належному рівні.

На основі знайдених розв'язків задач управління розроблено структурні схеми систем автоматичного управління (САУ) та алгоритми для обчислення вектора керування. Вони дозволяють створювати комп'ютерні імітаційні моделі, що забезпечують аналіз роботи запропонованих САУ з безконтактними пристроями РПН силових трансформаторів для різних схем з'єднання обмоток: «зірка/трикутник», з'єднання «трикутник/зірка з нулем», з'єднання «трикутник/зигзаг з нулем».

Дослідження перехідних процесів у запропонованих САУ з безконтактними пристроями РПН, проведене на розроблених комп'ютерних моделях, показало, що для всіх випадків моделювання перехідні процеси є затухаючими незалежно від їхньої природи (аперіодична або коливальна). Це дозволяє зробити висновок про стійкість запропонованих САУ.

Аналіз ефективності застосування розв'язків задач керування показав, що використання запропонованої САУ підвищує кількість потраплянь значень K_{2U} у межі норми. Для схеми з'єднання обмоток «зірка/трикутник» цей показник зріс на 89% у порівнянні з базовою САУ, а для схем «трикутник/зірка з нулем» та «трикутник/зигзаг з нулем» – на 32%. При цьому значення інтегральних імовірностей ΔU_{ϕ} (для схем «трикутник/зірка з нулем» і «трикутник/зигзаг з нулем») та K_{0U} (для схеми «трикутник/зірка з нулем») повністю відповідають вимогам ДЕСТ 13109-97.

Проведений аналіз роботи САУ з безконтактними пристроями РПН з врахуванням та без врахування дискретності показав, що збільшення математичного очікування та середньоквадратичного відхилення параметрів якості електроенергії при наявності дискретності пристрою не призводить до перевищення допустимих норм інтегральних імовірностей сталого відхилення та рівнів несиметрії напруг.

4 АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ПРИСТРОЄМ РПН СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

4.1. Практична реалізація системи управління пристроєм РПН трансформатора.

На основі попередніх досліджень було визначено електричну структуру системи автоматичного управління (САУ) пристроєм регулювання підключення навантаження (РПН) силового трансформатора та розроблено алгоритм її функціонування, який придатний до практичного впровадження. Практичну реалізацію систему управління пристроєм РПН виконано для трансформатора з типовою схемою з'єднання обмоток «трикутник/зірка з нулем», яка є найбільш поширеною в розподільчих електричних мережах.

Для апаратної реалізації системи було обрано мікроконтролер Atmega162 та мікросхему ADE7758, призначену для високоточних вимірювань параметрів трифазної електромережі.

Atmega162 — це економічний 8-розрядний мікроконтролер з архітектурою AVR RISC, що забезпечує виконання до 1 мільйона операцій за секунду на кожен мегагерц частоти синхронізації. Така продуктивність досягається завдяки виконанню більшості інструкцій за один машинний цикл, що також дозволяє оптимізувати енергоспоживання. Основні характеристики Atmega162 наступні:

- 16 КБ внутрішньосхемної флеш-пам'яті з можливістю зчитування під час запису;
- 512 байт енергонезалежної пам'яті даних;
- 1 КБ статичної оперативної пам'яті (ОЗП);
- зовнішній інтерфейс пам'яті;
- 35 ліній вводу-виводу;

- 32 універсальні робочі регістри;
- інтерфейс SPI;
- два універсальні синхронно-асинхронні прийомопередавачі (УСАПП)

Ці технічні параметри дозволяють використовувати Atmega162 для реалізації алгоритму автоматичного управління пристроєм РПН силового трансформатора, забезпечуючи його ефективну та стабільну роботу.

Для визначення діючих значень фазних і міжфазних напруг застосовано мікросхему ADE7758, яка спеціалізується на точних вимірюваннях у трифазних електричних мережах. Цей компонент включає високоточні аналого-цифрові перетворювачі, цифровий інтегратор та інтерфейс SPI для передачі даних. Вона також забезпечує обчислення активної, реактивної та повної енергії, а також розрахунок струмів і напруг із точністю до 0,5 %.

Для відображення інформації використовується рідкокристалічний дисплей WH1602B, який забезпечує зручне зчитування виміряних параметрів.

Фотографія прототипу цього блоку наведена на рис. 4.1.

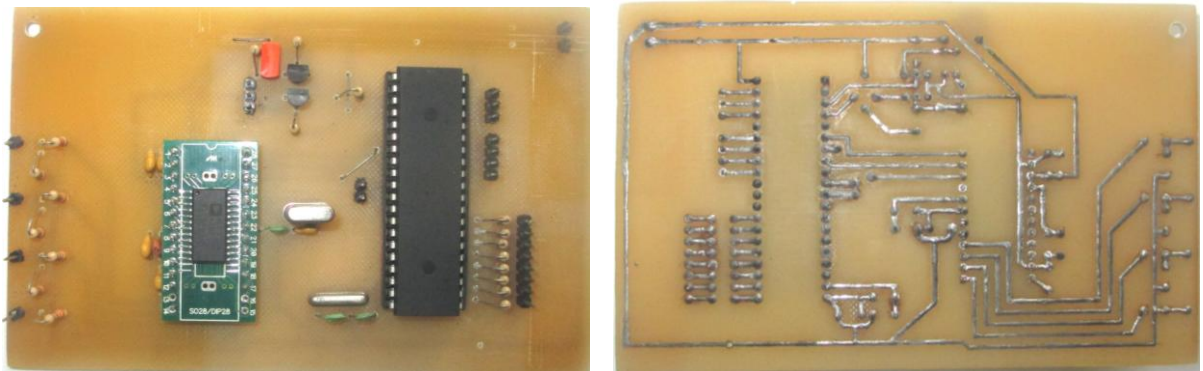


Рисунок 4.1 - Зовнішній вигляд макету блоку управління пристроєм РПН

Алгоритм роботи програмного забезпечення для системи управління реалізовано мовою C із використанням середовища розробки

CodeVisionAVR, яке призначене для програмування однокристальних мікроконтролерів. Програма охоплює лише функціонал блоку регулятора.

Вхідні параметри надходять до мікроконтролера з мікросхеми ADE7758 через послідовний інтерфейс SPI. На основі отриманих даних здійснюється обчислення керуючих впливів відповідно до розробленого алгоритму управління пристроєм РПН. Результати розрахунків передаються на персональний комп'ютер через інтерфейс RS-232.

