

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

"Допущено до захисту"
Зав. кафедри ЕТС та ЕМ
канд. техн. наук., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
" ____ " _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему
"Інтелектуальна система автоматичного керування
рівнем напруги в розподільних електричних
мережах"

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-23М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

_____Віталій ВОЙТЕНКО
« ____ » _____ 2024 р.

Керівник роботи
канд. техн. наук, доцент
_____Василь ЗІНЗУРА
« ____ » _____ 2024 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

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

_____ Плесков П.Г.

«____» _____ 2024 р.

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

Войтенка Віталія Вікторовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Інтелектуальна система автоматичного керування
рівнем напруги в розподільних електричних мережах

Intelligent system for automatic control of voltage levels in power distribution
networks

2. Керівник роботи (проекту) Зінзура Василь Васильович, канд. техн. наук., доц.

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 01.12.2024 р

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Метою роботи є
проекткування системи автоматичного керування рівнем напруги в
розподільних електричних мережах із використанням пристроїв РПН
силових трансформаторів, яка б забезпечувала підвищення надійності їх
роботи та покращення якості регулювання напруги. Завдання роботи: 1.
Здійснити комплексне дослідження наявних автоматизованих систем
керування електричними трансформаторами з (РПН). 2. Розробити
математичну модель автоматизованого управління напруговими режимами
в електричних розподільних мережах,. 3. Створити моделі автоматичної
системи керування напруговими параметрами, впровадження яких
дозволить комплексно підвищити експлуатаційну надійність та
оптимізувати процеси регулювання електричної напруги.

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>4.10.2024</i>	
2	<i>Аналіз сучасного стану задачі регулювання напруги в електричних мережах</i>	<i>12.10.2024</i>	
3	<i>Теоретичне дослідження задачі регулювання напруги в розподільних електричних мережах</i>	<i>21.10.2024</i>	
4	<i>Комп'ютерне моделювання нечіткої системи автоматичного керування рівнем напруги в електричних мережах</i>	<i>05.11. 2024</i>	
5	<i>Технічна реалізація нечіткої системи автоматичного керування режимами напруги розподільних електричних мереж</i>	<i>12.11. 2024</i>	
6	<i>Охорона праці</i>	<i>18.11. 2024</i>	
7	<i>Висновки</i>	<i>23.11. 2024</i>	
8	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	<i>25.11. 2024</i>	
9	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	<i>29.11. 2024</i>	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2024 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2024 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Войтенко В. В. Інтелектуальна система автоматичного керування рівнем напруги в розподільних електричних мережах

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет. – м. Кропивницький, 2024 р.

Метою роботи є проектування системи автоматичного керування рівнем напруги в розподільних електричних мережах із використанням пристроїв РПН силових трансформаторів, яка б забезпечувала підвищення надійності їх роботи та покращення якості регулювання напруги.

Модернізація промислового сектору через впровадження інноваційних технологічних рішень висуває принципово нові критерії до параметрів електричної енергії та забезпечення стабільного електропостачання виробничих об'єктів.

Основні проблеми регулювання напруги в електричних мережах пов'язані з використанням силових трансформаторів, обладнаних пристроями регулювання під навантаженням (РПН). Механічні контакти таких пристроїв мають обмежений ресурс через постійну комутацію робочих струмів.

Через технічні та економічні обмеження оперативний персонал підстанцій мінімізує перемикання відпайок, що призводить до відключення автоматичних регуляторів напруги. Наслідком такого підходу стає погіршення якості електроенергії та зростання економічних втрат через неналежне електропостачання.

Запропонована в роботі нечітка САК пристроєм РПН силового трансформатора дозволяє досягти одночасного підвищення надійності їх роботи та покращення якості регулювання напруги.

Ключові слова: система автоматичного керування, нечітка логіка, силовий трансформатор

THE SUMMARY

Voitenko V.V. Intelligent system for automatic control of voltage levels in power distribution networks

Specialty 141 – "Electric power, electrical engineering and electromechanics". – "Electrical power consumption systems". – Central Ukrainian National Technical University. – Kropyvnytskyi, 2024.

The aim of the work is to design a system for automatic voltage control in distribution electrical networks using on-load tap-changer devices of power transformers, which would ensure increased reliability of their operation and improved quality of voltage regulation.

Modernization of the industrial sector through the introduction of innovative technological solutions puts forward fundamentally new criteria for the parameters of electric energy and ensuring stable power supply to production facilities.

The main problems of voltage regulation in electrical networks are associated with the use of power transformers equipped with on-load tap-changer devices (OTP). Mechanical contacts of such devices have a limited resource due to constant switching of operating currents.

Due to technical and economic limitations, operational personnel of substations minimize switching of tap-changers, which leads to disconnection of automatic voltage regulators. The consequence of this approach is a deterioration in the quality of electricity and an increase in economic losses due to improper power supply.

The fuzzy ACQ with the on-load tap-changer device of a power transformer proposed in the work allows to achieve a simultaneous increase in the reliability of their operation and an improvement in the quality of voltage regulation.

Keywords: automatic control system, fuzzy logic, power transformer

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАДАЧІ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ	15
1.1 Аналіз видів регулювання напруги в розподільних електричних мережах	15
1.2 Регулювання напруги шляхом зміни значення коефіцієнта трансформації силового трансформатора	20
1.2.1. Трансформатори з пристроями ПБЗ	22
1.2.2. Трансформатори з сучасними пристроями РПН	23
1.3 Аналітичний огляд методів автоматичної зміни коефіцієнта трансформації.....	28
Висновки до розділу	32
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАДАЧІ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ.....	33
2.1 Постановка задачі автоматичного керування рівнем напруги в РЕМ	34
2.2 Закони автоматичного керування рівнем напруги в РЕМ	35
2.3 Математична модель блоку визначення часової затримки спрацювання РПН	41
Висновки до розділу	49
РОЗДІЛ 3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ РІВНЕМ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ.....	51
3.1 Комп'ютерна модель нечіткої САК рівнем напруги в РЕМ.....	52
3.2 Комп'ютерне моделювання роботи САК рівнем напруги в РЕМ та визначення її ефективності	60
Висновки до розділу	65
РОЗДІЛ 4. ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ НЕЧІТКОЇ САК РІВНЕМ НАПРУГИ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ.....	67
4.1 Структурна схема мікроконтролерної САК рівнем напруги в РЕМ	67
4.2 Принципова схема мікроконтролерної САК рівнем напруги в РЕМ	70
Висновки до розділу	73

РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ	75
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	81

ВСТУП

Актуальність роботи. Трансформація промислового сектору України в контексті діджиталізації та впровадження інноваційних технологічних рішень висуває принципово нові вимоги до параметрів електричної енергії та забезпечення стабільного електропостачання виробничих підприємств. У сучасних економічних умовах електроенергія розглядається як специфічний товарний продукт, що має відповідати чітко визначеним нормативним стандартам якості.

Важливо зазначити, що надання послуг електропостачання передбачає неухильне дотримання низки технічних показників, серед яких: припустимі межі відхилення напруги, рівень несиметрії електричного струму, параметри синусоїдності, стабільність частотних характеристик тощо. Підтримання цих параметрів на належному рівні здійснюється за допомогою спеціалізованих технічних засобів та комплексних систем моніторингу.

Унікальність електроенергії як товару полягає в її миттєвому споживанні одразу після генерації, що висуває підвищені вимоги до миттєвої готовності енергетичної інфраструктури. Процеси виробництва, транспортування та розподілення електричної енергії потребують надзвичайно точного контролю та неперервного управління технологічними режимами.

Сучасні тенденції у галузі електроенергетики демонструють дедалі більшу орієнтацію на впровадження інтелектуальних систем управління, автоматизацію виробничих процесів та застосування високоточних вимірювальних комплексів, здатних забезпечувати неперервний моніторинг якісних показників електропостачання.

Методологія підвищення якості електроенергії охоплює три взаємопов'язані стратегічні напрямки вдосконалення електропостачання. Перша група методів зосереджена на раціоналізації електропостачальної інфраструктури. Основні заходи включають: збільшення пропускної

потужності електричних мереж; забезпечення живлення нелінійних споживачів через підвищену напругу; оптимізацію параметрів електричних ліній передачі; впровадження сучасних технологій підсилення електромереж. Друга група методів передбачає трансформацію характеристик безпосередньо споживачів електроенергії: забезпечення номінального завантаження електродвигунів; впровадження багатофазних схем випрямлення; інтеграція корегувальних пристроїв у структуру електроспоживання; модернізація внутрішніх систем електроперетворення. Третя група включає застосування спеціалізованих технічних рішень: використання регуляторів для контролю окремих параметрів електроенергії; встановлення пристроїв корекції якості електропостачання; впровадження інтелектуальних систем моніторингу електричних показників; застосування сучасних компенсаційних та фільтрувальних технологій.

Кожен з означених напрямків має на меті підвищення ефективності, надійності та стабільності електропостачання в умовах постійного технологічного ускладнення промислових та побутових електроспоживачів.

У контексті сучасних електроенергетичних систем найбільш економічно доцільною визнається третя категорія методологічних підходів. Причина такого вибору криється в суттєвих фінансових витратах, котрі супроводжують радикальну трансформацію мережевої інфраструктури або масштабне оновлення споживацького обладнання.

Забезпечення стабільного функціонування електричних мереж вимагає комплексного підходу до регулювання параметрів електроенергії. Актуальність розроблення інноваційних методів та інструментальних засобів підтверджується низкою викликів у галузі електроенергетики.

Серед ключових завдань - підвищення якості електропостачання, мінімізація технологічних втрат та забезпечення надійності електричних мереж. Сучасні наукові дослідження зосереджені на створенні інтелектуальних систем моніторингу та регулювання електроенергетичних параметрів.

У сучасних електроенергетичних системах критичного значення набуває забезпечення належної якості електроенергії на кінцевих точках її споживання. Це пов'язано з особливостями протяжної інфраструктури ліній електропередач та багаторівневої трансформації електричної енергії від місця генерації до безпосередніх споживачів.

Ключова проблема полягає в необхідності підтримання стандартизованих параметрів електропостачання безпосередньо на вводах споживацьких об'єктів. Особливої актуальності це набуває для великих промислових підприємств та складних технологічних комплексів.

Якість електричної енергії визначається низкою критичних параметрів, серед яких напруга посідає чільне місце. Неконтрольовані коливання електричного потенціалу, особливо в напрямку його зниження, призводять до суттєвих економічних втрат у виробничих секторах.

Технічні наслідки таких відхилень надзвичайно різноманітні. При зменшенні напруги відбувається підвищення втрат електричної потужності в розподільчих мережах, погіршується функціонування електроустаткування, знижується ефективність роботи промислового обладнання.

Сучасні енергетичні системи використовують широкий арсенал технічних засобів для стабілізації та підтримання оптимального рівня напруги. До найбільш поширених технічних рішень належать:

1. Трансформатори з автоматичним регулюванням коефіцієнта трансформації під навантаженням.
2. Конденсаторні батареї статичного типу.
3. Реактивні компоненти.
4. Синхронні компенсатори.
5. Генераторні установки електростанцій.

Кожен із цих пристроїв обладнується спеціалізованими регуляторами, які забезпечують прецизійне та безперервне підтримання напруги в межах установлених технічних нормативів. Такий підхід дозволяє мінімізувати

негативні наслідки коливань електричного потенціалу та гарантувати стабільність енергопостачання.

Регулювання напруги в електричних мережах є складним технологічним процесом, який має низку специфічних особливостей та технічних обмежень. Одним з основних інструментів такого регулювання виступають силові трансформатори, обладнані пристроями регулювання під навантаженням (РПН).

Технічна проблема полягає в обмеженому ресурсі механічних контактів пристрою РПН. Необхідність комутації робочих струмів призводить до інтенсивного зношення електричних з'єднань, що суттєво скорочує термін експлуатації обладнання.

Процес ремонту РПН характеризується значними складнощами:

- потребує повного зливання масла з трансформаторного бака;
- має високу вартість виконання;
- викликає тимчасове припинення електропостачання;
- вимагає високої кваліфікації технічного персоналу.

Через перелічені обставини оперативний персонал електростанцій намагається мінімізувати кількість перемикачів. Як наслідок, автоматичні регулятори напруги силових трансформаторів здебільшого залишаються відключеними.

Такий підхід має серйозні негативні наслідки, а саме погіршення якості електроенергії, зростання економічних збитків через неналежне електропостачання, поступове зниження ефективності роботи електричних мереж.

Сучасні тенденції розвитку електроенергетики спрямовані на впровадження більш інтелектуальних систем моніторингу та автоматизованого регулювання параметрів електричної мережі, що дозволить мінімізувати ризики та підвищити надійність енергопостачання.

Удосконалення систем автоматичного керування трансформаторами з пристроями регулювання під навантаженням (РПН) є критично важливим

напрямок розвитку електроенергетичної галузі. Основна мета таких розробок - комплексне вирішення двох взаємопов'язаних завдань: підвищення надійності обладнання та забезпечення високої якості регулювання напруги.

Мета роботи і задачі дослідження. Метою роботи є проектування системи автоматичного керування рівнем напруги в розподільних електричних мережах із використанням пристроїв РПН силових трансформаторів, яка б забезпечувала підвищення надійності їх роботи та покращення якості регулювання напруги.

Для досягнення цієї мети потрібно вирішити наступні задачі:

1. Здійснити комплексне дослідження наявних автоматизованих систем керування електричними трансформаторами з перемикачами відгалужень під навантаженням (РПН) для ідентифікації характерних недоліків їхнього функціонування.

2. Розробити математичну модель автоматизованого управління напруговими режимами в електричних розподільних мережах, де використовуються силові трансформатори з пристроями РПН, з метою забезпечення одночасного підвищення експлуатаційної надійності та покращення якості регулювання електричної напруги.

3. Створити графічні структурні моделі автоматичної системи керування напруговими параметрами в електричних розподільних мережах, впровадження яких дозволить комплексно підвищити експлуатаційну надійність та оптимізувати процеси регулювання електричної напруги.

4. Розробити імітаційну комп'ютерну модель системи автоматизованого контролю напругових режимів у розподільних електромережах на базі попередньо створених структурних схем управлінських систем.

5. Провести комплексну оцінку ефективності запропонованих систем автоматизованого керування за допомогою комп'ютерного імітаційного моделювання, що дозволить всебічно дослідити їхні функціональні можливості та результативність.

6. Розробити практичні рекомендації щодо технічної імплементації створених систем автоматичного управління напруговими режимами в електричних розподільних мережах.

Об'єкт дослідження – процеси автоматизованого регулювання електричної напруги в розподільних мережах з використанням регулюючих пристроїв силових трансформаторних установок.

Предмет дослідження – автоматизована система керування напруговими режимами розподільних електромереж, обладнаних трансформаторами з перемикачами відгалужень під навантаженням (РПН).

Методи досліджень. Розв'язання науково-дослідницьких завдань здійснювалося за допомогою:

- комп'ютерного імітаційного моделювання для відтворення складних електротехнічних процесів;
- апарату нечіткої логіки та нечіткого керування для оптимізації систем регулювання;
- методологічного інструментарію теорії електричних кіл та автоматичного управління;
- чисельних математичних методів розв'язання складних технічних задач.

Основні наукові результати роботи:

1. Уперше науково обґрунтовано впровадження інноваційного методу нечіткого керування на базі моделей Мамдані для визначення адаптивної часової затримки перемикання пристрою регулювання під навантаженням (РПН) силового трансформатора. На відміну від існуючих підходів, запропонований метод враховує поточний технічний стан обладнання завдяки даним, отриманим від спеціалізованої системи моніторингу стану силового трансформатора.

2. Створено комп'ютерну імітаційну модель нечіткої автоматизованої системи керування напруговими режимами в електричних розподільних мережах з силовими трансформаторами, обладнаними пристроями

регулювання під навантаженням (РПН). Розроблена модель надає можливість проводити поглиблений аналіз функціонування електротехнічних систем та визначати ефективність запропонованих технічних рішень.

Основні практичні результати. Практична значущість дослідження полягає в підвищенні експлуатаційної надійності розподільних електричних мереж при забезпеченні усталеного відхилення напруги в припустимих межах. До ключових практичних здобутків роботи належать:

- розроблена методологія формування бази правил нечіткої системи автоматизованого керування, зокрема модуля адаптивної часової затримки сигналу перемикання пристрою регулювання під навантаженням (РПН), яка враховує поточний технічний стан обладнання;

- створена комп'ютерна імітаційна модель нечіткої системи автоматичного управління режимами напруги в електричних розподільних мережах, обладнаних трансформаторами з РПН.

Загальна характеристика наукової роботи. Робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг роботи складає 81 сторінка. Основна частина викладена на 74 сторінках друкованого тексту, містить 54 рисунка та 2 таблиці. Список використаних джерел містить 34 джерела та викладений на 5 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАДАЧІ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

1.1 Аналіз видів регулювання напруги в розподільних електричних мережах

З метою забезпечення стабільного електропостачання та утримання показників напруги в межах, прийнятних для споживачів, у різних точках електромережі здійснюється контроль та корекція рівня напруги. Цей процес може бути реалізований двома основними способами: централізовано або локально, як зображено на схемі 1.1. [2].



Рис. 1.1 Основні види регулювання напруги в електричних мережах

У вузлових точках електромереж здійснюється централізоване керування рівнем напруги, що особливо ефективно при забезпеченні електроенергією масштабних об'єктів споживання. Такий підхід застосовується для живлення значних промислових комплексів або цілих міських агломерацій. У процесі керування напругою в електричних мережах можна виокремити три основні стратегії: підтримку сталого рівня напруги, поетапне коригування її величини та компенсаційне регулювання.

На підприємствах з цілодобовим циклом виробництва, де електроспоживання майже не змінюється протягом доби, оптимальним рішенням є підтримка сталого рівня напруги. Такий підхід називається стабілізацією і має ряд переваг.

Добовий графік цих електроспоживачів показаний на рис. 1.2.



Рис. 1.2. Добовий графік потужності споживачів з постійним навантаженням

Добова корекція електричної напруги (див. схему 1.3) базується на концепції програмованого керування [5]. Подібний підхід до коригування електричної напруги знаходить своє застосування в ситуаціях, коли електромережа обслуговує споживачів з передбачуваним щоденним профілем енергоспоживання. Це особливо актуально для підприємств, що функціонують в однозмінному режимі та характеризуються високим рівнем автоматизації виробничих процесів.

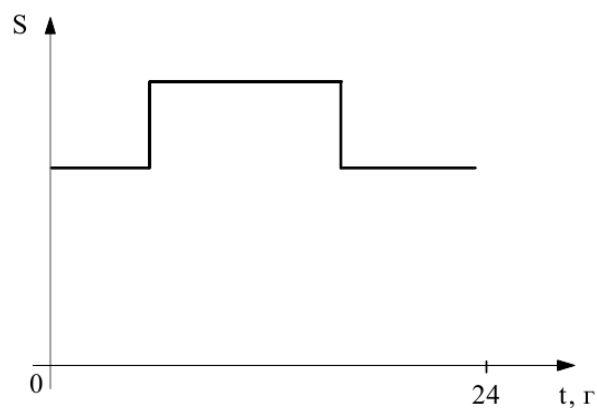


Рис. 1.3. Добовий графік потужності підприємств з 1-змінним режимом

Зустрічне регулювання напруги - це адаптивний метод, який знаходить своє застосування в умовах змінного добового навантаження електроспоживачів. Цей підхід особливо ефективний для мереж, де спостерігаються значні коливання енергоспоживання протягом доби. У такій ситуації контроль над рівнем напруги слід здійснювати з метою гарантування прийнятних показників її коливань не безпосередньо на розподільчих пристроях головної підстанції, а у визначеному віддаленому пункті підключення споживача електроенергії до розподільчої електромережі (РЕМ), який виступає як контрольна точка. При здійсненні регулювання напруги з урахуванням віддалених точок мережі, необхідно брати до уваги динаміку споживання електроенергії.

Добовий графік потужності підприємств із змінним навантаженням показано на рис. 1.4.

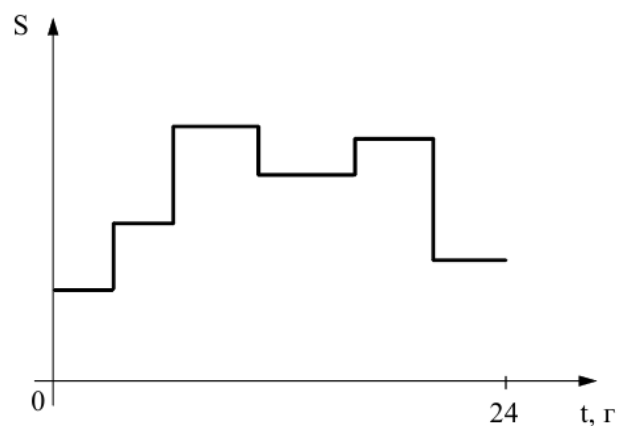


Рис. 1.4. Добовий графік потужності підприємств із змінним навантаженням

Щоб глибше дослідити принцип зустрічного регулювання напруги, звернемося до схеми, зображеної на рисунку 1.5. У цій схемі трансформатор представлений двома ключовими елементами: еквівалентним опором та ідеалізованим коефіцієнтом трансформації n . [2].

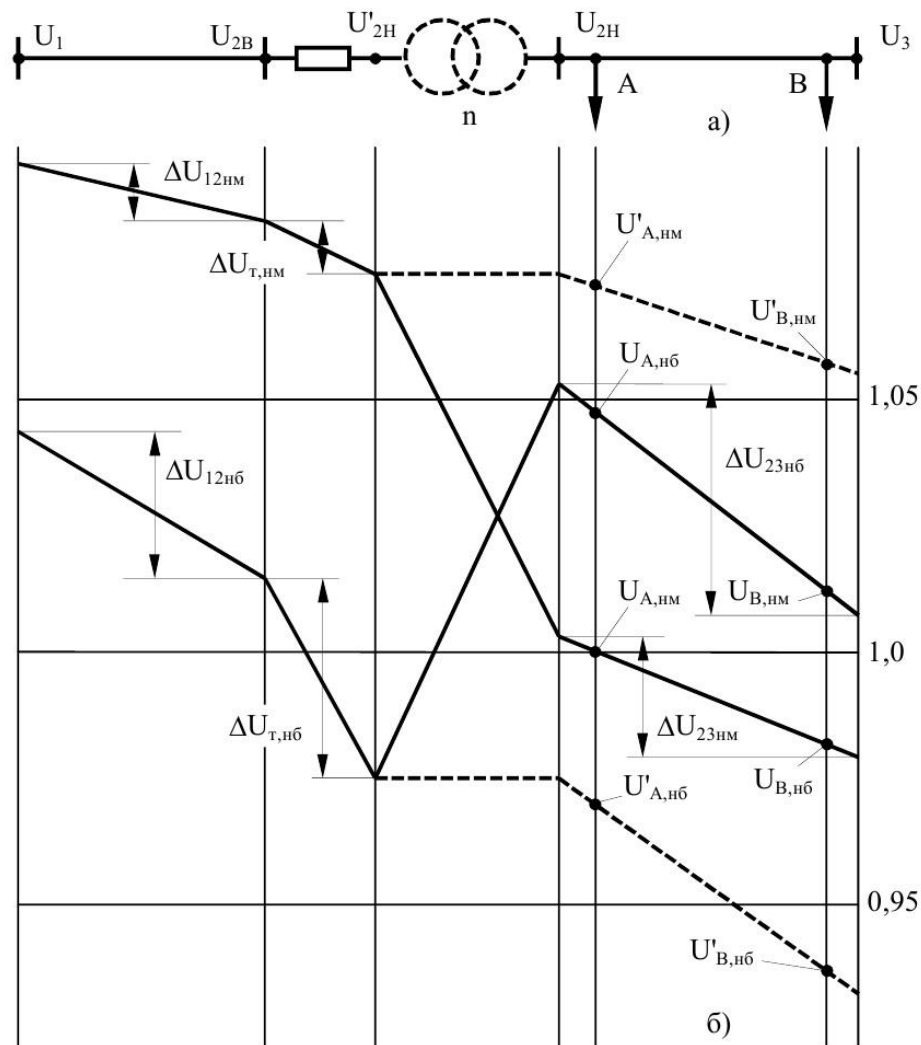


Рис. 1.5. Схема для ілюстрації принципу зустрічного регулювання напруги

Формула для визначення напруги на шинах ВН районної підстанції має наступний вигляд:

$$U_{2B} = U_1 - \Delta U_{12}, \quad (1.1)$$

де ΔU_{12} – спад напруги в лінії.

Різниця потенціалів між високовольтними (ВН) та низьковольтними (НН) шинами визначається падінням напруги ΔU_T всередині трансформатора. Варто зазначити, що в теоретично досконалому пристрої зниження електричної напруги відбувається згідно з коефіцієнтом трансформації. Цей важливий параметр необхідно брати до уваги при визначенні оптимального регулювального відгалуження.

У періоди мінімального споживання електроенергії виникає необхідність збільшення коефіцієнта трансформації n . Це досягається шляхом зниження напруги на вторинній обмотці U_{2H} до рівня, максимально наближеного до номінального значення, помноженого на коефіцієнт 1,0. При цьому режимі експлуатації обирають найвище стандартизоване значення n , яке відповідає певній умові:

$$U_{2H, \text{нм}} \geq 1,0 U_{\text{ном}} \quad (1.2)$$

При піковому споживанні електроенергії виникає потреба у зменшенні коефіцієнта трансформації n . Це здійснюється з метою підвищення напруги на вторинній обмотці U_{2H} до рівня, який максимально наближається до 105% від номінального значення ($1,05 U_{\text{ном}}$). У цьому експлуатаційному режимі обирають найбільше стандартизоване значення n , яке задовольняє певну умову:

$$U_{2H, \text{нм}} \geq 1,05 U_{\text{ном}} \quad (1.3)$$

Застосування цього методу дозволяє утримувати електричну напругу в межах допустимих значень для споживачів, незалежно від їх віддаленості від джерела живлення. Такий підхід до регулювання характеризується тим, що під час пікових навантажень відбувається підвищення зниженої напруги, тоді як у періоди мінімального споживання енергії здійснюється зниження підвищеної напруги. Саме через цю особливість даний спосіб отримав назву "зустрічне регулювання".

Регулювання напруги безпосередньо на клемах споживача електроенергії називається локальним. Цей метод застосовується вибірково, зважаючи на значні інвестиції, необхідні для його впровадження в розподільчі електромережі (РЕМ). Переважно такий підхід використовується для

забезпечення високої якості електроживлення енергоємних установок, які мають специфічні вимоги до параметрів електроенергії. Види локального регулювання напруги визначаються кількістю підключених до шин споживачів електроенергії. Розрізняють дві основні категорії: індивідуальне та групове регулювання.

Класифікація найбільш поширених методів регулювання напруги в РЕМ показана на рис. 1.6 у вигляді схеми.

1.2 Регулювання напруги шляхом зміни значення коефіцієнта трансформації силового трансформатора

У теперішніх розподільчих електричних мережах (РЕМ) широко використовується різноманітне обладнання, яке гарантує підтримку напруги в межах нормативно дозволених відхилень. Це досягається за допомогою модифікації співвідношення витків в обмотках потужних трансформаторів, що змінює їх коефіцієнти трансформації. [4]. Силові трансформатори новітнього зразка обладнані спеціальними обмотками, які мають регульовальні відгалуження. Ці відгалуження з'єднуються з різноманітними перемикальними механізмами, конструкція яких може варіюватися залежно від призначення та потужності трансформатора. За таких обставин, незважаючи на підвищену напругу, комутаційні апарати демонструють вищу економічність та надійність порівняно з аналогічними пристроями на низьковольтній стороні трансформатора. Це досягається завдяки зменшеному струмовому навантаженню.

За конструктивним виконанням пристрої перемикання регулюючих відгалужень обмоток силових трансформаторів можна поділити на дві групи:

1. Обладнання, що здійснює зміну регульовальних відводів за відсутності збудження, а саме коли обмотки високої та низької напруги потужного трансформатора від'єднані від електромережі. Такі пристрої відомі як трансформатори з перемиканням без збудження (ПБЗ).

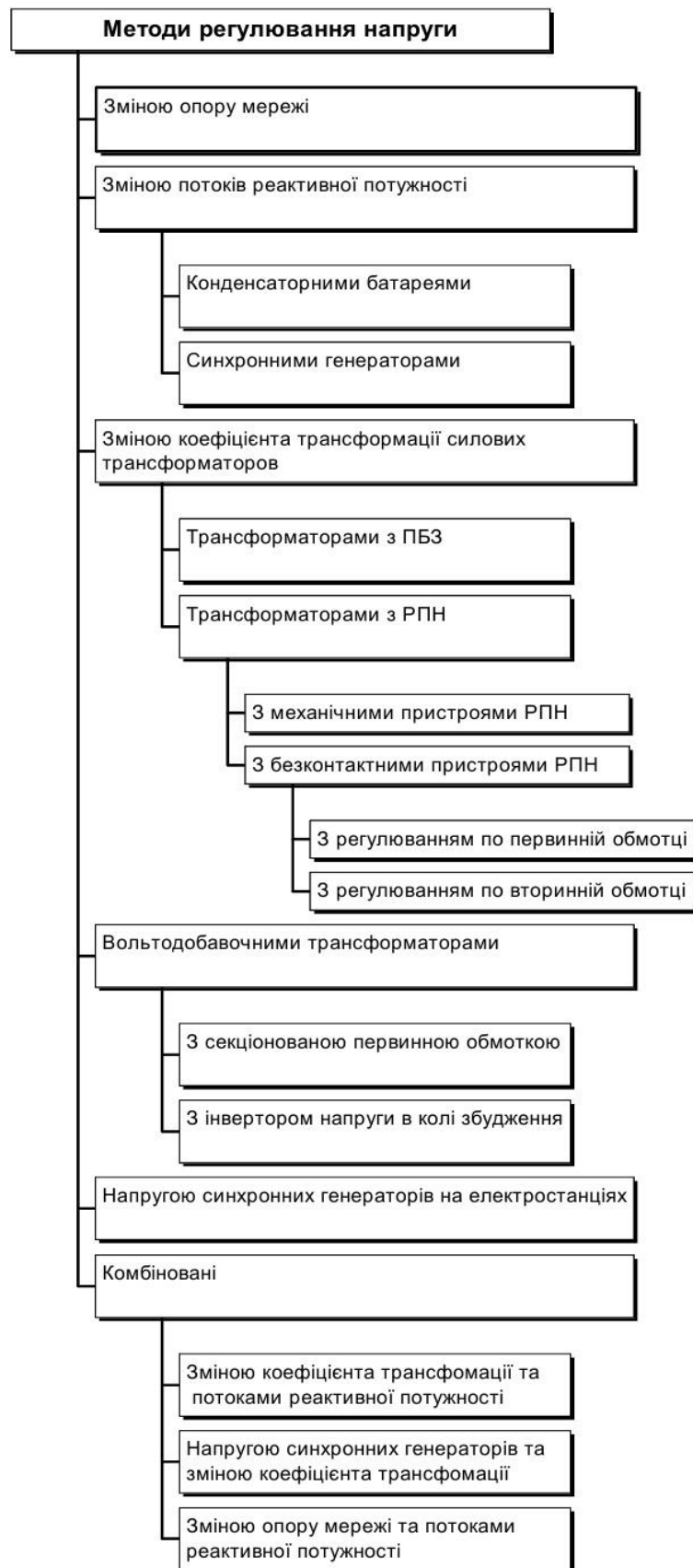


Рис. 1.6. Класифікація найбільш поширених методів регулювання напруги в РЕМ

2. Механізми, що забезпечують зміну регульовальних відводів при робочому струмі, не вимагаючи відключення силового трансформатора від енергосистеми. Такі пристрої відомі як трансформатори з регулюванням під навантаженням (РПН).

1.2.1. Трансформатори з пристроями ПБЗ. На сучасному етапі розвитку електротехніки виробництво трансформаторів з перемиканням без збудження (ПБЗ) зосереджено на конструкціях, що включають одне основне та чотири додаткові відгалуження. (рис. 1.7).

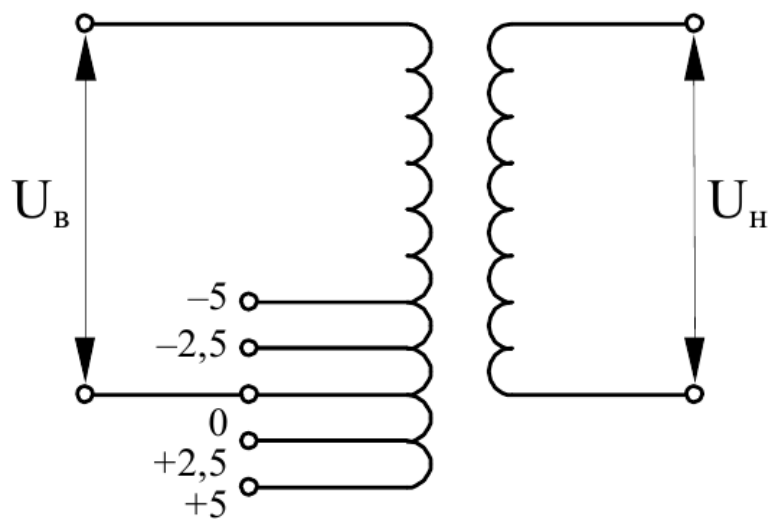


Рис. 1.7. Схема трансформатора, оснащеного ПБЗ

Центральне відгалуження трансформатора характеризується напругою, що відповідає номінальному значенню мережі, з якою з'єднується даний пристрій. Типові показники для такої напруги включають 6, 10 та 20 кілоВольт. Коли трансформатор працює на цьому відгалуженні, його коефіцієнт перетворення енергії вважається еталонним або номінальним. При використанні чотирьох додаткових відгалужень коефіцієнт трансформації відрізняється від номінального відповідно на +5%, +2,5%, -2,5% і -5%.

Зміна положення регульовального відводу вимагає знеструмлення трансформаторного агрегату. Ці маніпуляції проводяться нечасто, зазвичай у періоди сезонних коливань енергоспоживання. Внаслідок цього,

трансформатор із перемиканням без збудження (ПБЗ) функціонує з незмінним коефіцієнтом перетворення протягом усієї доби, незалежно від піків чи спадів енергоспоживання. Це означає, що як в години максимального навантаження, так і в періоди мінімального попиту на електроенергію, пристрій залишається на одному регульовальному відводі. Водночас, використання трансформаторів з перемиканням без збудження (ПБЗ) має суттєвий недолік - неможливість забезпечити зустрічне регулювання напруги.

1.2.2. Трансформатори з сучасними пристроями РПН. Механізм регулювання під навантаженням (РПН) має обмежену кількість можливих перемикань за час експлуатації. Більше того, процес зміни положення відпайки потребує щонайменше 5 секунд. [42]. Безконтактні пристрої регулювання під навантаженням (РПН), що використовують напівпровідникові силові ключі, позбавлені вищезгаданих обмежень [43]. Силові трансформатори, оснащені безконтактними пристроями РПН на основі напівпровідникових ключів, демонструють значно кращі характеристики перемикання. Тривалість зміни відпайки у таких установках становить всього 10 мілісекунд або навіть менше, що на два порядки швидше порівняно з механічними аналогами [42].

У джерелі [44] представлено інноваційний механізм контролю змінної напруги, який застосовує напівпровідникові потужні ключі для зміни відпайок (рис. 1.8).

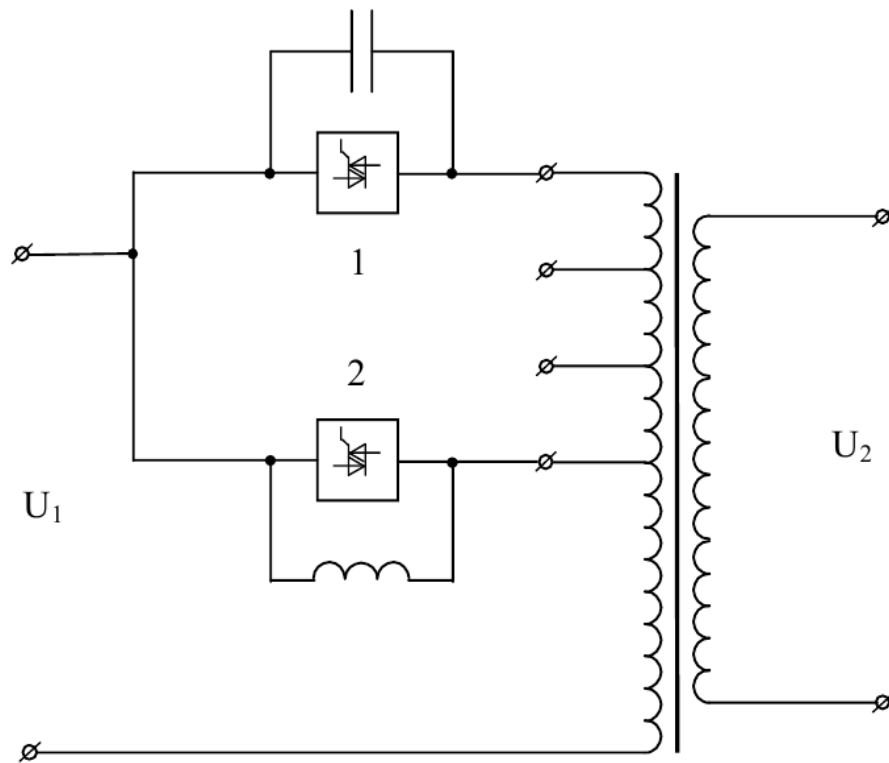


Рис. 1.8. Схема пристрою для регулювання напруги

Представлений механізм не гарантує збереження контактів від надмірних електричних навантажень, спричинених замиканнями. Більше того, під час перехідних станів функціонування системи виникають гармонічні коливання вищих порядків у електромережі.

Суттєвим обмеженням представленого механізму є відсутність урахування струмової компенсації під час процесу налаштування параметрів. Це може призвести до неоптимального функціонування системи в певних режимах роботи.

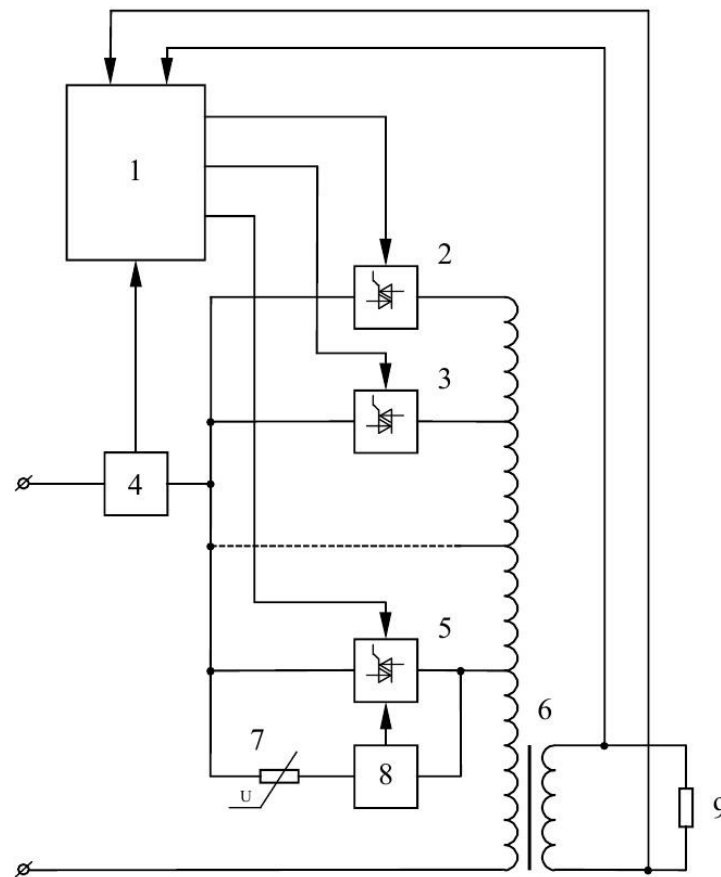


Рис. 1.9. Схема пристрою для перемикання відгалужень

У інноваційному механізмі контролю змінного струму, описаному в джерелі [47], конструкція первинної обмотки потужного трансформатора відрізняється унікальним підходом. Ця обмотка складається з двох паралельно з'єднаних груп, кожна з яких має секційну структуру. Процес перемикання електричних кіл здійснюється за допомогою напівпровідникових елементів - тиристорів, які виконують роль електронних ключів. Схематичне зображення структури даного пристрою можна побачити на рисунку 1.10.