4.2 Експериментальні дослідження системи автоматизації процесу управління пристроєм РПН силового трансформатора.

Метою проведення експериментальних досліджень функціонування створеної системи автоматичного управління є визначення її ефективності в умовах лабораторії, які максимально наближені до реальних, а також підтвердження її працездатності.

У даній схемі як силові ключі застосовуються симістори BT139. Для управління цими ключами застосовано мікроконтролер Atmega8. Обмін даними між мікроконтролером блоку управління та мікроконтролером безконтактного регулятора проводиться за допомогою пристрою синхронної асинхронної передачі даних (ПСАПД).

Для вимірювання параметрів якості електроенергії ($\Delta U_1, K_{2U}, K_{0U}, \Delta U_a, \Delta U_b, \Delta U_c$) первинної обмотки трансформатора застосовувався аналізатор мережевих параметрів DMK-32. Дані з цього аналізатору через інтерфейсний перетворювач RS-485/RS-232 передавалися на комп'ютер для подальшої статистичної обробки. Вимірювання параметрів вторинної обмотки виконувалося за допомогою блоку управління регулятором напруги (РПН), який передавав всі значення фазних і міжфазних напруг, положення відпайок РПН для кожної окремої фази, а також параметри якості електроенергії на комп'ютер через інтерфейс RS-232.

Зображення лабораторного стенда для досліджень системи автоматичного управління регулятором напруги силового трансформатора наведено на рисунку 4.2.



Рисунок 4.2 - Лабораторний стенд для експериментального дослідження системи управління пристроєм РПН трансформатора

4.3. Результати експериментальних досліджень системи управління пристроєм РПН трансформатора.

Результати проведених експериментальних досліджень створеної системи автоматичного управління (САУ) представлені на рисунках 4.3–4.4. На цих рисунках: а, б – експериментальні графіки, що демонструють зміни параметрів на високовольтній та низьковольтній сторонах трансформатора відповідно.

У таблиці 4.1 подано результати статистичного аналізу отриманих експериментальних даних.

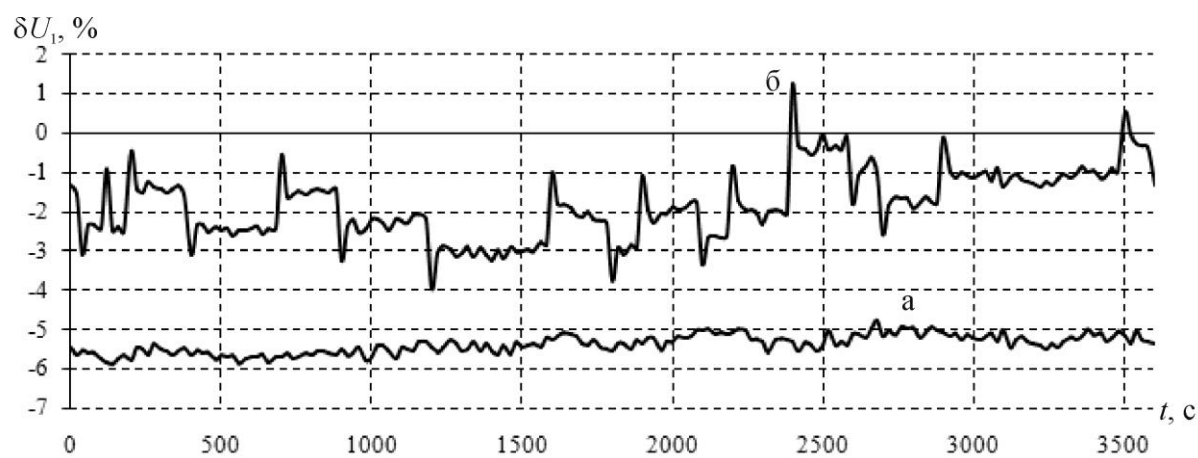


Рисунок 4.3 - Експериментальні графіки, що демонструють зміни усталеного відхилення напруги

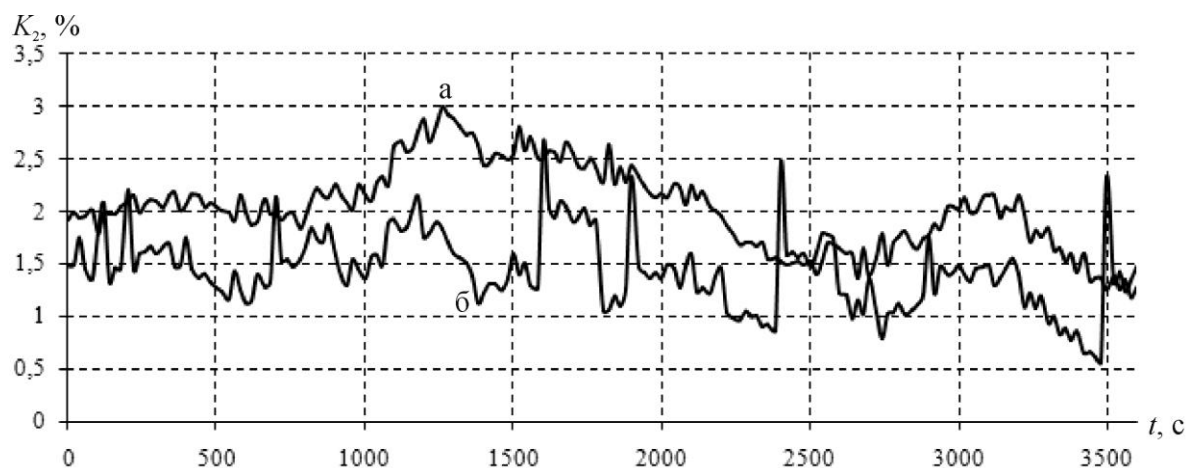


Рисунок 4.4 - Експериментальні графіки, що демонструють зміни коефіцієнту несиметрії напруг по зворотній послідовності