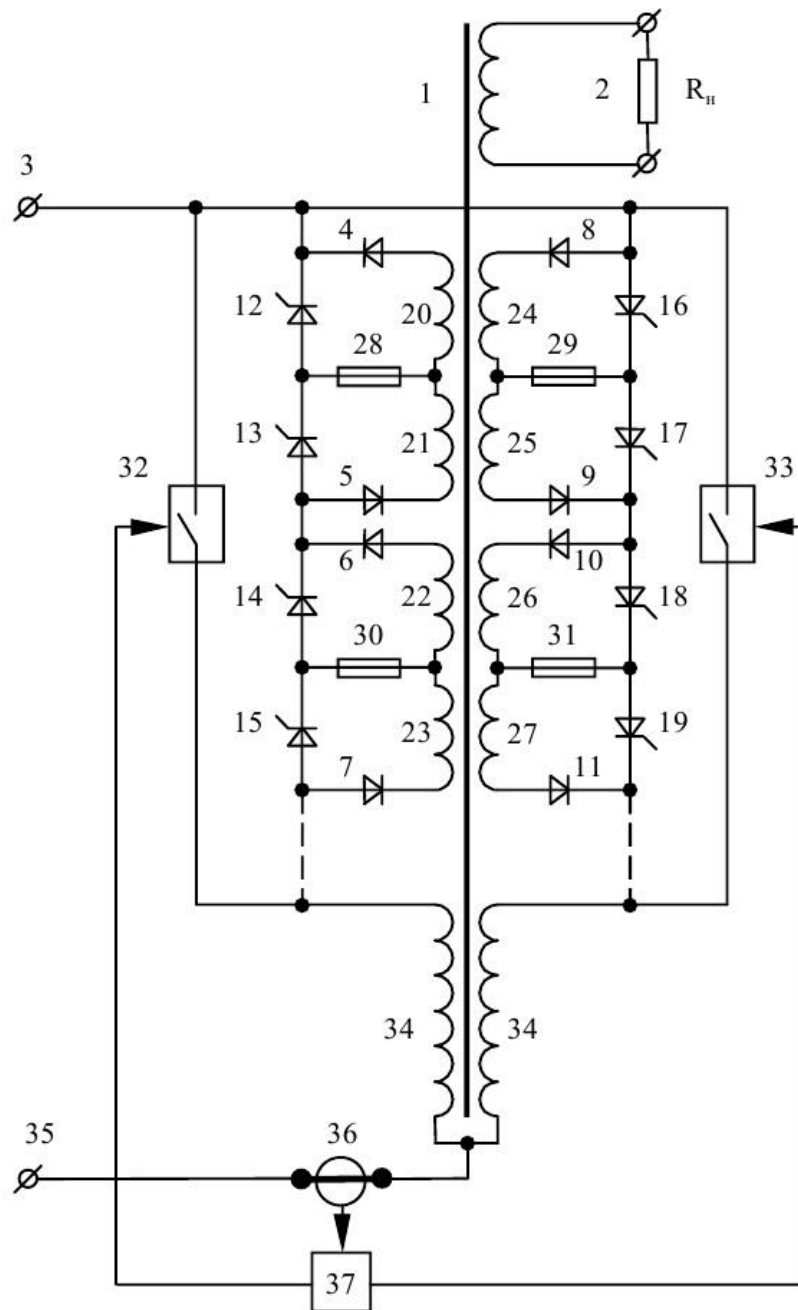


Рис. 1.10. Напівпровідниковий пристрій для регулювання напруги

Суттєвим мінусом описаної конструкції виступає використання подвійного набору обмоток, які функціонують по чергово протягом різних половин періоду. Така особливість спричиняє істотне зростання собівартості трансформаторного пристрою.

Існує механізм для зміни відводів регулювальної котушки трансформатора без вимкнення навантаження [48]. Цей пристрій складається з пари вакуумних комутаційних апаратів, схеми розвантаження на основі

тиристорів та контакторних елементів. Даний механізм сприяє зниженню зношування елементів комутації, проте його ціна залишається значною.

Дослідження [49] пропонує інноваційний метод контролю напруги, що базується на модифікації співвідношення витків трансформатора. Цей підхід передбачає варіювання числа обертів у вторинному контурі, що дозволяє ефективно регулювати вихідну напругу. Застосування тиристорних ключів для перемикання відгалужень трансформатора є інноваційним рішенням, що має потенціал суттєво вдосконалити процес регулювання напруги.

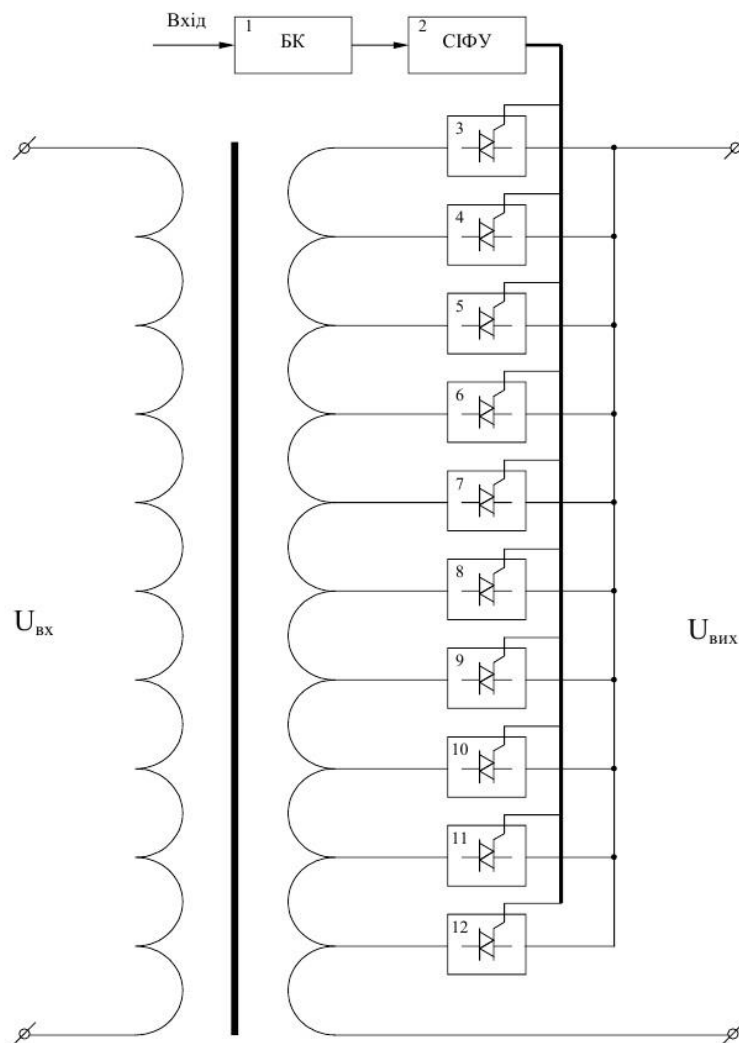


Рис. 1.11. Схема тиристорного РПН

У джерелі [50] представлено аналогічний механізм контролю напруги потужного трансформатора, що базується на перемиканні відводів його вторинної обмотки. Однак, головним недоліком методу регулювання, який

застосовують обидва згадані пристрої, є здійснення комутації на вторинній стороні силового трансформатора. Отже, для реалізації такого підходу виникає необхідність конструювання кожного комутаційного елемента з множини паралельно з'єднаних тиристорів, що призводить до економічної недоцільності даного рішення.

1.3 Аналітичний огляд методів автоматичної зміни коефіцієнта трансформації

З метою автоматизації процесу модифікації коефіцієнта трансформації потужних трансформаторів, інженери створили широкий спектр систем автоматичного керування (САК). Кожна з цих систем втілює специфічний алгоритм регулювання.

Серед різноманітних методів контролю напруги, найбільш елементарним принципом вважається регулювання на основі визначення відхилення від заданого значення, як зазначено у джерелі [19].

Джерело [20] представляє інноваційний механізм, що втілює принцип керування електричною напругою, базуючись на її флуктуаціях. Функціональне представлення цієї системи візуалізовано на схематичному зображенні 1.12.

23]. Схематичне зображення структури цього регулятора представлено на рисунку 1.13.

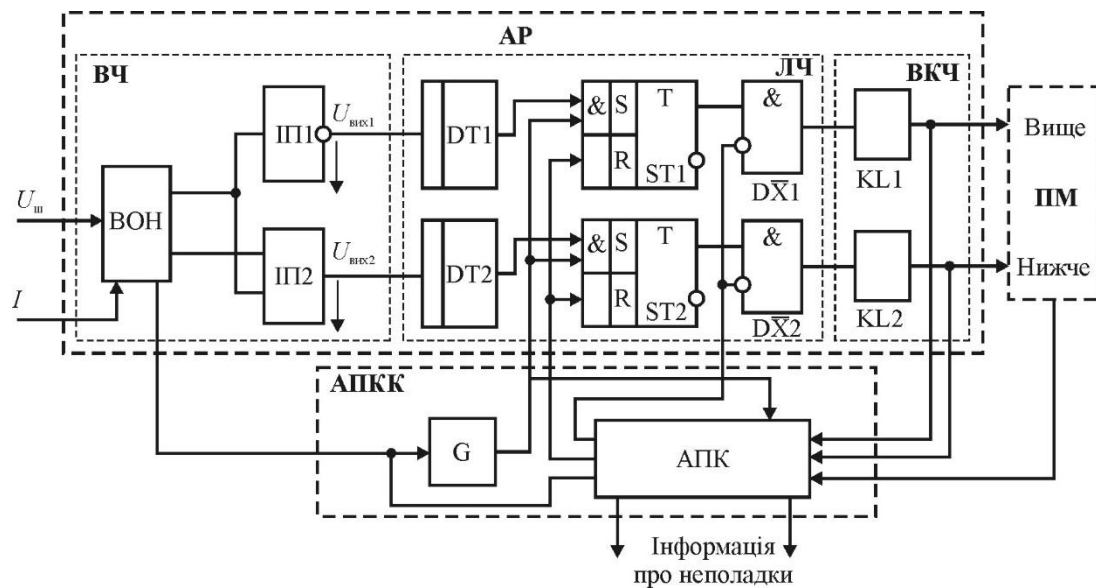


Рис. 1.13. Схема автоматичного регулятора напруги АРТ-1Н

Незважаючи на широке застосування, регулятор АРТ-1Н має певні обмеження у функціональності. Одним з головних недоліків є його нездатність визначати вектор зміни напруги, що призводить до надмірних комутацій. Ця особливість може негативно впливати на ресурс комутаційного обладнання та ефективність регулювання в цілому.

Дослідження, представлене у праці [24], пропонує інноваційний метод автоматичного контролю напруги, який бере до уваги величину струму навантаження. Цей підхід спрямований на вирішення проблеми надмірного підвищення напруги у споживачів, розташованих поблизу підстанцій, особливо в умовах значного струмового навантаження лінії. Запропонована конструкція включає модифікацію заданого значення для контролера АРТ-1Н, що призводить до успадкування аналогічних проблем. Автоматичний регулятор температури АРТ-1Н - це пристрій, який широко використовується в промисловості для підтримки стабільної температури в різноманітних процесах.

Розглянувши принципи функціонування вказаних механізмів, можна дійти висновку, що частота змін положення контактів у пристрої регулювання під навантаженням (РПН) залежить від кількох ключових факторів. Серед них не тільки величина відхилення напруги від номінального рівня, а й встановлений інтервал затримки між послідовними перемиканнями РПН. Безсумнівно, частота операцій комутації пристрою регулювання під навантаженням (РПН) має пряму залежність від тривалості часового інтервалу між перемиканнями. Збільшення цього інтервалу призводить до зменшення кількості комутацій контактів, що, як наслідок, сприяє подовженню експлуатаційного терміну РПН. Проте, варто зазначити, що надмірне збільшення часової затримки між перемиканнями негативно впливає на ефективність регулювання напруги в електромережі.

Інноваційний метод конструювання систем автоматичного керування (САК) для регулювання під навантаженням (РПН) передбачає використання адаптивного часового інтервалу між комутаціями. Цей інтервал не є фіксованим, а динамічно змінюється залежно від інтенсивності операцій перемикання, здійснених протягом визначеного часового проміжку, наприклад, за одну добу. Створення подібної гнучкої системи автоматичного керування (САК) механізмом регулювання під навантаженням (РПН) стає складнішим через значну нелінійність співвідношення між тривалістю затримки та частотою активацій РПН-пристрою. Безсумнівно, така САК має відноситися до категорії нелінійних систем управління.

Враховуючи складність розробки точної математичної формули, що відображала б зв'язок між тривалістю затримки переключень регулятора напруги під навантаженням (РПН) та частотою його активації, ми вважаємо, що оптимальним рішенням у цій ситуації буде впровадження систем автоматичного керування (САК), які функціонують на основі принципів нечіткої логіки.

Висновки до розділу

1. Виконане дослідження ключових методів контролю напруги виявило, що найефективнішим та широко застосовуваним підходом у розподільчих електромережах (РЕМ) є принцип зустрічного регулювання. Впровадження цієї системи автоматичної стабілізації електричної напруги дає можливість брати до уваги падіння потенціалу в лініях електропередач, що відходять від джерела живлення. Таким чином, це суттєво підвищує якісні показники напруги безпосередньо на клеммах електроприймачів споживачів.

2. Проведене дослідження методів та обладнання для коригування напруги шляхом модифікації співвідношення витків обмоток виявило, що найширше застосування знаходить електромеханічний комплекс РПН (регулювання під навантаженням) потужних трансформаторів. Однак, варто зауважити, що ключовим обмеженням механічного РПН є його порівняно невисока довговічність. Це пов'язано з інтенсивним зносом комутаційних елементів, які регулярно замикають та розмикають електричні кола з номінальними струмами трансформатора.

3. Дослідження наявних механізмів автоматичного контролю напруги у потужних трансформаторах, оснащених пристроями регулювання під навантаженням (РПН), виявило суттєві обмеження в їхній функціональності. Виявляється, що ці системи зазвичай зосереджуються лише на одному з двох ключових аспектів регулювання напруги, нехтуючи іншим. У випадках значних коливань електричної напруги виникають особливо несприятливі умови експлуатації. Такі режими характеризуються істотними відхиленнями від нормативних показників, що негативно впливає на якість енергопостачання. Як наслідок, споживачі тривалий час отримують електроенергію низької якості, що може призвести до низки проблем.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАДАЧІ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Ключовим недоліком перемикача відгалужень під навантаженням (РПН) у силових трансформаторах є його недостатня надійність як механічного компонента. Надійність функціонування перемикача відгалужень під навантаженням (РПН) має тенденцію до погіршення в міру збільшення числа його операцій. Це зниження ефективності здебільшого зумовлене поступовою деградацією комутаційних елементів, які регулярно проводять значні електричні струми. Оптимізація систем автоматичного керування (САК) трансформаторами, оснащеними механізмами регулювання під навантаженням (РПН), постає як найбільш багатообіцяючий напрямок у вирішенні цієї науково-технічної задачі. Впровадження вдосконалених САК має на меті суттєво скоротити частоту перемикачів РПН, при цьому зберігаючи високі показники якості електричної напруги в мережі.

Для вирішення цієї задачі потрібно:

- розробити математичну модель для автоматизованого управління рівнем напруги в розподільчих електричних мережах (РЕМ);
- розробити закони автоматичного регулювання напруги в розподільчих електричних мережах (РЕМ) за допомогою регулюючих пристроїв під навантаженням (РПН) силових трансформаторів, необхідно врахувати ряд факторів та створити алгоритми, що забезпечать оптимальне керування;
- здійснити селекцію оптимального математичного інструментарію для автоматизації управління напругою в розподільчих електромережах (РЕМ);
- створити алгоритмічне та математичне підґрунтя для автономного управління механізмом стабілізації електричної напруги в розподільчих електромережах (РЕМ).

Другий розділ цієї магістерської дисертації зосереджується на розв'язанні вищезгаданих проблем.

2.1 Постановка задачі автоматичного керування рівнем напруги в РЕМ

Суттєвим фактором, що негативно впливає на стабільність функціонування розподільчих електричних мереж (РЕМ), є несправність регулятора напруги під навантаженням (РПН) у потужних трансформаторах.

Щоб розробити систему автоматичного керування (САК), насамперед потрібно створити математичний опис об'єкта, яким керуватимуть. Характерна структура частини розподільчої електричної мережі (РЕМ) зображена на схемі 2.1.

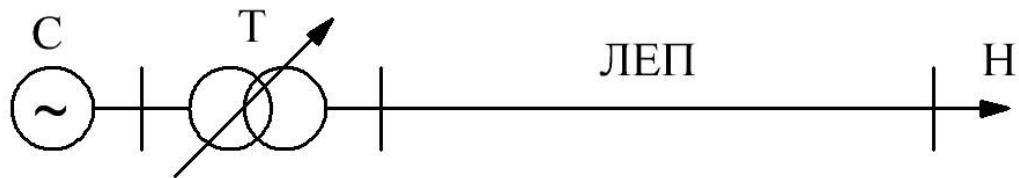


Рис. 2.1. Схема мережі

На рис. 2.2 представлено конструкційну діаграму системи автоматичного керування (САК), яка втілює принцип компенсаційного контролю напруги в розподільчій електричній мережі (РЕМ).

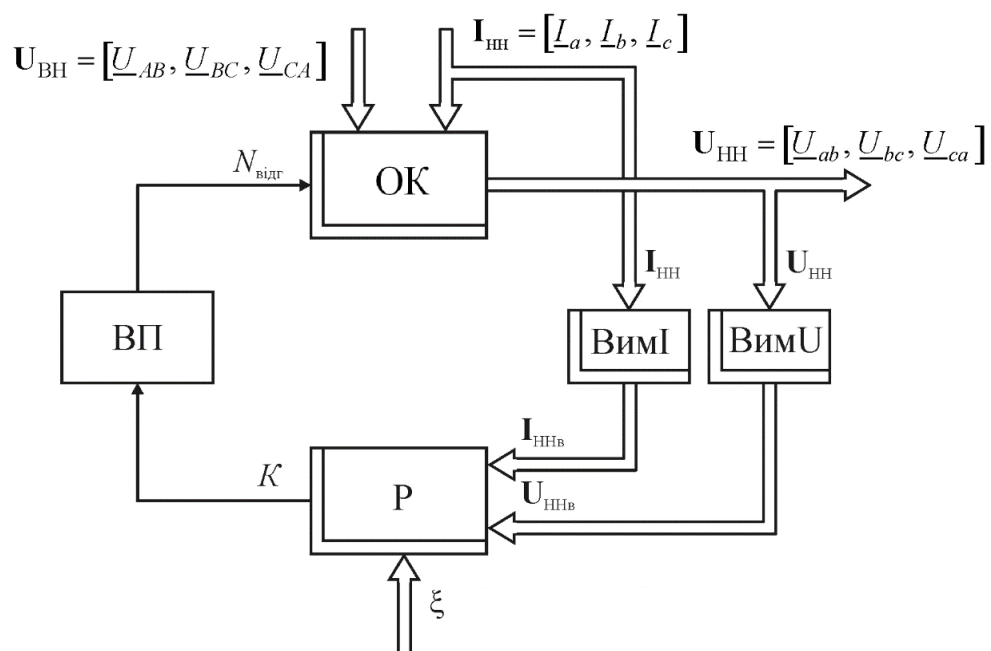


Рис. 2.2. Схема САК що реалізує зустрічне регулювання напруги

Отже, з метою реалізації окресленої дослідницької цілі, нами було визначено таке комплексне завдання: *На основі заданих параметрів регулювання пристрою РПН (регулятора під навантаженням), включаючи діапазон та крок, а також враховуючи виміряні комплексні значення струмів і напруг на низьковольтній стороні трансформатора, необхідно розробити алгоритм функціонування регулятора. Цей алгоритм повинен оперувати в режимі реального часу, визначаючи оптимальні значення коефіцієнта трансформації та часових затримок активації пристрою РПН.* Для вирішення окресленого завдання дослідження насамперед необхідно сформулювати принципи та розробити алгоритми автоматичного контролю напруги в розподільчих електричних мережах (РЕМ).