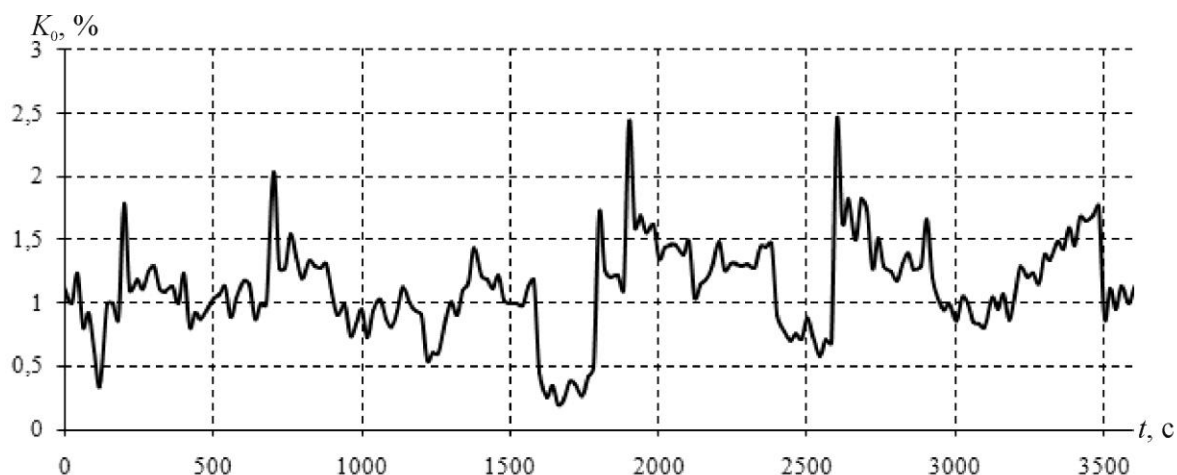


Рисунок 4.5 - Експериментальні графіки, що демонструють зміни коефіцієнту несиметрії напруг по нульовій послідовності

Таблиця 4.1. Результати статистичного аналізу отриманих експериментальних даних

№ з/п	Показник якості	Число попадань в норм. допуст. межі	Число непопадань в норм. допуст. межі	Інтегральна імовірність, $P(x \leq x_{н.д.})$, в.о.
Сторона первинної обмотки трансформатора				
1.	ΔU_1	78	102	0,46
2.	K_2	82	98	0,47
Сторона вторинної обмотки трансформатора (базова модель САУ)				
3.	ΔU_1	181	0	1
4.	K_2	176	5,0	0,98
4.	K_{0U}	177	4,0	0,99
6.	ΔU_a	181	0	1,0
7.	ΔU_b	177	4,0	0,99

8.	ΔU_c	179	2,0	0,99
----	--------------	-----	-----	------

Як свідчать результати експериментів та їх статистичної обробки, вихідний режим (напруга на первинній обмотці силового трансформатора) демонструє значні відхилення від допустимих меж параметрів якості електроенергії (ПЯЕ), визначених стандартом ДЕСТ 13109-97. Це стосується як параметра ΔU_1 ($P(\Delta U_1 \leq 5\%) = 0,44$), так і K_{2U} ($P(K_{2U} \leq 2\%) = 0,45$).

Водночас, дослідження запропонованої моделі САУ показали, що її використання забезпечує одночасне зменшення рівнів ΔU_1 ($P(\Delta U_1 \leq 5\%) = 1$) та K_{2U} ($P(K_{2U} \leq 2\%) = 0,97$) на вторинній обмотці трансформатора. Крім того, застосування розробленої системи автоматичного управління дозволяє досягти значень K_{0U} ($P(K_{0U} \leq 2\%) = 0,98$), які відповідають вимогам стандарту ДЕСТ 13109-97.

Розроблені у дослідженні структурні схеми та алгоритми функціонування САУ для безконтактного регулятора напруги (РПН) дали змогу створити принципову схему і прототип мікропроцесорної системи автоматичного керування безконтактним РПН силового трансформатора зі схемою з'єднання обмоток «трикутник/зірка з нулем». Це забезпечило можливість проведення експериментальних випробувань і підтвердження працездатності запропонованих рішень.

Аналіз експериментальних даних роботи САУ з безконтактним РПН для трансформатора зі схемою «трикутник/зірка з нулем» та подальша статистична обробка продемонстрували, що застосування цієї системи забезпечує значення інтегральних імовірностей ΔU_1 , K_{2U} та K_{0U} на низьковольтній стороні трансформатора, які відповідають вимогам ГОСТ 13109-97 до параметрів якості електроенергії. Це підтверджує правильність проведених теоретичних досліджень та ефективність запропонованої системи автоматичного керування з безконтактними РПН для силових трансформаторів.

5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРИСТРОЄМ РПН СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Для оцінки економічної ефективності використання розробленої системи автоматичного управління з безконтактним пристроєм РПН у порівнянні з базовою системою з механічним пристроєм РПН пропонується провести розрахунок економічних показників для двох варіантів: базового та нового. При цьому слід врахувати такі чинники:

1. Переоснащення існуючої системи:
 - Заміну механічного пристрою РПН на безконтактний.
 - Додаткове оснащення системи мікроконтролером для забезпечення автоматизації.
2. Витрати на переоснащення:
 - Роботи зі зняття застарілого обладнання.
 - Монтаж нових компонентів.
 - Проведення пусконаладжувальних робіт для введення системи в експлуатацію.
3. Витрати на обслуговування та експлуатацію:
 - Порівняння регулярних витрат на технічне обслуговування механічної та безконтактної систем.
 - Розрахунок економії або додаткових витрат у процесі експлуатації за рахунок зменшення потреби в ремонтах, підвищення енергоефективності та надійності нової системи.

Результати розрахунків дозволять оцінити термін окупності вкладених інвестицій, загальну економічну ефективність та доцільність впровадження запропонованої САУ з безконтактним пристроєм РПН.

Економічний ефект від використання запропонованої системи автоматичного управління з безконтактним пристроєм РПН для силового трансформатора визначається відповідно до методики, описаної в [30].

Річні експлуатаційні витрати включають витрати на технічне обслуговування та поточний і плановий ремонт, які охоплюють оплату праці ремонтного персоналу разом із відрахуваннями до соціальних фондів, а також витрати на ремонтні матеріали. Крім того, враховуються амортизаційні відрахування, що обчислюються за існуючими чинними нормами амортизації, та інші витрати, зведені у таблиці 5.4.