2.2 Закони автоматичного керування рівнем напруги в РЕМ

На ключових розподільчих пунктах енергосистеми застосовується принцип зустрічної регуляції напруги. Згідно з цим підходом, при мінімальному споживанні електроенергії на шинах таких пунктів підтримується номінальний рівень напруги однак, коли навантаження зростає, виникає необхідність компенсувати падіння напруги в компонентах мережі. Для цього напругу поступово збільшують, досягаючи максимум $1,05U_{\text{ном.}}$ при пікових навантаженнях. Для ступінчатого регулювання пристроями РПН (регулювання під навантаженням) закон зустрічного регулювання напруги можна представити математично [60]:

$$u(t) = K_1((U(t) - U_y) - K_2(I(t) - I_{\min}));$$

$$K_m = \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{н.н}}, & \text{якщо } u(t) \leq u_{н.з}; \\ \frac{U_i}{U_{н.н}}, & \text{при } u_{н.з} < u(t) < u_{в.з}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{н.н}}, & \text{якщо } u(t) \geq u_{в.з}; \end{cases} \quad (2.1)$$

$$K_2 = \frac{0,05U_{ном}}{I_{\max} - I_{\min}}; \quad (2.2)$$

У процесі роботи електричних мереж фахівці прагнуть мінімізувати частоту переключень відводів трансформаторного обладнання. Це робиться з метою підвищення загальної надійності системи, навіть якщо такий підхід призводить до певного погіршення точності регулювання напруги. Через закон регулювання створюють нечутливим до нетривалих коливань напруги що забезпечується введенням у формулу (2.1) часової затримки τ_z та відповідної логічної умови:

$$u(t) = K_1((U(t) - U_y) - K_2(I(t) - I_{\min}));$$

$$K_m = \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{н.н}}, & \text{якщо } \begin{cases} u(t) \leq u_{н.з}; \\ u(t - \tau_z) \leq u_{н.з}; \end{cases} \\ \frac{U_i}{U_{н.н}}, & \text{при } u_{н.з} < u(t) < u_{в.з}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{н.н}}, & \text{якщо } \begin{cases} u(t) \geq u_{в.з}; \\ u(t - \tau_z) \geq u_{в.з}; \end{cases} \end{cases} \quad (2.3)$$

З метою покращення стабільності процесу регулювання напруги, інженери-електрики вдосконалили алгоритм, представлений у рівнянні (2.3).

Вони впровадили новий логічний критерій, який базується на аналізі динаміки зміни напруги в електромережі. Ключовим елементом цього вдосконалення стало врахування знаку похідної огинаючої кривої напруги $U_{ог}$ регульованої напруги $U(t)$. Дане правило дозволяє уникнути непотрібних операцій з перемиканням відгалужень трансформатора у випадках, коли параметр, що регулюється, хоч і виходить за межі зони нечутливості регулятора, але під впливом зовнішніх чинників самостійно прямує до неї. В такому випадку закон регулювання набуває вигляду:

$$u(t) = K_1((U(t) - U_y) - K_2(I(t) - I_{min}));$$

$$K_m = \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{н.н}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \leq u_{н.з}; \\ u(t - \tau_3) \leq u_{н.з}; \\ \frac{dU_{ог}}{dt} \leq 0; \end{cases} \\ \frac{U_i}{U_{н.н}}, \text{ при } u_{н.з} < u(t) < u_{в.з}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{н.н}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \geq u_{в.з}; \\ u(t - \tau_3) \geq u_{в.з}; \\ \frac{dU_{ог}}{dt} \geq 0, \end{cases} \end{cases} \quad (2.4)$$

Проте, згаданий нормативний акт не забезпечує оперативного реагування контролюючого органу на суттєві флуктуації регульованої електричної напруги. Як наслідок, протягом значного проміжку часу споживачі отримують енергію з параметрами, що виходять за межі встановлених стандартів. Внаслідок таких коливань напруги відбуваються суттєві зміни в операційних процесах підприємств. Зважаючи на вищезазначені проблеми, видається доцільним внести модифікації до чинного алгоритму регулювання напруги. Зокрема, пропонується доповнити існуюче правило (2.4) додатковою умовою, яка б уможливілювала миттєве спрацювання пристрою регулювання під навантаженням (РПН) без

стандартної затримки $\tau_{3,u}$ випадках, коли фактичний рівень напруги значно відхиляється від номінального значення $U_{\text{ном}}$. Враховуючи поставлену вимогу, нормативний акт управління набуде такої форми:

$$\begin{aligned}
 u(t) &= K_1((U(t) - U_y) - K_2(I(t) - I_{\min})); \\
 K_m &= \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{\text{н.н}}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \leq u_{\text{н.з}}; \\ u(t - \tau_3) \leq u_{\text{н.з}}; \\ \frac{dU_{\text{ор}}}{dt} \leq 0; \end{cases} \\ \frac{U_i}{U_{\text{н.н}}}, \text{ при } u_{\text{н.з}} < u(t) < u_{\text{в.з}}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{\text{н.н}}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \geq u_{\text{в.з}}; \\ u(t - \tau_3) \geq u_{\text{в.з}}; \\ \frac{dU_{\text{ор}}}{dt} \geq 0; \end{cases} \end{cases} \\
 U(t) \xrightarrow{t_{\text{пер}} \rightarrow \min} U_{\text{ном}} \pm \Delta U, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) < u_{\text{н.з1}} \\ u(t) > u_{\text{в.з1}} \end{cases},
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Безсумнівно, експлуатація пристроїв регулювання під навантаженням (РПН) вимагає диференційованого підходу залежно від їхнього стану. Трансформатори з РПН, які вже тривалий час функціонують та наближаються до вичерпання свого ресурсу, потребують більш обережного поводження. Для таких агрегатів доцільно зменшити частоту перемикачів порівняно з новими установками, щойно введенними в роботу. Не існує прямої кореляції між періодом використання та класифікацією пристроїв РПН на "нові" чи "зношені". Ця оцінка базується на комплексному аналізі численних факторів, які детально розглядаються у дослідженні. РПН (регулятор під навантаженням) - це важливий компонент силових трансформаторів, що

дозволяє змінювати коефіцієнт трансформації без переривання електропостачання. [43].

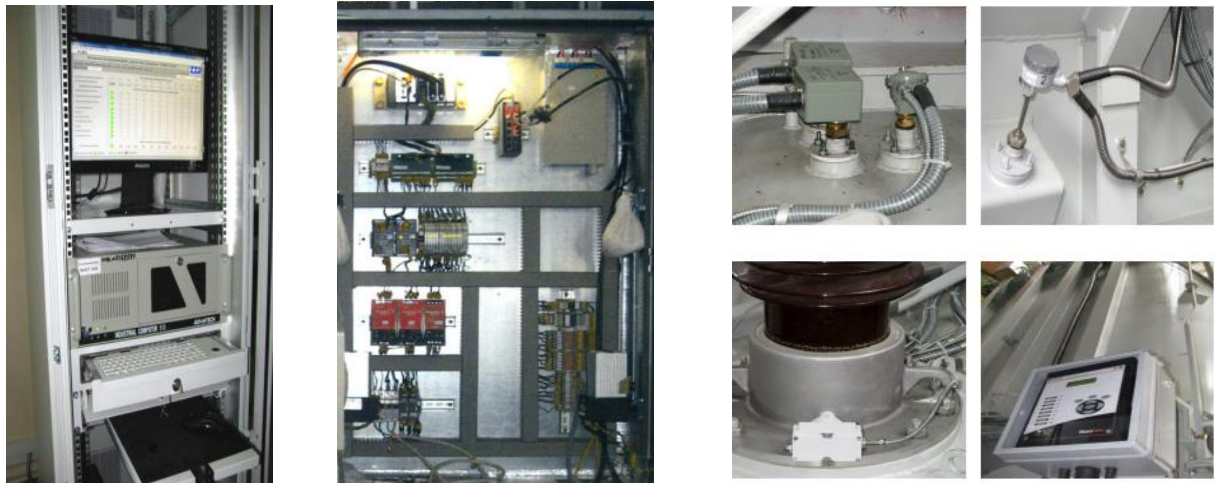
У рівнянні, що описує регулювання напруги (2.5), ключовим параметром виступає інтервал затримки сигналу τ_z . Цей показник можна розглядати як двосторонню змінну. З одного боку, він є індикатором технічного стану регулятора напруги під навантаженням (РПН), відображаючи його залишковий ресурс. З іншого боку, τ_z безпосередньо впливає на параметри якості електроенергії, що подається споживачам. У контексті функціонування регулятора напруги під навантаженням (РПН), час затримки сигналу спрацювання τ_z має наступний вигляд [43]:

$$\tau_z = f(I_d, \operatorname{tg} \delta, W, C, CO_2, C_n H_n, R) \quad (2.6)$$

У галузі електроенергетики розроблено та впроваджено широкий спектр систем моніторингу, що забезпечують збір та аналіз даних про експлуатаційні параметри силових трансформаторів, оснащених регуляторами напруги під навантаженням (РПН). Ці комплекси дозволяють отримувати в режимі реального часу інформацію про змінні, які входять до формули (2.6).

Яскравою ілюстрацією подібного моніторингового комплексу слугує "ESMDU-TRANS" - інноваційна розробка підприємства "Запоріжтрансформатор". Візуальне представлення апаратної складової описаної системи моніторингу можна побачити на ілюстрації 2.3, а інтерфейс програмного забезпечення – на рис. 2.4.

Співвідношення, представлене формулою (2.6), характеризується значною нелінійністю. Це зумовлює необхідність ретельного підбору математичного інструментарію, який би найточніше відображав специфіку даної залежності.



а) б) в)

Рис. 2.3. Устаткування системи моніторингу поточного стану «ESMDU-TRANS» силового трансформатора:

а) шафа АРМ ESMDU-TRANS; б) шафа моніторингу стану трансформатора;
в) ПВП системи моніторингу

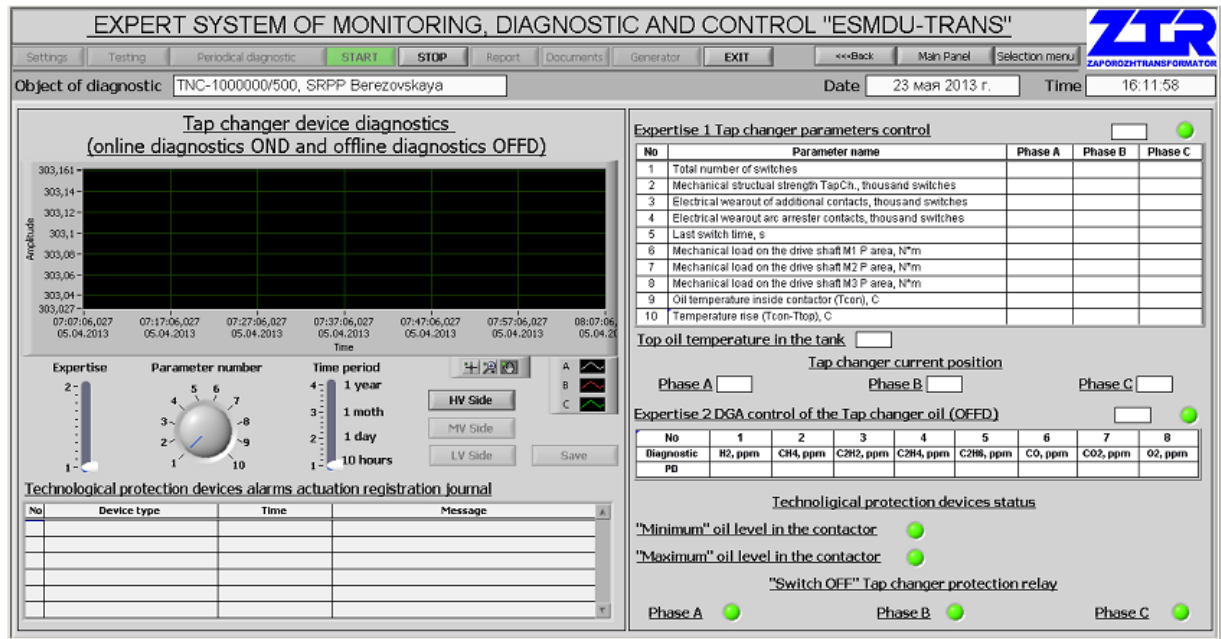


Рис. 2.4. Програмне забезпечення «ESMDU-TRANS»

2.3 Математична модель блоку визначення часової затримки спрацювання РПН

У попередньому розділі було висвітлено, що найскладнішим аспектом у процесі створення алгоритму керування (2.5) є встановлення адаптивного часового інтервалу τ_3 необхідного для активації механізму регулювання під навантаженням (РПН). У контексті використання методології нечіткої логіки, математична репрезентація взаємозв'язку набуває специфічної форми:

$$\tau_3 = \text{fuzzy}(I_d, \text{tg } \delta, W, C, CO_2, C_n H_n, R) \quad (2.47)$$

Створимо формалізовану систему, базовану на принципах нечіткої логіки, для обчислення оптимального значення адаптивного часового інтервалу τ_3 .

Початковий крок у процесі моделювання вимагає ретельного аналізу та встановлення меж варіації ключових параметрів. Ці фактори безпосередньо впливають на розрахунок адаптивного часового інтервалу τ_3 . Вихідний сигнал моделі, представлений значенням затримки часу спрацювання, є ключовим параметром для оцінки ефективності системи τ_3 :

Проблема встановлення оптимального часового інтервалу τ_3 передбачає співвіднесення кожного набору вхідних даних з конкретним значенням часової затримки в автоматизованій системі управління трансформатором. Цей процес враховує експлуатаційний ресурс механізму регулювання напруги під навантаженням (РПН).

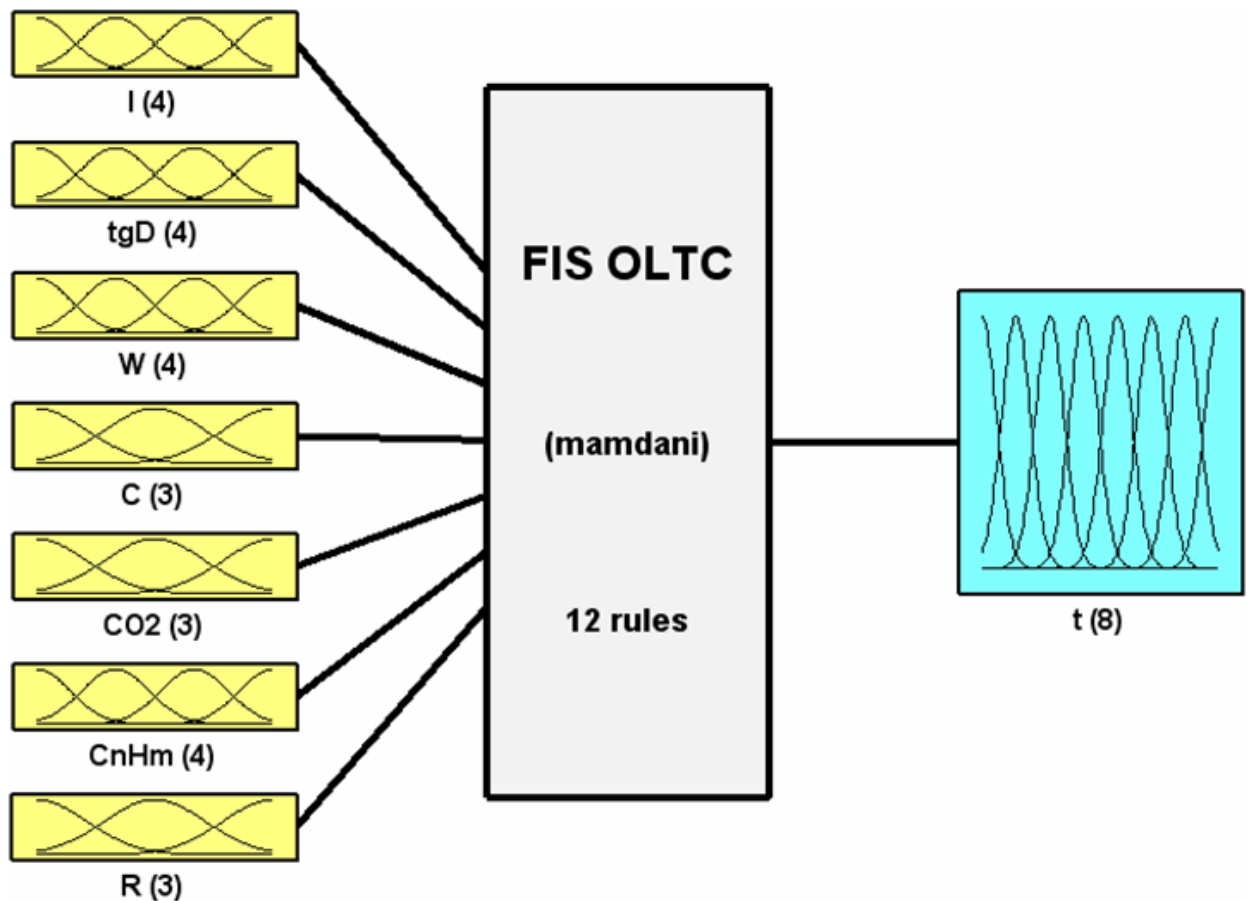


Рис. 2.5. Схема нечіткої системи визначення затримки часу τ_z спрацювання РПН

У контексті розв'язання поставленої проблеми управління, методом нечіткої логіки було обрано підхід Мамдані. Це рішення базується на кількох ключових перевагах даного алгоритму.

Наступним етапом у процесі моделювання виступає формування експертної бази знань. Враховуючи кількісні характеристики вхідних і вихідних параметрів, а також беручи до уваги число термів для кожної функції належності, було розроблено набір з 12 правил нечіткої продукції.

У процесі створення нечіткої моделі для модуля прийняття рішень було застосовано функції належності Гаусового типу. Цей вибір не випадковий, адже гаусові функції відповідають нормальному розподілу, який описує ймовірність приналежності вхідного параметра до визначених лінгвістичних термів :

$$\mu = \exp\left(-\frac{(x-b)^2}{2c^2}\right), \quad (2.48)$$

Графіки функцій приналежності, показані на рис. 2.6 – 2.13.

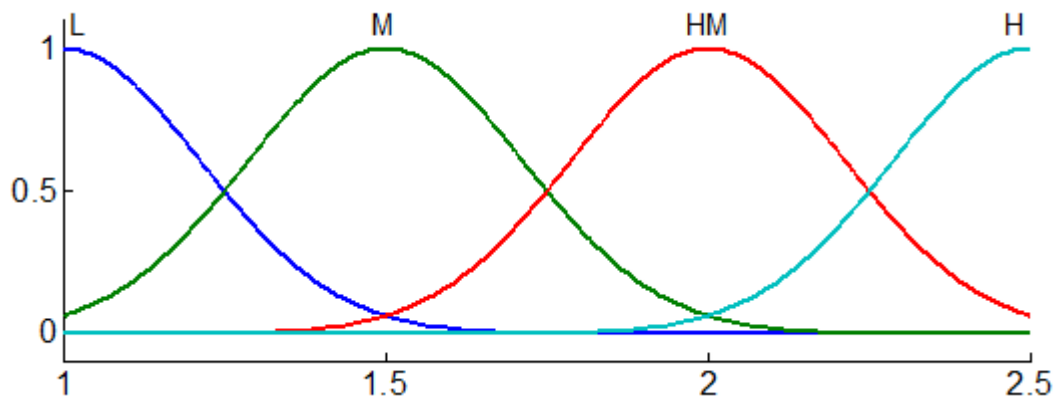


Рис. 2.6. Функції приналежності нечіткої змінної «I»

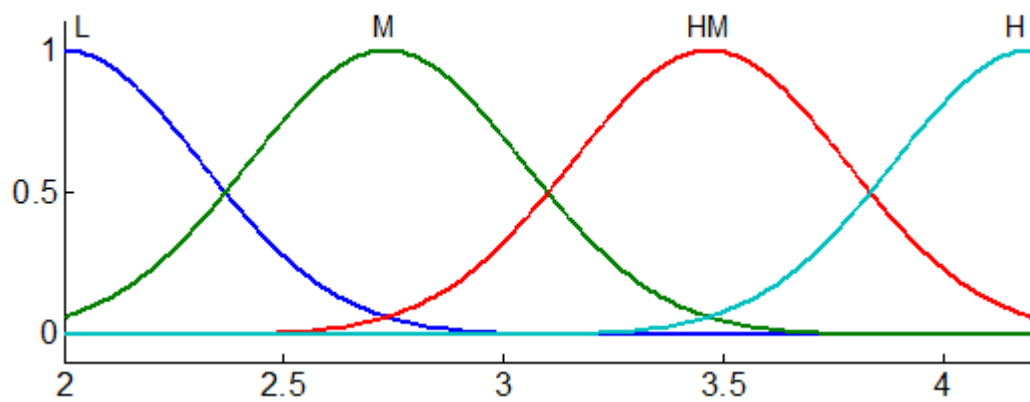


Рис. 2.7. Функції приналежності нечіткої змінної «tgD»