Завдяки менш складній конструкції нового пристрою РПН та значно більшому строку служби порівняно з базовою моделлю системи управління, амортизаційні відрахування для розробленої моделі є істотно нижчими, ніж для базової моделі. Результати моделювання показали, що рівень усталеного відхилення напруги на низьковольтній стороні трансформатора, як при використанні запропонованої САУ, так і базової системи, відповідає вимогам ДЕСТ 13109-97 для цього параметра якості електроенергії. Тому при оцінці економічних збитків, пов'язаних із неякісними показниками електроенергії, враховуються лише втрати, спричинені несиметрією напруги за зворотною послідовністю.

Таким чином, економічна ефективність впровадження нової САУ зумовлена зменшенням амортизаційних витрат та мінімізацією збитків через несиметрію напруги.

Для визначення економічних збитків, спричинених несиметрією напруги, використовується методика розрахунків, основні положення якої наведені в [30]. Згідно з цією методикою, розрахунок економічних втрат через несиметрію напруги за зворотною послідовністю проводиться на прикладі системи автоматичного управління (САУ) з пристроєм РПН силового трансформатора, що має схему з'єднання обмоток трансформатора

«зірка/трикутник» і функціонує в складі системи електропостачання. Принципова схема системи подана на рисунку 5.1.

Розрахунки виконуються для двох варіантів:

1. Для розробленої системи автоматичного управління з безконтактним пристроєм РПН.
2. Для базової системи автоматичного управління з механічним пристроєм РПН.

Це дозволяє порівняти економічну ефективність обох варіантів САУ з точки зору зменшення збитків від несиметрії напруги.

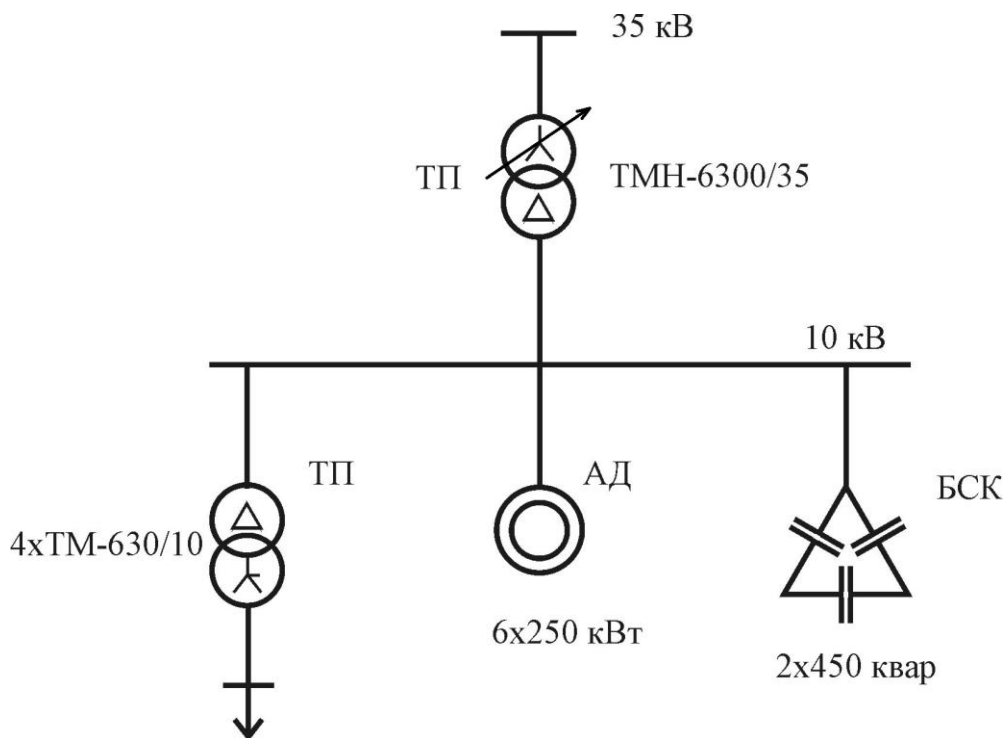


Рисунок 5.1 - Принципова схема системи електропостачання

Для виконання розрахунків економічних збитків від несиметрії напруг використовуються результати моделювання роботи САУ, представлені в попередніх розрахунках. Зокрема, використано значення математичного очікування коефіцієнтів несиметрії напруг за зворотною послідовністю: $K_{2U_{\text{баз}}} = 2,38 \%$, для базової САУ і $K_{2U_{\text{розр}}} = 0,4 \%$ для розробленої САУ.

Вихідні дані, необхідні для розрахунків, а також результати обчислень техніко-економічних збитків, спричинених несиметрією напруг для обох варіантів системи автоматичного управління, наведено у таблицях 5.1–5.3. Ці дані дають змогу оцінити переваги розробленої системи управління у зниженні економічних втрат.

Вихідні дані до розрахунку економічних збитків від несиметрії напруг

1. 2 трансформатора ТМН-6300/35/10 вартістю 100 тис.грн.
2. 4 трансформатора ТМ-630/10 вартістю 30 тис.грн.
3. 6 двигунів АД>100 кВт вартістю 3 тис.грн.
4. 2 батареї конденсаторів БСК-450 вартістю 3,5 тис.грн.

Таблиця 5.2. Розрахункові параметри для розрахунку економічних збитків від несиметрії напруг

№ з/П	Вид обладнання	P, кВт	K, тис. грн	З, тис. грн. /рік	k'	d'	I _{а.о.}	T
1	2хТМН-6300/35/10	5000	200,0	48,78	0,51	339	9,42	8760
2	4хТМ-630/10	2520	120,0	29,29	0,68	611	9,38	8760
3	6хАД >100 кВт	1500	18,0	4,699	2,176	435	11,12	1000
4	2хБСК	900	7,0	1,709	0,004	2,61	9,44	7000

Таблиця 5.3. Розрахунок економічних збитків.