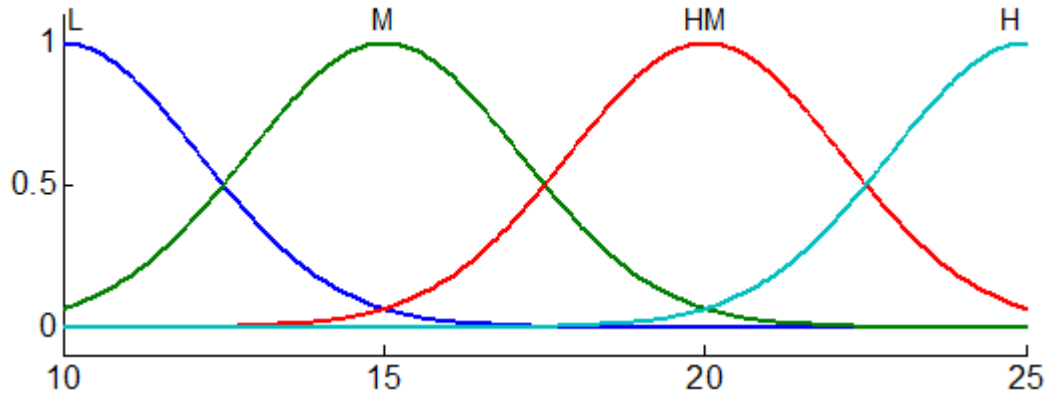


Рис. 2.8. Функції приналежності нечіткої змінної «W»

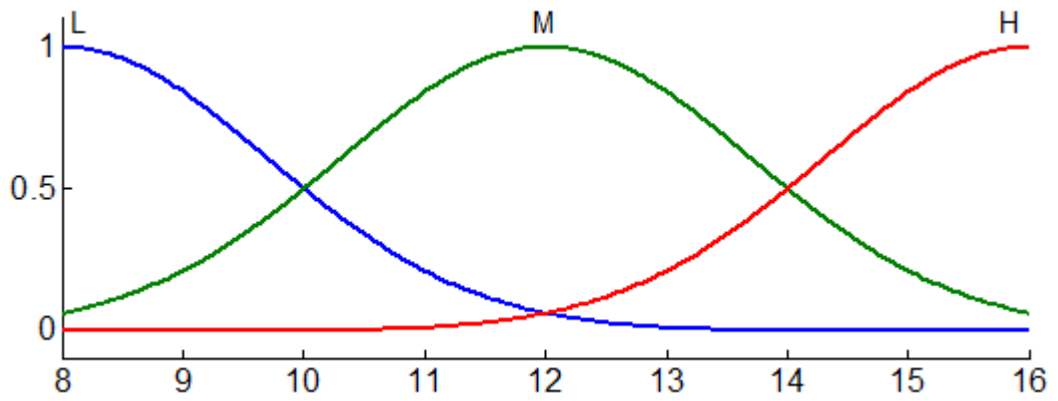


Рис. 2.9. Функції приналежності нечіткої змінної «C»

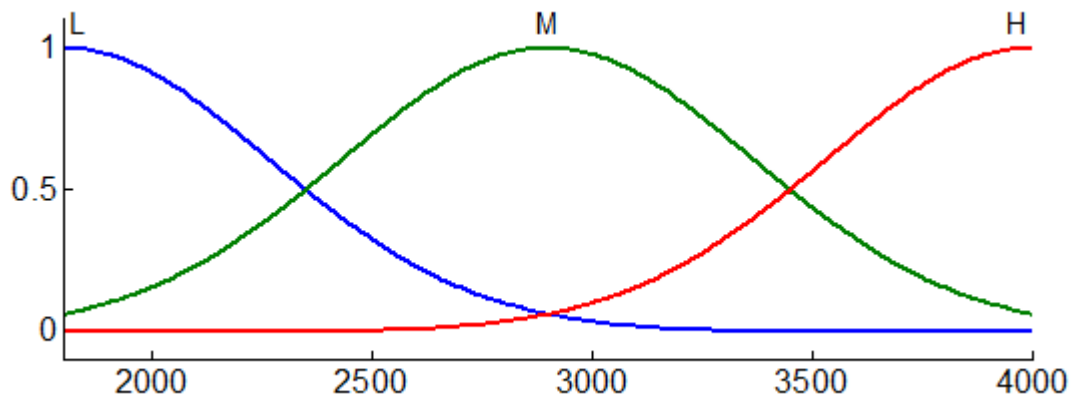


Рис. 2.10. Функції приналежності нечіткої змінної «C02»

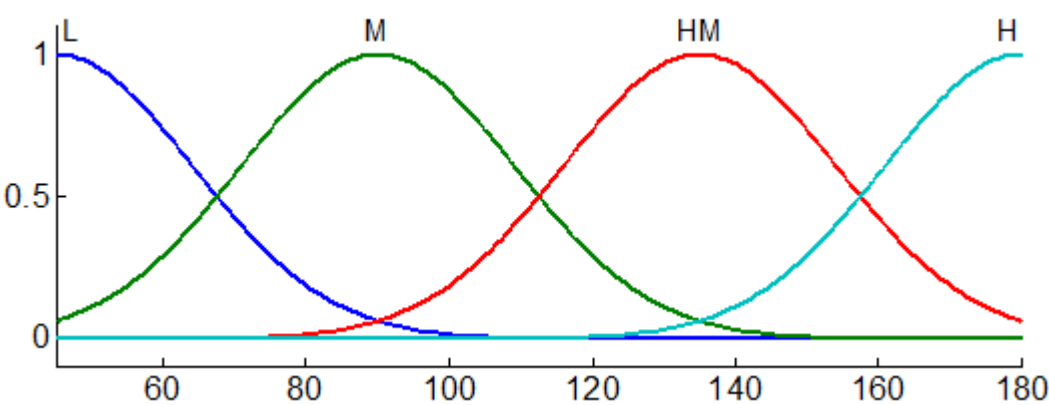


Рис. 2.11. Функції приналежності нечіткої змінної «SpHm»

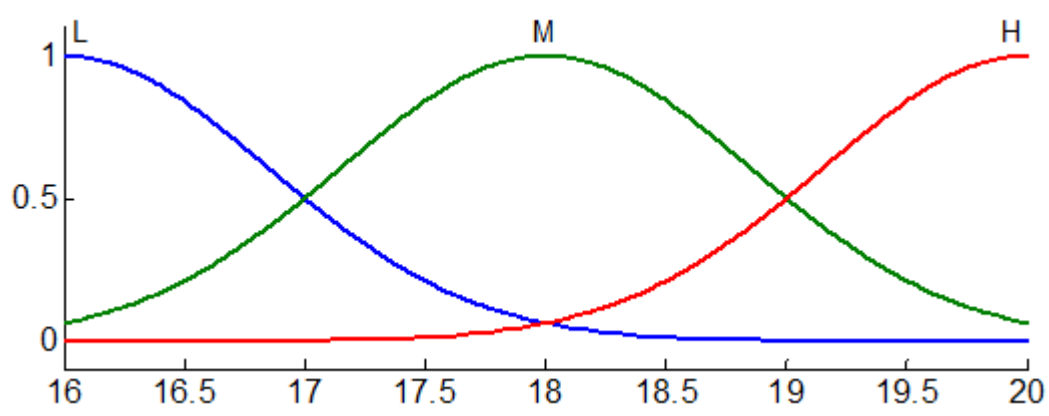


Рис. 2.12. Функції приналежності нечіткої змінної «R»

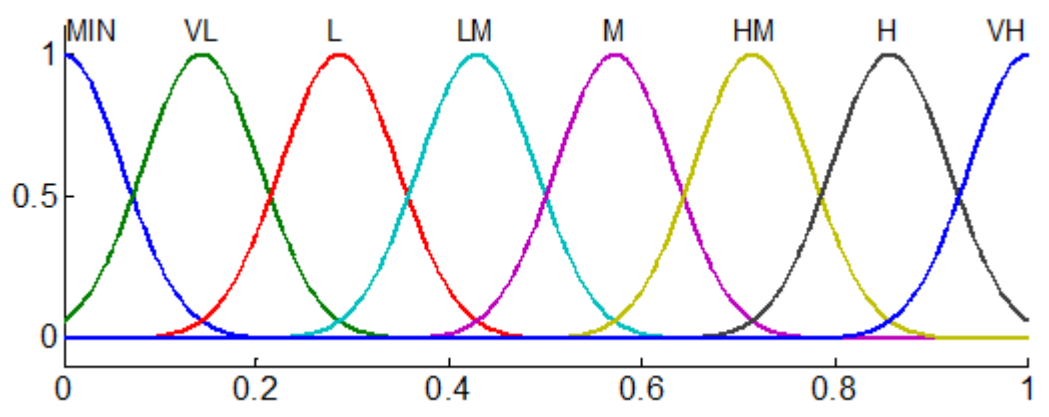


Рис. 2.13. Функції приналежності нечіткої змінної «t»

Візуалізація результатів моделювання представлена у вигляді серії тривимірних поверхонь відгуку, які демонструють залежність вихідного параметра від вхідних величин. Ці графічні репрезентації можна знайти на ілюстраціях 2.14 – 2.17.

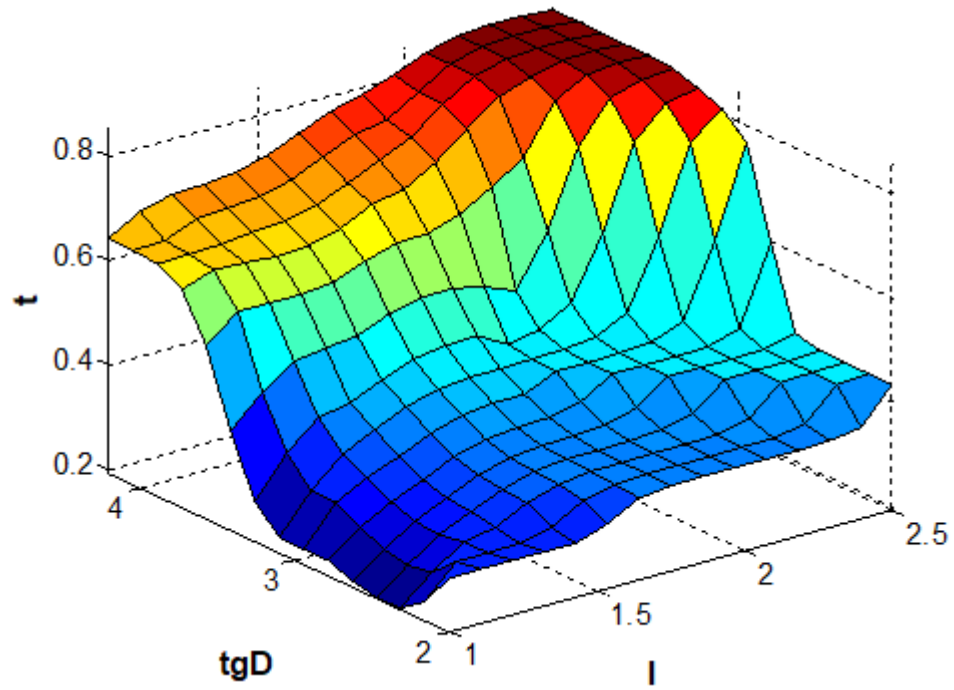


Рис. 2.14. Графічне зображення поверхні $t = f(I, \text{tgD})$

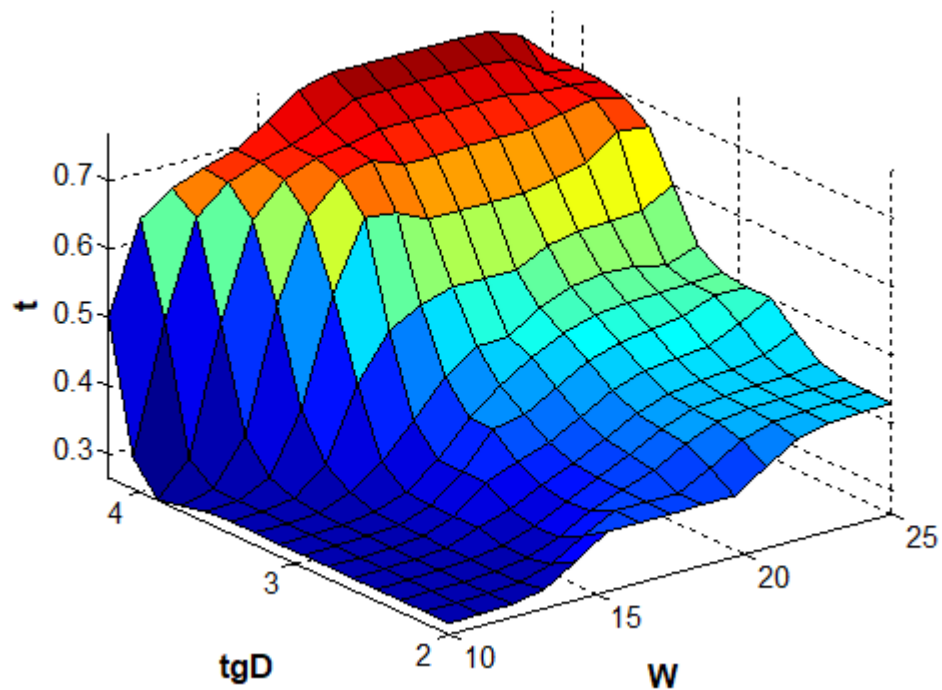


Рис. 2.15. Графічне зображення поверхні $t = f(W, \text{tgD})$

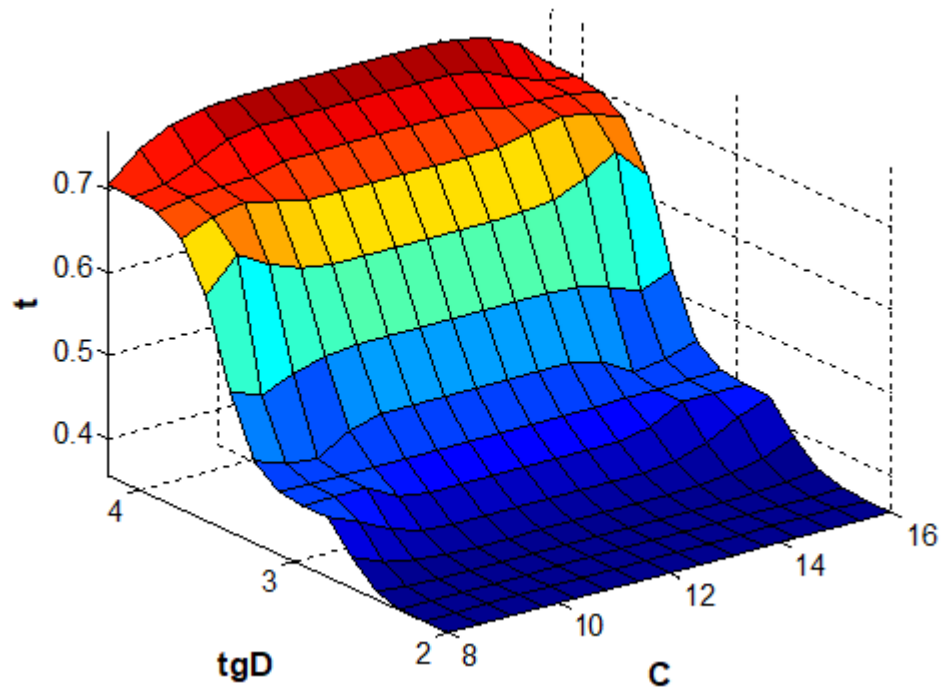


Рис. 2.16. Графічне зображення поверхні $t = f(C, \text{tgD})$

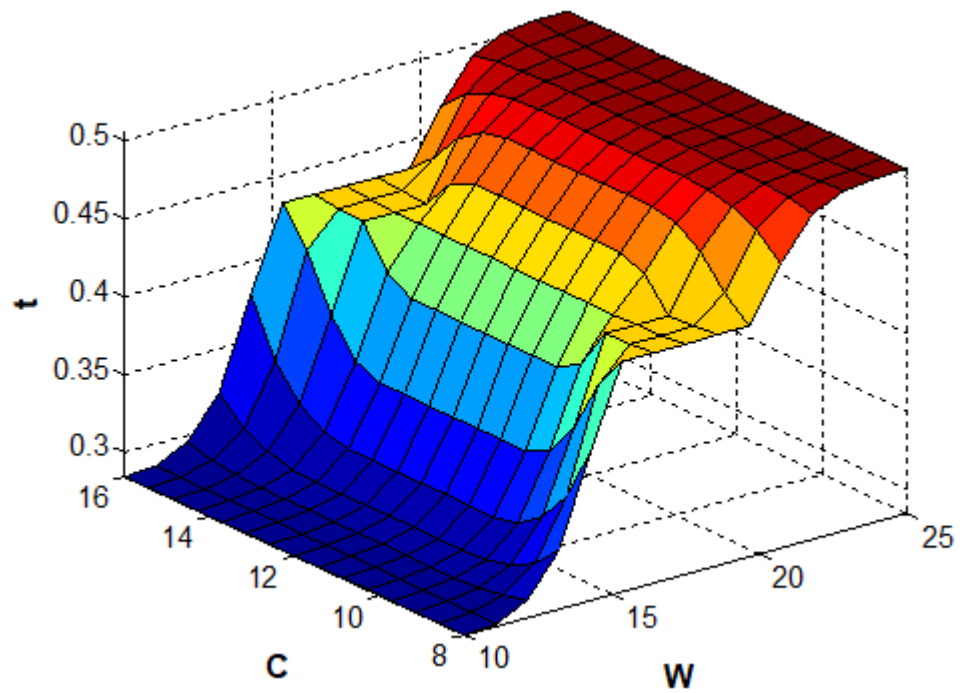


Рис. 2.17. Графічне зображення поверхні $t = f(W, C)$

Розглядаючи діаграми, представлені на рисунках 2.20-2.23, можна помітити, що відображені поверхні характеризуються гладкістю та поступовістю переходів. Це означає, що незначні коливання вхідних параметрів не призводять до раптових стрибків у значеннях вихідної величини. Аналіз отриманих результатів вказує на невисоку чутливість вихідного параметра, що можна розцінювати як сприятливу характеристику системи. Така особливість блоку визначення затримки сигналу τ_z позитивно позначається на загальній стабільності функціонування системи автоматичного керування (САК).

Аналіз результатів моделювання виявив, що для трансформації нечітких значень часової затримки τ_z у чіткі показники оптимальним є застосування центроїдного методу, також відомого як метод визначення центру ваги. Цей підхід виявився найефективнішим для дефазифікації вихідних даних, отриманих у процесі нечіткого виведення.

Ілюстрація роботи розробленої в роботі нечіткої моделі визначення затримки сигналу τ_z показана на рис. 2.18.

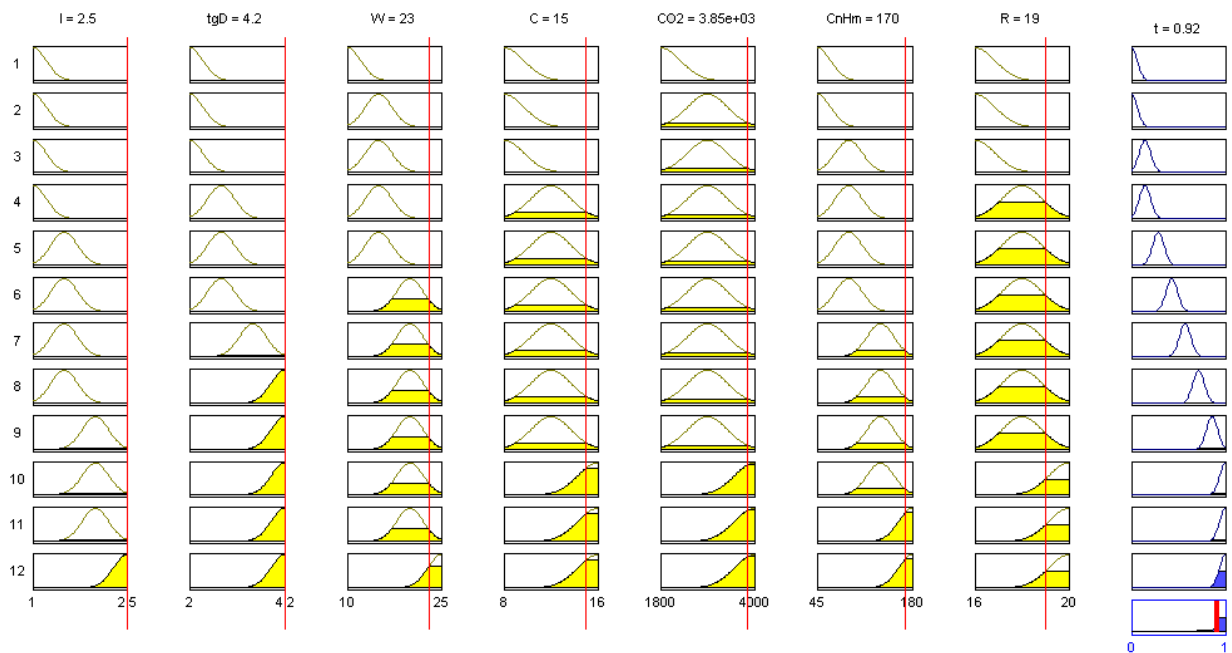


Рис. 2.18. Ілюстрація роботи нечіткої моделі визначення часової затримки перемикаання пристрою РПН

Для оцінки функціональності створеної системи автоматичного керування (САК) режимами напруги розподільчих електричних мереж (РЕМ) та визначення її ефективності, найбільш раціональним підходом є застосування комп'ютерного імітаційного моделювання.