№ з/п	Обладнання	ΔP , кВт	ΔW , кВт·год	$U_{\Delta P}$, тис. грн	$k_{сп}$	γ	U_T , тис. грн
Базова модель САУ, $K_{2U} = 2,38 \%$,							
1	2хТМН-6300/35/10	1,43	12406	15,48	0,18	1,22	2,58
2	4хТМ-630/10	0,97	8377	10,47	0,36	1,42	3,01
3	6хАД >100 кВт	1,86	1847	2,32	0,26	1,279	0,34
4	2хБСК-450	0,00163	10,72	0,0135	0,0016	1,0016	0,0007
	Всього			28,29			5,93
Розроблена модель САУ, $K_{2U} = 0,4 \%$.							
1	2хТМН-6300/35/10	0,05	350,38	0,45	0,011	1,009	0,08
2	4хТМ-630/10	0,028	236,61	0,31	0,012	1,01	0,08
3	6хАД >100 кВт	0,053	52,21	0,071	0,009	1,009	0,011
4	2хБСК-450	0,000044	0,3018	0,00039	0,00004	1,00004	0,00001
	Всього			0,80			0,17

Результати обчислення показників ефективності впровадження системи автоматичного управління з пристроєм РПН для силового трансформатора подано у таблиці 5.4. Ці показники відображають економічну доцільність використання розробленої системи та підтверджують її переваги в порівнянні з базовою моделлю.

Таблиця 5.4. Показники ефективності впровадження САУ
(результати розрахунку).

№ з/п	Показники	Одиниці виміру	Базовий варіант	Проектний варіант
1	2	3	4	5
1.	Капіталовкладення по варіантам:			
	- безконтактний пристрій	тис. грн.	-	65,0
	- блок управління	тис. грн.	-	1,21
	- монтажні роботи	тис. грн.	-	9,12
	Всього:	тис. грн.	-	100,33
2.	Обслуговування та ремонт	тис. грн./рік	1,82	0,31
3.	Збитки від зниження показників електроенергії	тис. грн./рік	34,2	0,96
4.	Приведені затрати	тис. грн./рік	36,0	12,2
5.	Очікуваний економічний ефект	тис. грн./рік	38,8	
6.	Термін окупності	рік	1,9	

Очікуваний розрахунковий економічний ефект від впровадження запропонованої системи автоматичного управління з безконтактним пристроєм РПН для підстанції, що має два силових трансформатори ТМН-6300/35, складає 38,8 тис. грн на рік. Термін окупності цієї системи становить 1,9 роки, що є меншим за нормативний термін окупності. Це свідчить про доцільність і економічну вигідність застосування розробленої САУ на підстанції.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ В ОБСЛУГОВУВАННІ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ УСТАНОВОК

6.1. Основи охорони праці в енергетиці.

Охорона праці являє собою комплекс правових, соціально-економічних, організаційних, технічних, санітарно-гігієнічних і медичних заходів та засобів, спрямованих на стабільне забезпечення безпеки, збереження здоров'я та працездатності працівників під час виконання трудових обов'язків.

На об'єктах електроенергетики охорона праці повинна здійснюватися відповідно до "Кодексу законів України про працю", Закону України "Про охорону праці" та інших нормативних документів. На кожному електроенергетичному об'єкті, в кожному підрозділі, а також на кожному робочому місці мають бути створені умови, що відповідають строгим вимогам цих нормативів, і забезпечено дотримання прав працівників, визначених законодавством про охорону праці.

Уся діяльність, пов'язана з охороною праці, має бути спрямована на створення системи організаційних і технічних заходів, що запобігають впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів на працівників. Експлуатація технічного обладнання, будівель і споруд повинна відповідати вимогам законодавства щодо охорони праці працівників.

Інструменти та засоби захисту, що використовуються при обслуговуванні та ремонті обладнання, повинні регулярно перевірятися, оглядатися та тестуватися відповідно до діючих сучасних нормативів охорони праці.

Крім того, на енергетичних об'єктах необхідно розробити та затвердити інструкції з охорони праці для всіх категорій працівників виробничих професій, таких як електрозварювальники, лаборанти, а також для виконання специфічних видів робіт, наприклад, висотних робіт, монтажних чи

ремонтних робіт, що відповідають вимогам законодавства і нормативних актів.

На електроенергетичних об'єктах, згідно з нормативними актами, повинна бути організована система медичних і профілактичних заходів для персоналу. Це включає:

- первинний медичний огляд при прийомі на роботу, а також періодичні медичні та наркологічні огляди для працівників певних категорій;
- професійний відбір, що визначає фізіологічну та психологічну придатність працівників до виконання специфічних робіт, які потребують особливої безпеки;
- медичні огляди автоводіїв перед виїздом на транспортних засобах;
- забезпечення санітарно-побутових умов для працівників.

Кожен працівник зобов'язаний бути обізнаним з вимогами безпеки праці, що стосуються як електрообладнання, з яким він працює, так і організації праці на своєму робочому місці.

На кожному електроенергетичному об'єкті повинна бути створена служба охорони праці, яка має розробити і затвердити документи, зокрема "Положення про систему управління охороною праці". Для організації робіт повинна використовуватися нарядна система для електротехнічних робіт. На малих підприємствах, де кількість працівників менша за 50, функції служби охорони праці можуть виконувати співробітники, які мають відповідну кваліфікацію та проходять спеціальну підготовку.

Забезпечення ефективної роботи з охорони праці та персональна відповідальність за неї покладаються на керівника (роботодавця) енергетичного об'єкта.

Керівники та інші посадові особи на енергетичних об'єктах повинні забезпечувати проведення всіх необхідних організаційних і технічних заходів для створення безпечних та здорових умов праці. Це включає забезпечення відповідності умов праці безпосередньо на робочих місцях, у виробничих приміщеннях і на території об'єкта вимогам безпеки та виробничої санітарії.

Крім того, вони зобов'язані своєчасно організовувати навчання персоналу, перевірку його знань і проводити інструктажі для забезпечення беззаперечного дотримання всіх вимог охорони праці.

У разі неможливості усунення шкідливих або небезпечних факторів, що впливають на працівників, керівники та відповідальні особи повинні забезпечити персонал засобами індивідуального захисту, щоб мінімізувати ризики для здоров'я та безпеки працівників.

При виникненні пожеж, аварій або інших надзвичайних ситуацій на електроенергетичних об'єктах, весь персонал, включаючи тимчасових працівників з інших організацій, зобов'язаний вжити необхідних заходів для ліквідації аварії або пожежі. У разі загрози здоров'ю або життю, персонал повинен залишити небезпечну зону і покинути робоче місце для забезпечення власної безпеки.

Коли на одному і тому ж обладнанні чи споруді енергетичного об'єкта працюють одночасно декілька організацій, які виконують будівельно-монтажні, налагоджувальні або ремонтні роботи за договорами з енергетичним об'єктом, адміністрація об'єкта разом з підрядними організаціями повинні розробити спільний графік робіт та план з охорони праці. Цей план має враховувати всі необхідні заходи щодо забезпечення безпеки працівників під час виконання робіт.

Керівники енергетичних об'єктів несуть відповідальність за дотримання цього плану на своїх ділянках, а також за кваліфікацію персоналу та виконання ним вимог охорони праці і пожежної безпеки.

Кожен нещасний випадок чи порушення безпеки, яке могло призвести до аварії або травми, повинні бути ретельно розслідувані для визначення причин і винуватців. На основі результатів розслідування мають бути вжиті заходи для запобігання подібним інцидентам у майбутньому.

Крім того, на кожному енергетичному об'єкті має бути створений кабінет охорони праці, де проводитиметься організаційно-методична робота,

навчання персоналу, проведення інструктажів та перевірка знань працівників з питань охорони праці та пожежної безпеки.

6.2. Вплив шкідливих факторів.

У процесі роботи на виробничих підприємствах працівники можуть піддаватися впливу різноманітних небезпечних та шкідливих виробничих факторів. Безпека будь-якого технологічного процесу оцінюється за кількістю таких факторів та їх ступенем небезпеки для людини. Важливим аспектом є те, що безпека праці визначається не тільки характеристиками окремих виробничих факторів, а й їх впливом на технічні процеси загалом.

Згідно з ДЕСТ 12.0.003-74, небезпечні й шкідливі виробничі фактори поділяються на кілька категорій: фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні. Психофізіологічні фактори поділяються на два види: фізичні перевантаження та нервово-психічні навантаження. Інші фактори класифікуються за конкретними ознаками їх небезпеки чи шкоди.

Основні небезпечні й шкідливі фактори, що можуть вплинути на працівників під час роботи, включають:

- Машини, механізми та автотранспорт, що знаходяться в русі;
- Рухомі частини машин і виробничого обладнання, які не мають належного захисту;
- Падіння різних виробів, інструментів та матеріалів протягом роботи;
- Ударні хвилі від вибухів, зокрема, від ємностей під тиском пари чи рідини;
- Викиди газів або рідин з ємностей чи труб під тиском;
- Поверхні, що стали слизькими через обмерзання, зволоження або замаслювання, що створює ризик ковзання;
- Підвищена запиленість і загазованість повітря в робочих зонах;
- Температурні коливання на поверхнях обладнання, матеріалів та техніки, що можуть бути надвисокими або наднизькими;

- Вологість, температура та рухливість повітря, що впливають на комфорт і здоров'я працівників;
- Надмірний рівень шуму, вібрацій, а також ультразвукових і інфразвукових хвиль;
- Підвищена напруга в електричних колах, що може бути небезпечною через можливі замикання через людське тіло;
- Високий рівень статичної електрики, який може призвести до ризику електричних розрядів;
- Наявність гострих країв, задирок або шорстких поверхонь на обладнанні та інструментах, що створює ризик травм;
- Недостатнє природне освітлення робочих зон;
- Погана або недостатня штучна освітленість в робочих зонах;
- Блиск, що виникає від прямих джерел світла (наприклад, від фар автотранспорту або прожекторів) та відбите світло від поверхонь, що відображають світло (наприклад, розлиті рідини або вода);
- Пульсація світлового потоку, що може призвести до зорового дискомфорту;
- Вплив ультрафіолетового та інфрачервоного випромінювання на робітників;
- Вплив хімічних речовин, які можуть бути токсичними, подразнюючими, канцерогенними або мутагенними;
- Проникнення шкідливих хімічних речовин через дихальні шляхи, шкіру або шлунково-кишковий тракт;
- Патогенні мікроорганізми, які можуть викликати інфекційні захворювання (бактерії, віруси);
- Нервово-психічні навантаження, а також статичні та динамічні перевантаження, що впливають на фізичний та психоемоційний стан працівника.

Згідно з нормативними вимогами, рівні впливу цих небезпечних і шкідливих факторів на робочих місцях мають не перевищувати допустимі

норми, які регламентуються санітарними правилами, нормами безпеки праці та іншими нормативно-технічними документами.

6.3. Безпека праці на підстанції 35/10 кВ.

На підстанціях 35/10 кВ існує кілька видів небезпеки, які можуть загрожувати життю та здоров'ю обслуговуючого персоналу. Основні з них включають:

- Дія електричного струму;
- Можливість виникнення пожеж;
- Травматизм при роботі з приводами комутаційних апаратів;
- Небезпека, що виникає при роботі з трансформаторною оливою.

Для усунення або зменшення цих небезпек, а також для забезпечення безпечних умов роботи в електроустановках, проводяться організаційно-технічні заходи.

Організаційні заходи включають:

- Призначення відповідальних осіб за безпеку виконання робіт;
- Видача дозволу на підготовку робочого місця і допуск до роботи;
- Підготовка робочого місця перед початком роботи та надання доступу;
- Нагляд за виконанням робіт на місці;
- Переведення працівників на інше робоче місце за потреби;
- Оформлення перерв у роботі та завершення робіт.

Технічні заходи включають:

- Вивішування заборонних плакатів на приводах ручного і дистанційного керування комутаційними апаратами;
- Приєднання переносних заземлень до "землі" для запобігання ураженню електричним струмом;
- Перевірка відсутності напруги на струмоведучих частинах перед заземленням;

- Установка заземлень після перевірки відсутності напруги та вивішування плакатів “Заземлено” на приводах комутаційних апаратів;
- Огорожі робочих місць або струмоведучих частин, що залишаються під напругою, з вивішуванням інформаційних плакатів безпеки.

Охорона праці на трансформаторних підстанціях 35/10 кВ та лініях електропередач, що мають напругу від 0,4 до 350 кВ, забезпечується дотриманням всіх вимог, що гарантують безпеку виконання робіт, попередження травм, професійних захворювань, а також виникнення пожеж і вибухів.

Кожен трансформатор має під'їзд шириною 4,5 м. Для запобігання розтікання оливи та поширення пожежі у випадку пошкодження трансформаторів встановлюються приймачі оливи, які виступають на 1 м і можуть вміщувати до 25 тонн оливи.