Висновки до розділу

1. Проведений аналіз існуючих систем автоматичного керування (САК) режимами напруги розподільчих електричних мереж (РЕМ) виявив необхідність впровадження адаптивної затримки сигналу перемикання відгалуження пристрою регулювання під навантаженням (РПН) силового трансформатора. Така модифікація спрямована на досягнення балансу між зменшенням кількості перемикань механічного пристрою РПН та підтримкою належної якості електроенергії.

2. Результати експериментальних досліджень виявили, що тривалість затримки сигналу, який ініціює перемикання пристрою регулювання під навантаженням (РПН), має бути скоригована з урахуванням ступеня зношення його контактної системи. Ця залежність є критично важливою для забезпечення надійної роботи трансформаторного обладнання. При впровадженні даної методології оптимальним рішенням є врахування показників, які передаються моніторинговою системою, що відстежує функціональний стан потужного трансформаторного обладнання. Ця система збирає та аналізує критичні дані про роботу трансформатора, включаючи температуру обмоток та масла, рівень вологості, концентрацію розчинених газів, часткові розряди та інші важливі параметри.

3. У підсумку проведеного аналізу щодо вибору оптимального математичного інструментарію для розв'язання поставленої проблеми автоматизованого управління було виявлено, що для подолання найскладнішої складової цього завдання найефективнішим є застосування апарату нечіткої логіки. Цей метод дозволяє найточніше визначити

взаємозв'язок між тривалістю затримки сигналу для перемикання пристрою регулювання під навантаженням (РПН) та показниками, які надходять від системи моніторингу стану потужного трансформатора.

4. На підставі математичного інструментарію нечіткої логіки було створено комплексну математичну модель та розроблено алгоритм функціонування модуля, який визначає тривалість затримки сигналу для перемикання пристрою регулювання під навантаженням (РПН). У контексті нечіткої логіки оптимальним вибором для механізму виведення постає метод Мамдані. Цей підхід вирізняється своєю ефективністю завдяки кільком ключовим перевагам. По-перше, він відзначається відносною простотою реалізації в програмному коді. По-друге, складові цього алгоритму характеризуються інтуїтивно зрозумілою структурою та наочністю.

РОЗДІЛ 3

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ РІВНЕМ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Для оцінювання дієвості та тестування працездатності розробленої системи автоматизованого управління (САУ) режимами напруги в розподільчих електромережах (РЕМ) раціонально використати метод комп'ютерного симуляційного моделювання.

Для досягнення поставленої мети потрібно виконати такі ключові завдання:

- створити та обґрунтувати математичний апарат нечіткої логіки для системи керування рівнем напруги в розподільчих електричних мережах (РЕМ);

- розробити комплекс імітаційних комп'ютерних моделей для автоматичного керування рівнем напруги у розподільчих електричних мережах (РЕМ), спираючись на попередньо сформовані математичні алгоритми. Додатково створити модель із застосуванням нечіткої логіки для обчислення оптимального часу затримки спрацювання сигналу τ_3 ;

- виконати комплексне дослідження ефективності впровадження створеної системи автоматичного керування (САК) параметрами напруги в розподільчих електричних мережах, використовуючи розроблені комп'ютерні імітаційні моделі.

Третій розділ магістерської роботи фокусується на детальному дослідженні та практичній реалізації вищезазначених завдань.

3.1 Комп'ютерна модель нечіткої САК рівнем напруги в РЕМ

Згідно з науковими дослідженнями [89], аналіз роботи систем автоматичного регулювання можна значно спростити шляхом математичного моделювання основних процесів за допомогою диференційних рівнянь. При моделюванні та аналізі динамічних систем інженери часто надають перевагу передаточним функціям замість класичних диференційних рівнянь. Такий підхід значно спрощує математичні розрахунки завдяки застосуванню перетворення Лапласа. Під час цієї трансформації початкова функціональна схема, що відображає фізичні процеси системи, перетворюється на структурну модель. У такій моделі кожен елемент характеризується власною передаточною функцією, яка описує його динамічні властивості у частотній області. Створюючи математичну модель для систем автоматичного регулювання, важливо зосередитись на ключових елементах, які здійснюють пряме перетворення вхідних сигналів у вихідні параметри. Такий вибіркового підхід дозволяє уникнути надмірного ускладнення моделі та зберегти її практичну цінність.

Схематичне зображення, представлене на рисунку 3.1, демонструє базову структуру розподільчої електричної мережі, яка слугувала тестовим майданчиком для дослідження продуктивності створеної системи автоматичного керування параметрами напруги.



Рис. 3.1. Схема розподільчої мережі

Для моделювання системи автоматичного керування напругою трансформатора проаналізуємо функціональну схему, відображену на рисунку 3.2.

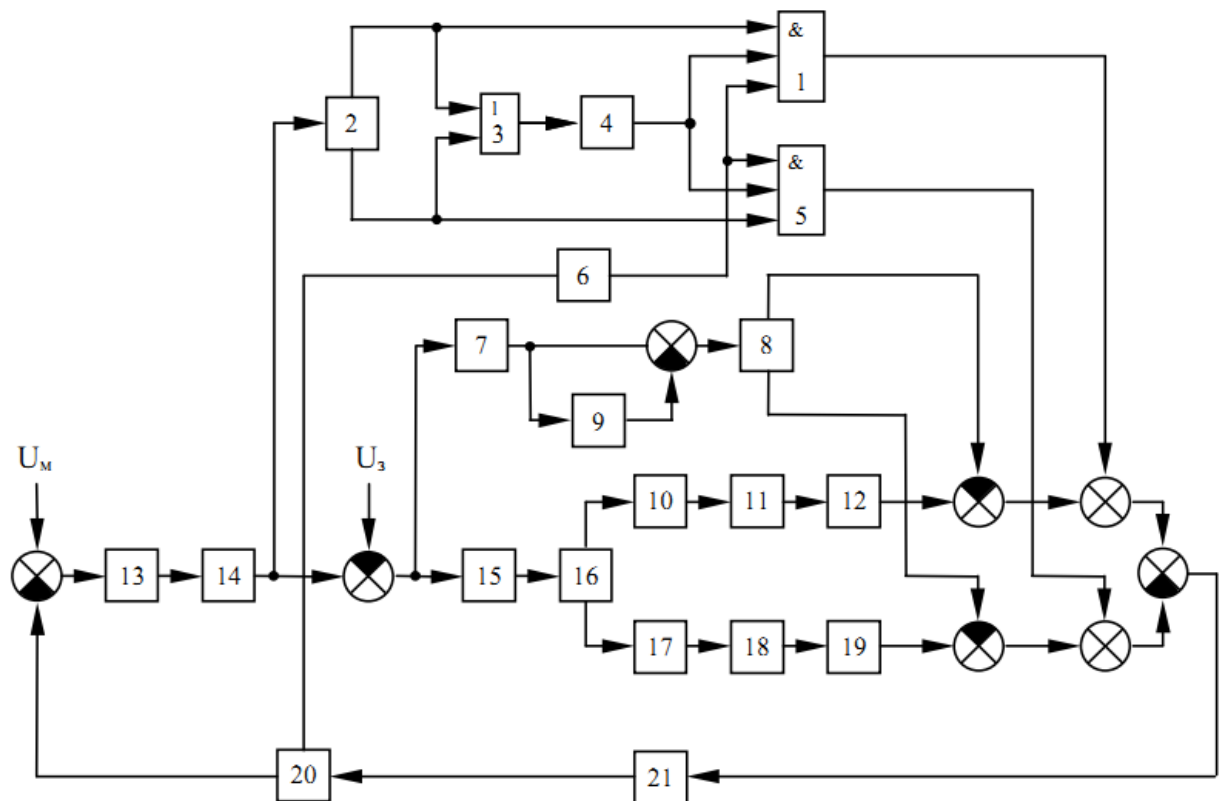


Рис. 3.2. Схема САК рівнем напруги трансформатора

Розглянемо процес створення комп'ютерної моделі системи регулювання напруги в середовищі Matlab/Simulink, де центральним елементом виступає силовий трансформатор із пристроєм РПН. Модель базується на схемі РЕМ з рисунка 3.1 та включає детальне моделювання динамічних процесів регулювання напруги.

Представлена на рисунку 3.3 узагальнена модель відображає структуру інтелектуальної системи керування напругою в розподільчій електромережі з використанням нечіткої логіки.

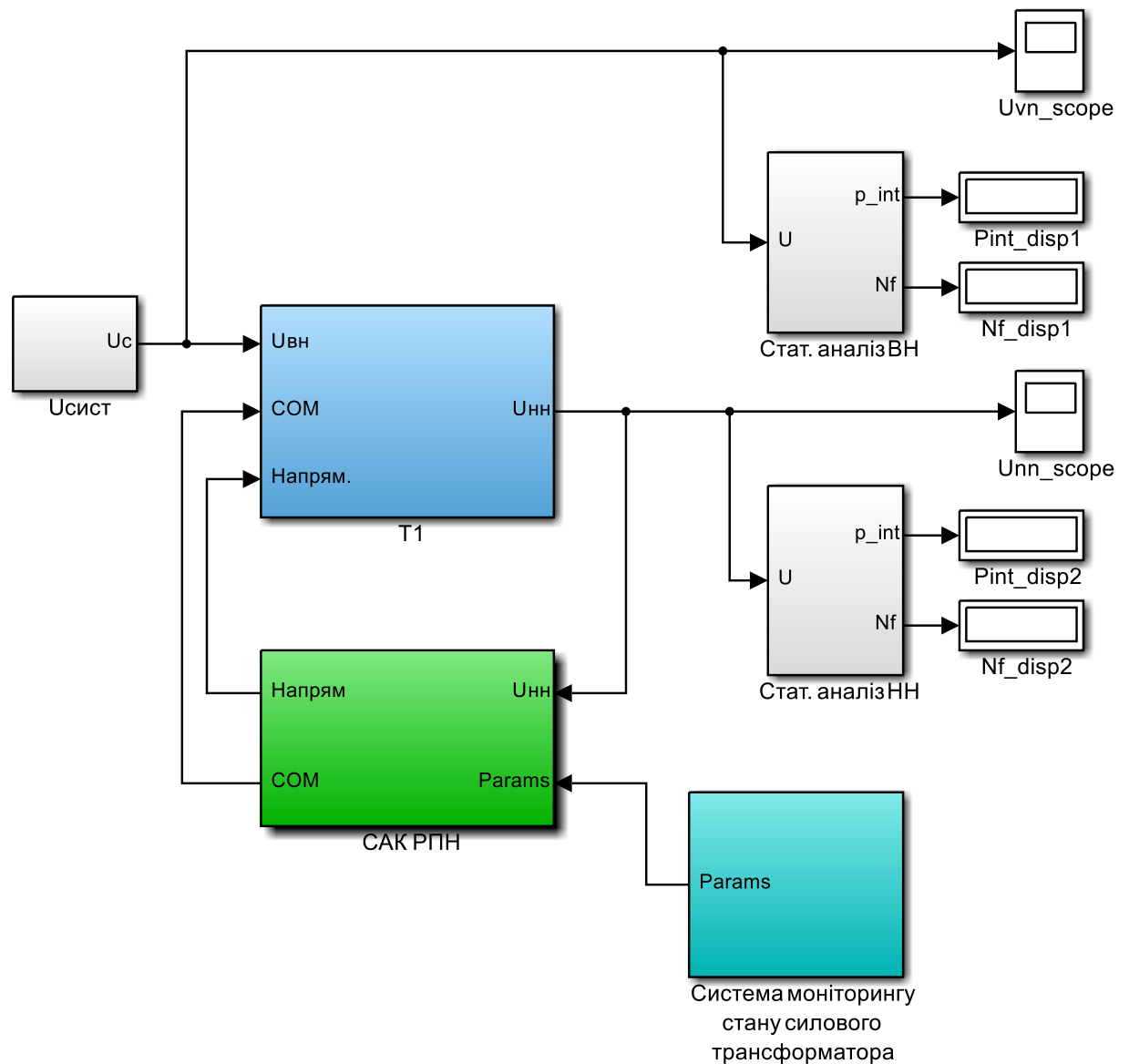


Рис. 3.3. Узагальнена комп'ютерна модель нечіткої САК
рівнем напруги в РЕМ

Зображена на рисунку 3.4 комп'ютерна модель відтворює функціонування силового трансформатора T1, оснащеного механічним пристроєм РПН. Модель враховує електромагнітні процеси в трансформаторі, динаміку перемикання відгалужень та особливості роботи РПН.

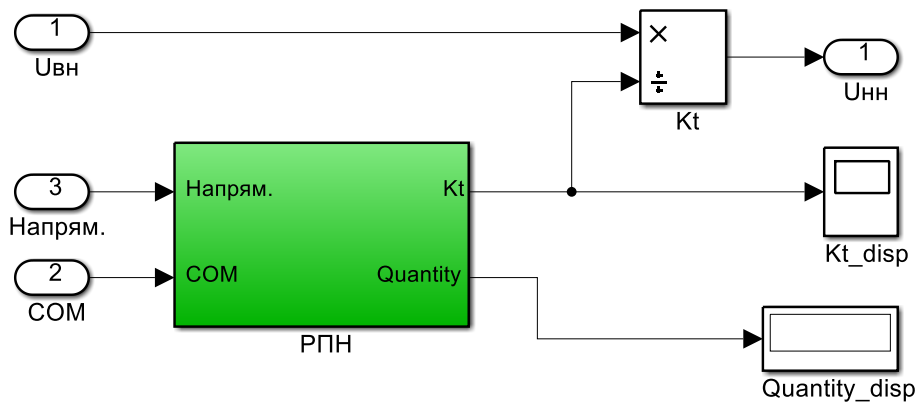


Рис. 3.4. Комп'ютерна модель силового трансформатора з РПН

На рисунку 3.5 представлена деталізована модель механічного пристрою РПН, що є ключовим компонентом розробленої комп'ютерної моделі трансформатора.

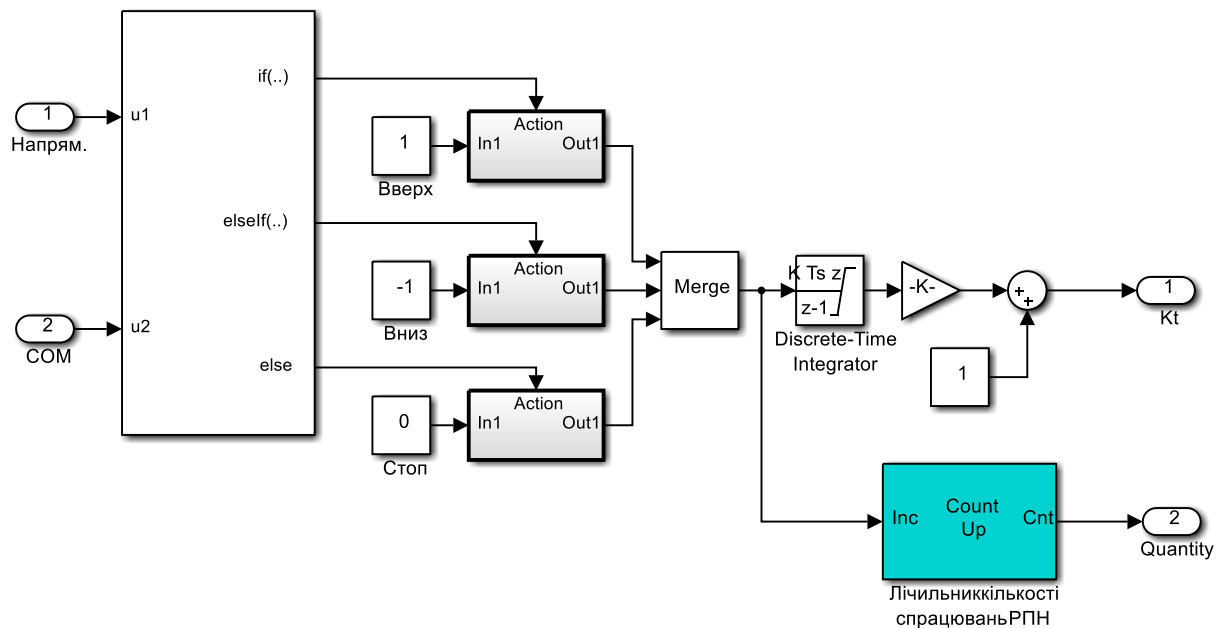


Рис. 3.5. Модель механічного РПН

гідно з рисунком 3.5, модель механічного пристрою РПН отримує два основні вхідні сигнали: команда напрямку перемикавання (варіанти "вгору", "вниз" або "стоп") та сигнал дозволу СОМ, який надає дозвіл на здійснення перемикавання. На виході блоку формуються два ключові параметри: показник співвідношення напруг первинної та вторинної обмоток силового трансформатора, а також накопичувальне значення, що відображає частоту

використання перемикаючого пристрою регулювання під навантаженням (РПН).

Схематичне зображення структури блоку моніторингу технічних параметрів силового трансформатора представлено на рисунку 3.6.

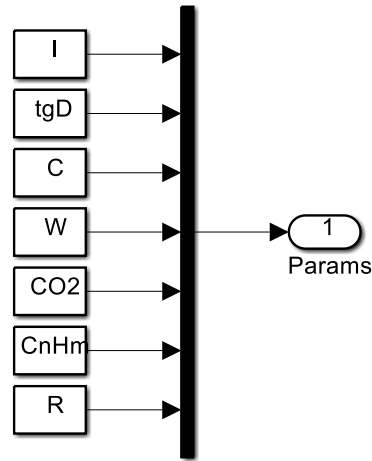


Рис. 3.6. Модель системи моніторингу стану трансформатора

З наведеної на рисунку 3.6 структурної схеми можна побачити, що розроблена модель здійснює автоматичне зчитування актуальних параметрів функціонування силового трансформатора з робочого простору програмного середовища Matlab.

Структурна схема системи автоматичного регулювання (САР) трансформаторного пристрою з РПН базується на інноваційному алгоритмі управління, представленому формулою (2.5), що відображено схематично на рисунку 3.7.

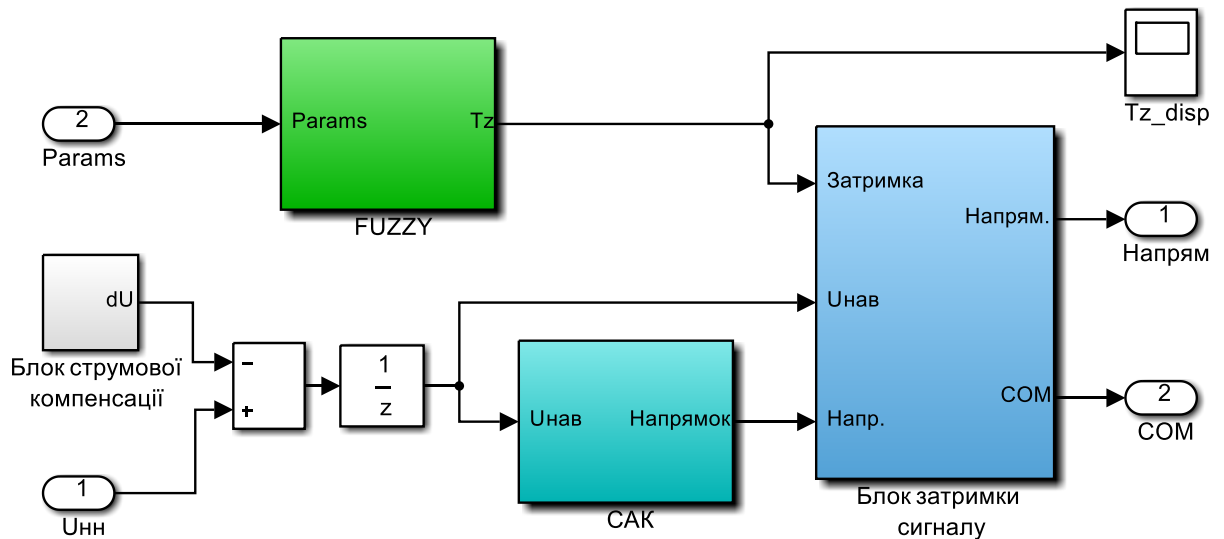


Рис. 3.7. Модель «САК РПН»

На рисунку 3.8 представлено функціональну діаграму компонента, що відповідає за ідентифікацію вектора комутації механізму регулювання під навантаженням (РПН).