Якщо під час робіт є ймовірність відключення вторинної обмотки трансформатора струму, її треба закоротити. Роботи в вторинних колах виконуються ізольованими інструментами. Двері та ворота приміщень електроустановок мають бути замкнені, а ключі зберігатися у чергового персоналу. Усі роботи в діючих електроустановках мають виконуватись за нарядами або розпорядженнями. Капітальний ремонт електроустановок проводиться відповідно технологічних карт.

Працівники повинні бути одягнені в спеціальний одяг, а також оснащені засобами індивідуального захисту і медичними аптечками. При загрозі ураження електричним струмом всі роботи в електроустановках повинні бути негайно зупинені.

6.4. Правила поведінки в надзвичайних ситуаціях.

Усі зміни, що виникають в роботі обладнання електростанції і можуть призвести до його пошкодження або створюють загрозу для здоров'я та безпеки обслуговуючого персоналу, є надзвичайними ситуаціями.

У разі виникнення аварійної ситуації електромонтер повинен негайно повідомити головного оперативного працівника та вжити заходів для локалізації цієї ситуації, щоб мінімізувати наслідки.

У разі нещасного випадку важливо дотримуватись наступних дій:

1. Якщо потерпілий зазнав ураження електричним струмом, напруга повинна бути вимкнена без зволікань, навіть без попереднього дозволу.
2. Потерпілого необхідно негайно винести в безпечне місце.
3. Надати потерпілому першу (долікарняну) допомогу та викликати швидку допомогу.
4. Повідомити про нещасний випадок керівництво та диспетчера для виконання подальших дій.
5. Якщо це не загрожує життю людей, важливо зберегти обстановку на місці події, щоб виконати детальне розслідування обставин, за яких стався нещасний випадок.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішена важлива наукова задача, яка полягає в автоматизації керування пристроями регулювання напруги (РПН) силових трансформаторів з метою одночасного зниження рівнів відхилення та несиметрії напруг в розподільних електричних мережах (РЕМ). Одним з основних аспектів дослідження є створення та апробація нової системи автоматичного управління безконтактними пристроями РПН, яка дозволяє значно покращити якість електричної енергії в РЕМ.

Аналіз існуючих сучасних методів автоматизації управління регулюванням напруги за допомогою безконтактних пристроїв РПН показав, що найбільша проблема полягає у відсутності можливості пофазного регулювання коефіцієнтів трансформації силових трансформаторів. Ця проблема ускладнює досягнення стабільності і якості напруги в електричних мережах, особливо в умовах зміни навантаження та інших впливаючих факторів. Тому, основним завданням було розробити таку систему управління, яка б дозволила вирішити дану проблему і одночасно забезпечити зниження несиметрії і відхилень напруг.

Формалізація задачі автоматичного керування безконтактними пристроями РПН зводиться до задачі багатокритеріальної оптимізації. Це означає, що при розробці системи управління необхідно враховувати не тільки точність регулювання напруги, але й мінімізацію несиметрії, а також інші критичні параметри, такі як рівень потужності та енергоефективність. Для цього була застосована система структурних схем САУ та спеціальні алгоритми розрахунку вектора керування для кожного окремого варіанту схеми з'єднання обмоток силового трансформатора.

Розробка комп'ютерних імітаційних моделей САУ дозволила провести детальний аналіз роботи запропонованих систем автоматичного управління безконтактними пристроями РПН. В результаті тестувань було підтверджено,

що запропонований метод значно ефективніший за існуючі методи. Це було підтверджено значною перевагою запропонованого методу в порівнянні з традиційними системами управління. Зокрема, кількість потраплянь у нормальнодопустимі межі значень коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю була більшою при застосуванні запропонованого методу, що забезпечує покращення показників якості електричної енергії.

Відповідно до результатів експериментальних перевірок, була підтверджена працездатність та ефективність запропонованої САУ з безконтактним пристроєм РПН трансформатора. Експериментальна модель підтвердила теоретичні висновки і показала реальні покращення у зниженні відхилень напруги, зниженні рівня несиметрії та оптимізації керування трансформаторами.

Техніко-економічний аналіз запропонованої системи також продемонстрував ефективність даної системи у порівнянні з існуючими рішеннями. За результатами розрахунків, очікуваний економічний ефект від застосування цієї системи складає 38,8 тис. грн на рік, а термін окупності — лише 1,9 роки. Це свідчить про високу ефективність та перспективи широкого впровадження цієї технології у реальних умовах експлуатації електричних мереж.

Отже, магістерська робота показала, що запропонована система автоматичного управління безконтактними пристроями РПН силових трансформаторів є науково обґрунтованим і технічно доцільним рішенням, яке дозволяє значно підвищити якість електричної енергії в розподільних електричних мережах, знижуючи рівень відхилення та несиметрії напруги, а також забезпечуючи високі техніко-економічні показники в реальних умовах експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Електротехнічні системи електроспоживання / [Плешков П. Г., Зінзура В. В., Гарасьова Н. Ю., Котиш А. І., Величко Т. В., Плешков С. П.]; під редакцією Заслуженого працівника освіти України, кандидата технічних наук, професора Плешкова П. Г. – М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2021.– 209 с.
2. Кваліфікаційна робота магістра: метод. рекомендації до змісту, структури та оформлення кваліфікаційної роб. : для студ. спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков, К. Г. Петрова, Н. Ю. Гарасьова та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 74 с.
3. Особливі режими електричних мереж: Навчальний посібник/ Г.Г. Півняк, А.К. Шидловський, Г.А. Кігель, А.Я. Рибалко, О.І. Хованська. - Д.: Національний гірничий університет, 2009.-376 с
4. Електричні системи і мережі. Частина 3 : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / Ю. В. Малогулко, О. Б. Бурикін, Т. Л. Кацадзе, В. В. Нетребський ; за ред. П. Д. Лежнюка. – Вінниця : ВНТУ, 2022. – 172 с.
5. Жежеленко І.В. Показники якості електроенергії та їх контроль на промислових підприємствах. - М., Вища школа, 1986. – 152с. 4. Жежеленко І.В., Рабінович М.Л., Божко В.М. Якість електроенергії на промислових підприємствах К., Техніка, 1981. - 329 с.
6. Шидловський А.К. Музиченко О.Д. Симетруючі пристрої. – К., Техніка, 1970. – 129с.