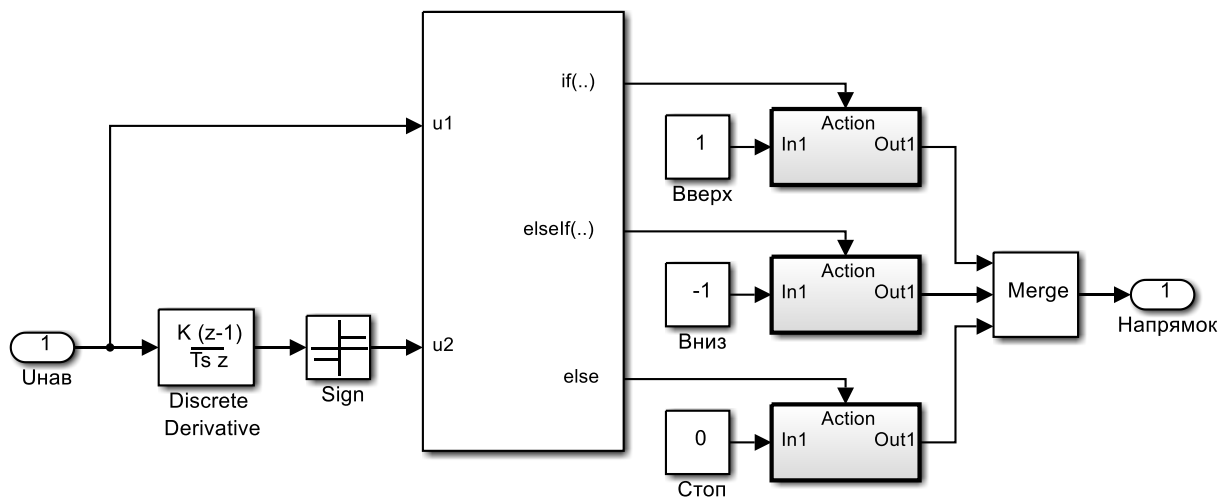


Рис. 3.8. Модель блоку визначення напрямку спрацювання РПН

Важливо підкреслити, що для обчислення амплітуди обвідної кривої ефективних значень напруги застосовується типовий модуль диференціювання дискретного сигналу під назвою «Discrete Derivative»

Зображення 3.9 демонструє віртуальну структуру модуля, відповідального за реалізацію часової затримки активації механізму регулювання під навантаженням (РПН).

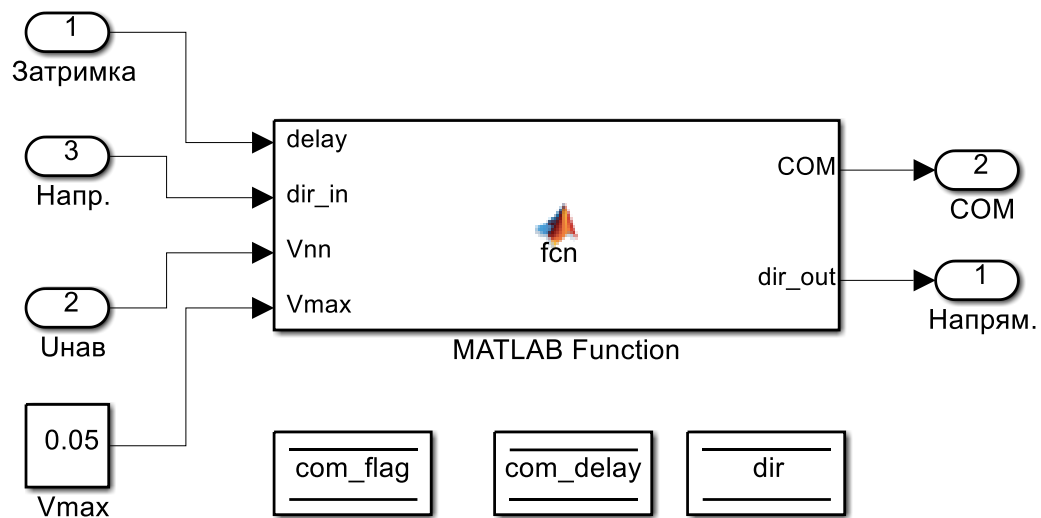


Рис. 3.9. Модель блоку адаптивної затримки часу спрацювання РПН

Реалізація функціональності модуля часової затримки сигналу здійснена за допомогою програмного забезпечення, використовуючи середовище розробки MATLAB. У цьому процесі було застосовано вбудований компонент "Matlab function", який дозволяє інтегрувати користувацький код безпосередньо в модель Simulink.

Схематичне зображення моделі блоку струмової компенсації представлено на ілюстрації 3.10.

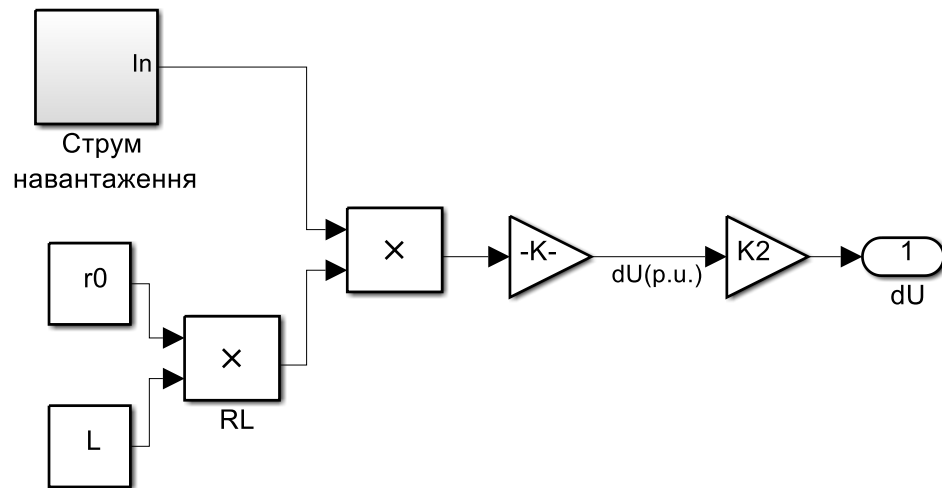


Рис. 3.10. Модель блоку, що здійснює струмову компенсацію

Структурна схема модуля для обчислення затримки сигналу комутації τ_z , зображена на рисунку 3.11.

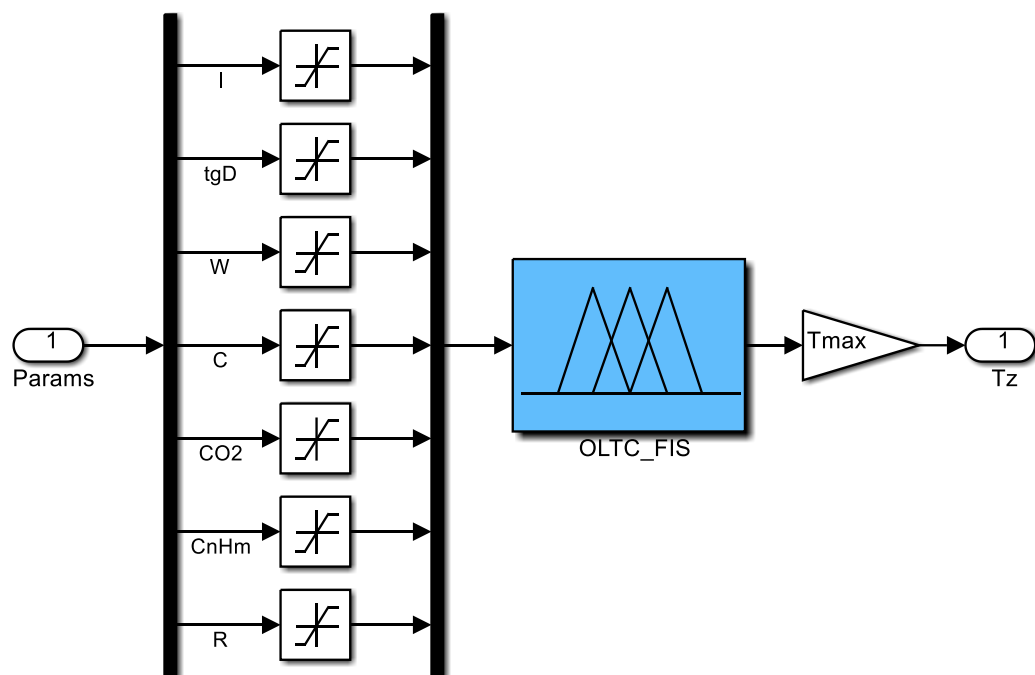


Рис. 3.11. Модель блоку визначення τ_z

Ключовою складовою представленої моделі виступає модуль "OLTC_FIS", що реалізує нечітке логічне виведення. Цей компонент базується на методології Мамдані, яка є однією з найпоширеніших у сфері нечіткої

логіки. Аналізуючи схему на рисунку 3.10, можна побачити, що модуль отримує вхідні дані від комплексу моніторингу силового трансформатора. Ці параметри слугують основою для подальших обчислень. Результатом роботи блоку є величина τ_z , яка відображає розрахований час затримки.

На рисунку 3.12 представлено схематичне зображення модуля, призначеного для обчислення статистичних характеристик сталого відхилення трифазної напруги, позначеного як $V, \%$ та вираженого у відсотках.

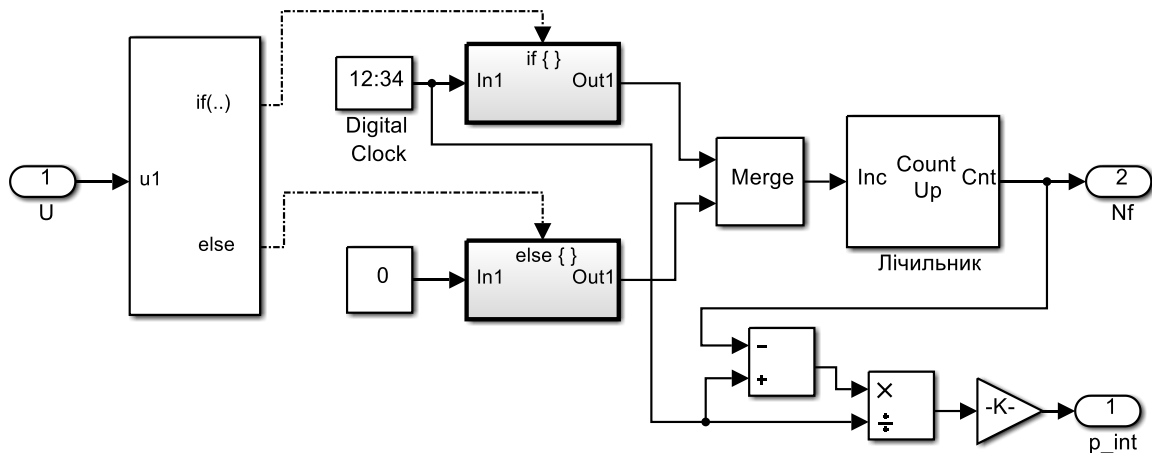


Рис. 3.12. Модель блоку розрахунку статистичних показників $V, \%$

3.2 Комп'ютерне моделювання роботи САК рівнем напруги в РЕМ та визначення її ефективності

Оцінку результативності впровадження новоствореної системи автоматичного керування (САК) напругою в розподільчих електромережах (РЕМ) найефективніше здійснити за допомогою комп'ютерного моделювання.

Для проведення порівняльного аналізу використовувалась система автоматичного керування (САК) параметрами напруги розподільчих електричних мереж (РЕМ). Ця система впроваджує алгоритм управління, представлений формулою (2.5), враховуючи сталу часову затримку при роботі регулятора під навантаженням (РПН).

Експериментальне дослідження охопило комплексне тестування як базової, так і новоствореної системи автоматичного керування. Було

проведено низку обчислювальних експериментів з варіюванням параметрів, які передаються системою моніторингу технічного стану силового трансформатора.

Моделювання включало різноманітні сценарії, що відображають відмінні рівні технічного зношення перемикаючого пристрою РПН.

У таблиці 3.1 систематизовано діагностичні параметри, що надходять від сенсорної системи моніторингу технічного стану силового трансформатора, які відображають різні стадії експлуатаційного зносу регулятора напруги під навантаженням (РПН).

Таблиця 3.1. Вхідні параметри САК

№ з/п	Позначення	Числові значення параметрів		
		«Новий» РПН	РПН, що деякий час знаходився в роботі	«Зношений» РПН
1	I	1,50	2,20	2,50
2	tgD	2,10	3,00	4,20
3	W	14,00	12,30	23,00
4	C	11,00	15,60	15,00
5	CO2	2050,00	2650,00	3850,00
6	CnHm	84,50	156,00	170,00
7	R	16,40	17,00	19,00

Графічна візуалізація результатів комп'ютерного моделювання представлена на рисунках 3.13-3.19, де відображено порівняльні характеристики функціонування двох систем автоматичного керування (САК) режимами напруги розподільчих електричних мереж (РЕМ) при експлуатації

технічно зношеного регулятора напруги під навантаженням (РПН).

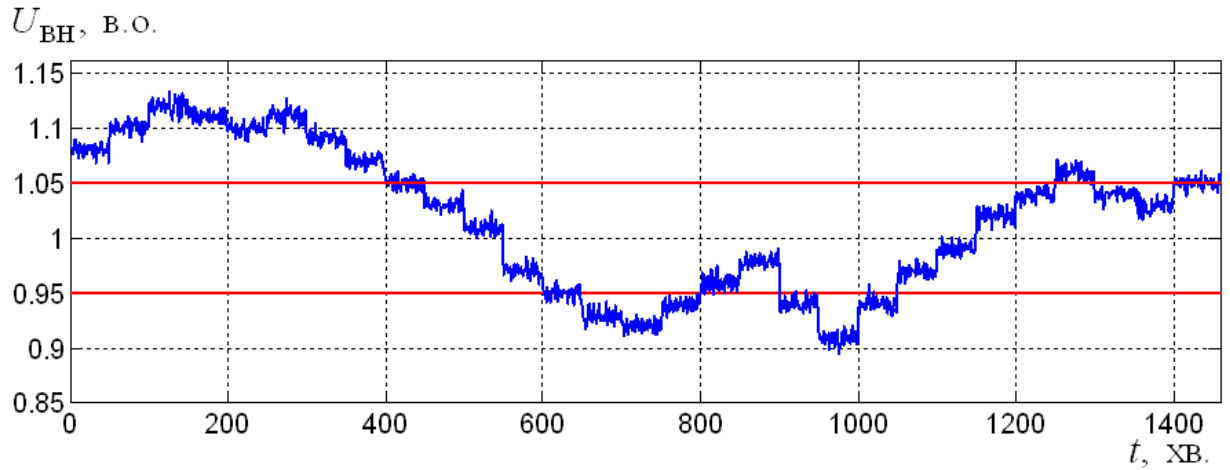


Рис. 3.13. Графік зміни $V, \%$ (в.о.) на стороні ВН

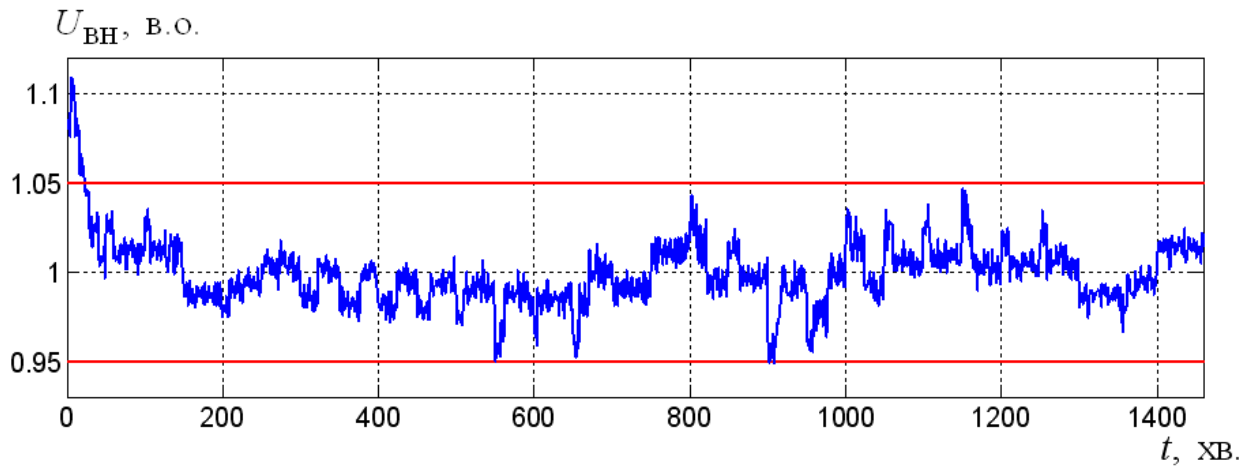


Рис. 3.14. Графік зміни U , (в.о.) на стороні НН (базова САК)

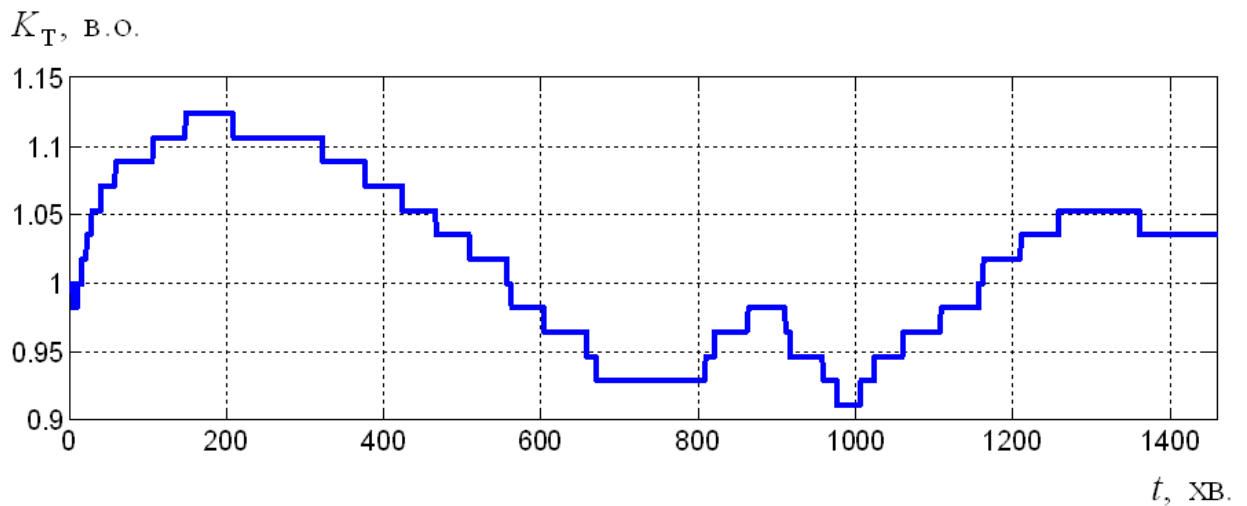


Рис. 3.15. Графік зміни коеф. трансформації трансформатора (базова САК)