7. Бялобржеський О.В. Контроль і керування якістю електричної енергії // Бялобржеський О.В., Сухоніс Т.Ю., Качалка В.Ю. – Кременчук, 2014. – 127 с.
8. Грабко В. В. Моделі і засоби регулювання напруги за допомогою трансформаторів з пристроями РПН / В. В. Грабко. – Вінниця, УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 109 с.
9. Електропостачання промислових підприємств : Підручник для студентів електромеханічних спеціальностей / В.І. Мілих, Т.П. Павленко. – Харків : ФОП Панов А. М., 2016. – 272 с.
10. Лежнюк П.Д. Електроощадні технології в електричних мережах енергосистем / Л. Н. Добровольська, В. В. Кулик, П. Д. Лежнюк // Під редакцією Лежнюка П.Д. – Луцьк: ІВВ Луцького НТУ, 2018. – 328 с.
11. Кучанський В.В. Заходи та технічні засоби підвищення ефективності роботи магістральних електричних мереж: монографія / В. В. Кучанський, Д. О. Малахатка. – Вінниця: ГО «Європейська наукова платформа», 2021. – 120 с.
12. Бурбело М. Й. Формування математичних моделей вимірювальних систем установок симетрування / М. Й. Бурбело, О. В. Бабенко // Вісник ВПІ. – 2005. – №6. – С. 242-251.
13. Бурбело М. Й. Квазізрівноважені вимірювальні канали для симетрувальних установок / М. Й. Бурбело, О. В. Бабенко. – Вінниця, УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 96 с.
14. Шкрабець Ф.П., Плешков П.Г. Основи електропостачання. Навчальний посібник. – Кіровоград: РВЛ КНТУ, 2010, -408 с.
15. Сосков А.Г., Колонтаєвський Ю.П. Промислова електроніка: Підручник. / За ред. А.Г. Соскова. – К.: Каравела, 2015. – 536 с
16. Kasztenny B. Fuzzy logic controller for on-load transformer tap changer / B. Kasztenny, E. Rosolowski, J. Izykowski, M. Saha // IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, 1998. – 164-170 pp.

17. Hsu Y. Y. A combined artificial neural network-fuzzy dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution substation / Y. Y. Hsu, F. C. Lu // IEEE Transactions on Power Systems, Vol 13, 1998. – 1265-1271 pp.
18. Larsson M. Coordinated Control of Cascaded Tap Changers in a Radial Distribution Network // M. Larsson, D. Karlsson // KTH Stockholm Power Tech Conference, 1995.
19. Львов І. Ю. Дворівнева система регулювання напруги електротехнічних пристроїв: дис. канд.. техн. наук: 05.09.03 / Львов Ілля Юрійович. – Львів, 2003. – 153 с.
20. Бурбело М. Й. Застосування багатоцільової оптимізації для симетрування та зменшення відхилень напруг в електричних мережах / М. Й. Бурбело, А. М. Волоцький, О. В. Бабенко, О. В. Салій // Вісник ВПІ. – 2007. – 2005. – № 6. – с. 76 – 79.
21. Пат. 63428 Україна, МПК⁷H02J/12. Спосіб автоматичного регулювання напруги в електричній мережі / П. Г. Плешков, В. В. Зінзура; заявник і патентоутримувач Кіровоградський національний технічний університет. – №u201102715 ; заявл. 09.03.2011 ; опубл. 10.10.2011, Бюл. № 19.
22. Плешков П. Г. Задача векторної оптимізації в управлінні безконтактним пристроєм РПН силового трансформатора / П. Г. Плешков, М. В. Кубкін, В. В. Зінзура // Актуальні задачі сучасних технологій: міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів. Тернопіль, 21-22 грудня 2010 р. – Тернопіль, 2010. – С. 115.
23. Зінзура В. В. Методи розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги в електричних мережах / В. В. Зінзура // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве

машинобудування, автоматизація /. – Вип. 25. Ч.1 – Кіровоград: КНТУ, 2012. С. 350-360.

24. Плешков П. Г. Теоретичні засади оптимального керування пристроєм РПН силового трансформатора за векторним критерієм / П. Г. Плешков, В. В. Зінзура, М. В. Кубкін // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. / Вип. 24, ч. 2. – Кіровоград: КНТУ, 2011. – С. 164-173.

25. Плешков П. Г. Оптимальне керування пристроєм РПН силового трансформатора, що працює в мережі з глухозаземленою нейтраллю. / П. Г. Плешков, В. В. Зінзура, М. В. Кубкін // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. Випуск 117 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Харків: ХНТУСГ, 2011. – С. 97-99.

26. Зінзура В. В. Задача багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги в електричній мережі з глухозаземленою нейтраллю / В. В. Зінзура // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. / – Вип. 25.Ч.2 – Кіровоград: КНТУ, 2012. С. 227-234.

27. П. Г. Плешков. Математичне моделювання роботи системи автоматичного управління пристроєм регулювання напруги під навантаженням силового трансформатора зі схемою з'єднання обмоток «трикутник/зигзаг з нулем» / П. Г. Плешков, В. В. Зінзура, А. В. Некрасов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Вип 25. – Кременчук: КрНУ, 2014. – С. 102 – 110.

28. Пат. 63316 Україна, МПК⁷Н02J/12. Спосіб автоматичного регулювання напруги в електричній мережі / В. В. Зінзура, М. В. Кубкін, О. І. Сіріков, О. А. Козловський, П. Г. Плешков ; заявник і патентоутримувач

Кіровоградський національний технічний університет. – №u201101582 ; заявл. 11.02.2011 ; опубл. 10.10.2011, Бюл. № 19.

29. Пат. 63428 Україна, МПК⁷H02J/12. Спосіб автоматичного регулювання напруги в електричній мережі / П. Г. Плешков, В. В. Зінзура; заявник і патентоутримувач Кіровоградський національний технічний університет. – №u201102715 ; заявл. 09.03.2011 ; опубл. 10.10.2011, Бюл. № 19.

30. Методичні вказівки до виконання економічної частини кваліфікаційної роботи для студентів напряму підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Укладач: Л.В. Тимошенко - Дніпро: НТУ «ДП», 2020. - 18 с.