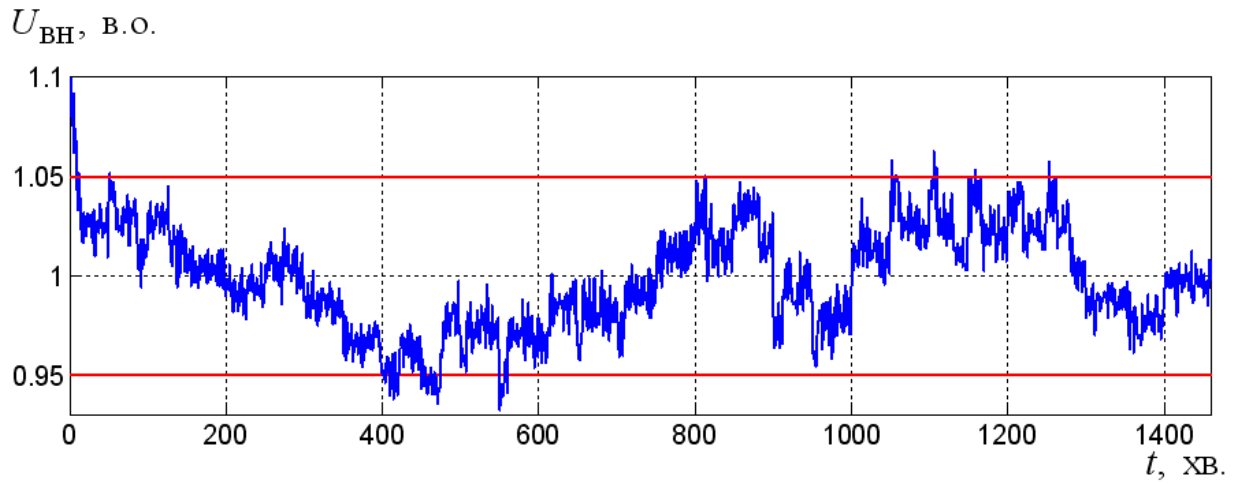


Рис. 3.16. Графік зміни U , (в.о.) на стороні НН (розроблена САК)

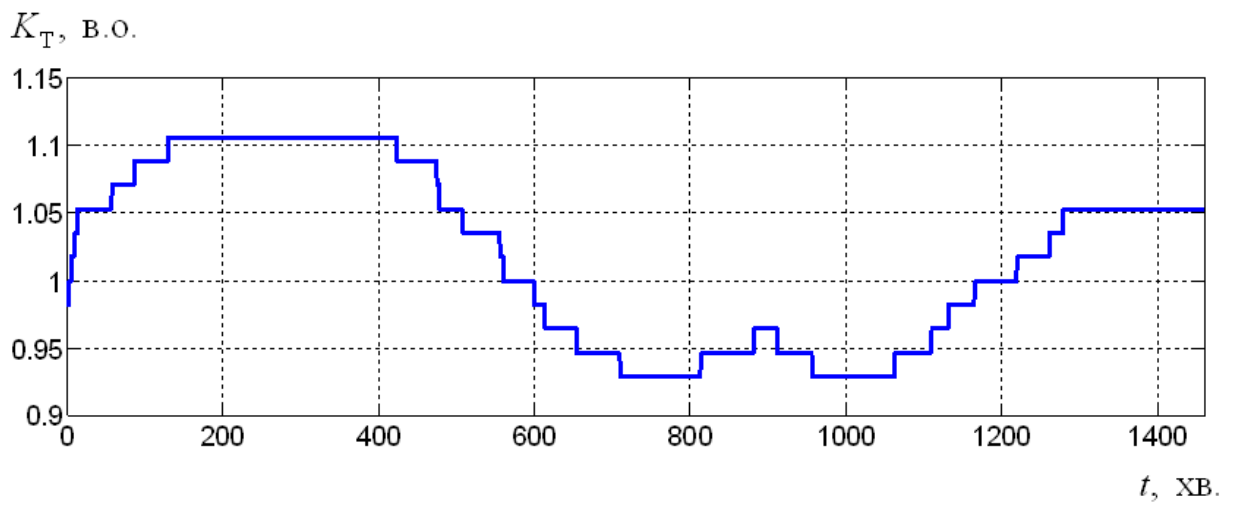


Рис. 3.17. Графік зміни коеф. трансформації трансформатора (розроблена САК)

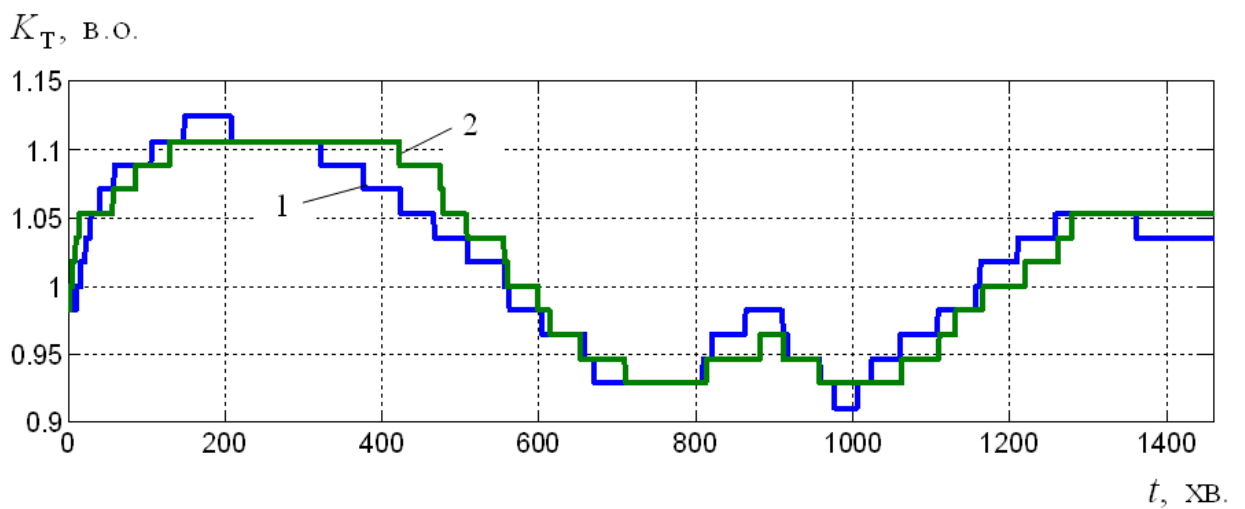


Рис. 3.18. Графік зміни коеф. трансформації трансформатора:
1 – базова САК; 2 – розроблена САК.

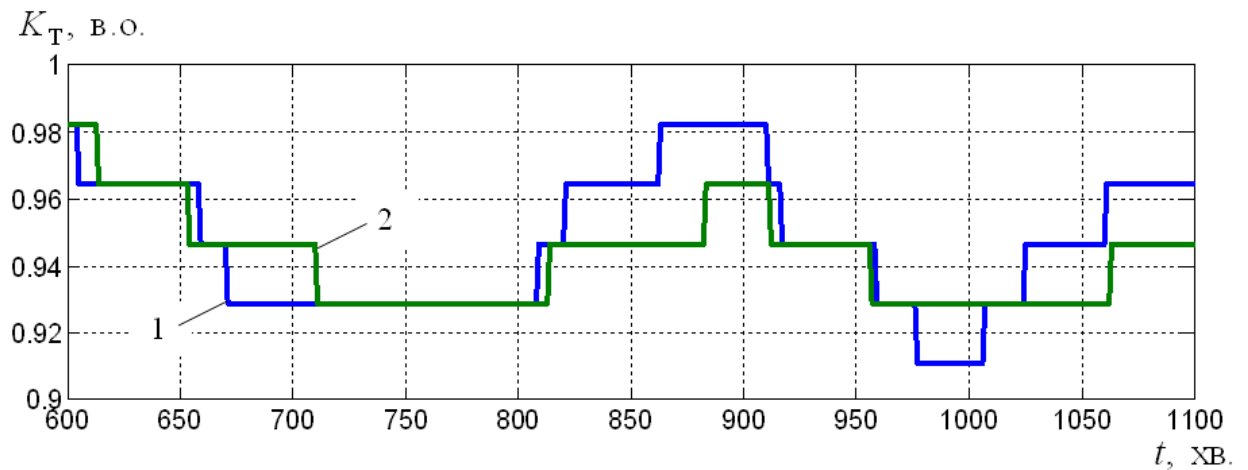


Рис. 3.19. Графік зміни K_T :
1 – базова САК; 2 – розроблена САК.

У таблиці 3.2 представлено узагальнені результати статистичного аналізу даних, отриманих шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання обох систем автоматичного керування при роботі з механічно зношеним перемикаючим пристроєм РПН трансформатора.

Таблиця 3.2. Результати обробки даних моделювання

№ з/п	Варіант САК	Інт. ймов., $P(x \geq 0,95)$, в.о.	К-сть не потраплянь в норм. доп. межі, $N_{\text{н.доп.}}$	Кількість спрацювань РПН, $N_{\text{РПН}}$
1.	Сторона високої напруги трансформатора	0,430	832	-
2.	Базова САК	0,980	26	37
3.	Розроблена САК	0,960	53	28

Аналіз результатів комп'ютерного моделювання демонструє, що обидві досліджувані системи - базова система автоматичного керування та інноваційна нечітка САК - забезпечують регулювання напруги в межах, регламентованих стандартом. При цьому усталене відхилення напруги

повністю відповідає нормативним вимогам щодо якості електричної енергії. Впровадження системи автоматичного керування з адаптивним нечітким алгоритмом визначення часової затримки демонструє значний технологічний прорив - скорочення кількості комутацій зношеного регулятора напруги під навантаженням на 19,4%. Досягнуте покращення експлуатаційних характеристик реалізується насамперед через впровадження інноваційного механізму адаптивного регулювання часової затримки комутацій. Ключовою особливістю цього підходу є динамічне налаштування параметрів спрацювання відповідно до поточного технічного стану перемикаючого пристрою РПН силового трансформатора.

Висновки до розділу

1. При створенні математичного опису системи регулювання напруги було використано комплексний підхід, що поєднує класичний метод передаточних функцій із сучасним інструментарієм теорії нечітких множин. Розроблені математичні моделі стали фундаментом для реалізації комп'ютерних імітаційних моделей інноваційної системи автоматичного керування.

2. У процесі дослідження ефективності запропонованої нечіткої системи керування напругою в розподільчих електричних мережах було створено комплекс імітаційних моделей у середовищі "Matlab/Simulink". Цей програмний інструментарій дозволив реалізувати розроблені закони автоматичного регулювання та впровадити інноваційний нечіткий алгоритм розрахунку часової затримки комутацій РПН.

3. Проведений статистичний аналіз експериментальних даних, отриманих шляхом комп'ютерного моделювання, підтвердив відповідність нормативним вимогам обох досліджуваних систем керування. Як класична базова САК, так і новостворена нечітка система забезпечують утримання усталеного відхилення напруги в регламентованих межах. Проте, при

використанні системи автоматичного керування (САК), що включає адаптивний нечіткий алгоритм для визначення інтервалу затримки активації, було зафіксовано значне зменшення кількості спрацювань пристрою регулювання під навантаженням (РПН), який вже зазнав певного зносу. Зокрема, кількість активацій скоротилася на 19,4%, що є вагомим аргументом на користь впровадження такої системи.

РОЗДІЛ 4

ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ НЕЧІТКОЇ САК РІВНЕМ НАПРУГИ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Для перевірки ефективності створеної системи автоматичного керування (САК), а також для підтвердження теоретичних висновків та результатів комп'ютерного моделювання її функціонування, потрібно реалізувати наступний комплекс завдань:

1. Створіть архітектурний план мікропроцесорної системи автоматичного керування (САК) для регулювання параметрів напруги в розподільчих електричних мережах (РЕМ), застосовуючи новітні компоненти. Здійсніть вибір сучасних датчиків струму та напруги для інтеграції у вимірювальні канали автоматизованої системи управління.

2. Розроблення принципової схеми мікропроцесорної системи автоматичного керування (САК) на основі запропонованих структурних схем та алгоритмів визначення керуючих впливів - це важливий етап у створенні ефективної системи управління режимами напруги в розподільчих електричних мережах.

Четверта частина дослідження зосереджена на розв'язанні зазначених проблем.

4.1 Структурна схема мікроконтролерної САК рівнем напруги в РЕМ

На підставі попередньо здійснених експериментів та аналізу було сформовано архітектуру системи автоматичного керування (САК) параметрами напруги. Обидва ці компоненти - структура та алгоритм - готові до впровадження на практиці.

Узагальнена структурна схема системи автоматичного керування (САК) режимами напруги розподільчих електричних мереж (РЕМ) представлена на рисунку 4.1.

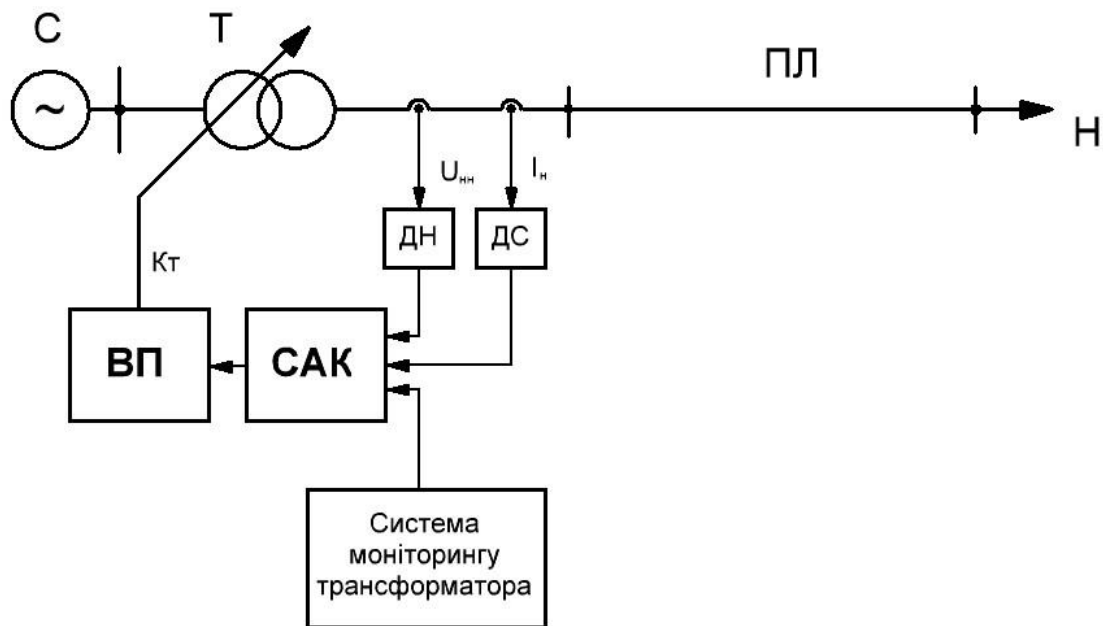


Рис. 4.1. Схема РЕМ з силовим трансформатором

Для первинного виміру струму рекомендується використовувати трансформатори струму як основні перетворювачі. Ці прилади мають низку значних переваг порівняно з альтернативними методами вимірювання, серед яких можна виділити наступні ключові аспекти:

- універсальність застосування даних сенсорів відкриває широкі можливості - вони ефективно функціонують не тільки як елементи вимірювальних каналів у запропонованій системі автоматичного керування (САК), але й забезпечують моніторинг ключових параметрів режиму районних електричних мереж (РЕМ) та виконують функції релейного захисту обладнання.

- висока популярність цих перетворювачів, їх доступність та різноманітність модифікацій на ринку дозволяють обрати оптимальний варіант для будь-яких технічних потреб;

- висока точність вимірювань при роботі з широким спектром величин характеризується класом точності 0,5 і вище, що гарантує надійні результати в промислових умовах;

За умови проведення вимірювань у мережі низької напруги 0,4 кВ, можливе пряме підключення вимірювальних приладів без застосування трансформаторів напруги. У таких системах низької напруги зазвичай реалізується безпосереднє з'єднання вимірювальних пристроїв з електричною мережею.

Трансформатори серії ТЛК є найбільш поширеними в районних електричних мережах завдяки їх надійності, високій точності та компактній конструкції.

Оскільки вимірювання напруги виконується на низьковольтній стороні 0,4 кВ, використання трансформаторів напруги в цьому випадку є необґрунтованим та економічно недоцільним, адже можливе пряме підключення вимірювальних приладів.

Структурну схему мікропроцесорного блоку системи автоматичного керування (САК) для регулювання режимів напруги в районних електричних мережах (РЕМ) проілюстровано на рисунку 4.2.

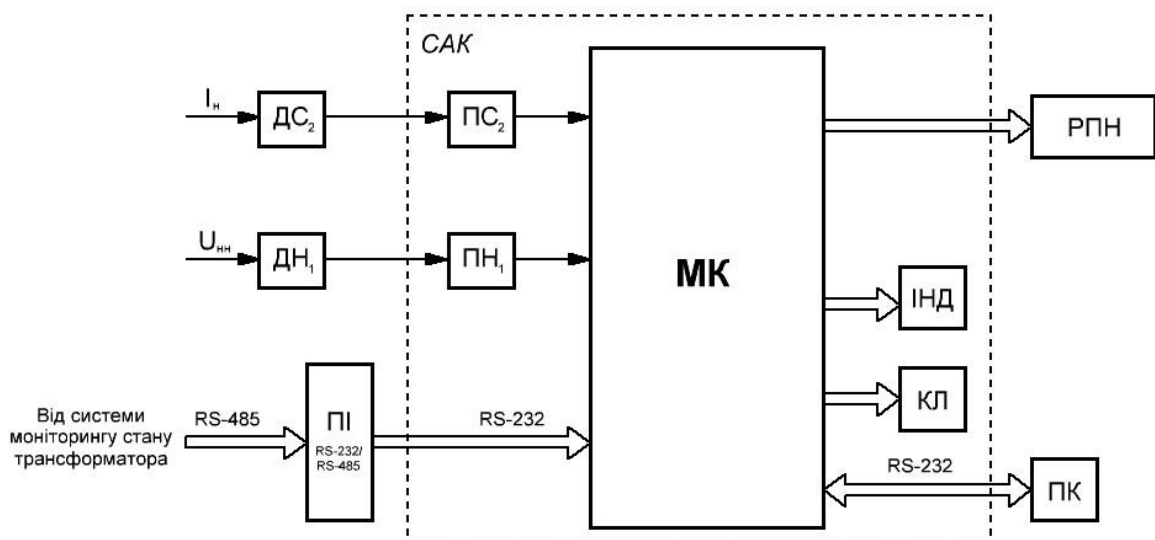


Рис. 4.2. Структурна схема мікроконтролерної САК
рівнем напруги РЕМ

4.2 Принципова схема мікроконтролерної САК рівнем напруги в РЕМ

З усього спектру доступних засобів промислової автоматизації для реалізації системи автоматичного управління пристроєм регулювання під навантаженням (РПН) було обрано оптимальне поєднання компонентів: мікроконтролер Atmega162 та спеціалізована мікросхема ADE7758 для високоточного вимірювання трифазних електричних параметрів мережі.

Мікроконтролер Atmega162 - це енергоефективний 8-бітний процесор на основі вдосконаленої AVR RISC архітектури, що демонструє високу продуктивність - 1 MIPS (мільйон операцій в секунду) при тактовій частоті 1 МГц завдяки виконанню інструкцій за один такт. Особливістю контролера є можливість оптимізації енергоспоживання через регулювання тактової частоти, що робить його ідеальним для автономних систем керування. Мікроконтролер Atmega162 від компанії Atmel (нині належить Microchip Technology) вирізняється багатим набором функціональних можливостей. Його архітектура включає 16 кілобайт флеш-пам'яті, яка підтримує внутрішньосхемне програмування та одночасне зчитування під час запису. Це дозволяє ефективно оновлювати прошивку пристрою без переривання його роботи.

Для зберігання налаштувань та інших важливих даних Atmega162 оснащений 512 байтами енергонезалежної пам'яті EEPROM. Оперативна пам'ять представлена 1 кілобайтом статичного ОЗП, що забезпечує швидкий доступ до тимчасових даних під час виконання програми. Наведені властивості мікроконтролера створюють сприятливі умови для втілення створеної методики автономного керування механізмом регулювання під навантаженням (РПН) потужного трансформатора.

З метою точного визначення ефективних величин однофазних і лінійних напруг, застосовано інтегральну схему ADE7758 - прецизійний аналізатор трифазної електромережі. Інтегральний пристрій ADE7758 включає в себе

прецизійні аналого-цифрові перетворювачі, числовий інтегровальний блок та інтерфейс SPI для послідовного зв'язку. Цей компонент здатний здійснювати обробку сигналів, що є критичною для точного визначення активної, реактивної та повної потужності, а також для обчислення ефективних значень електричного струму й напруги.

Похибка при вимірюванні середньоквадратичного значення напруги не перевищує 0,5%, що свідчить про високу точність пристрою. ADE7758 широко застосовується в сучасних електронних лічильниках енергії та системах моніторингу електромереж.

Для візуалізації інформації у пристрої було застосовано рідкокристалічний дисплей моделі WH1602B.

Схематичне представлення електричних з'єднань модуля управління параметрами напруги PEM можна побачити на ілюстрації 4.3.

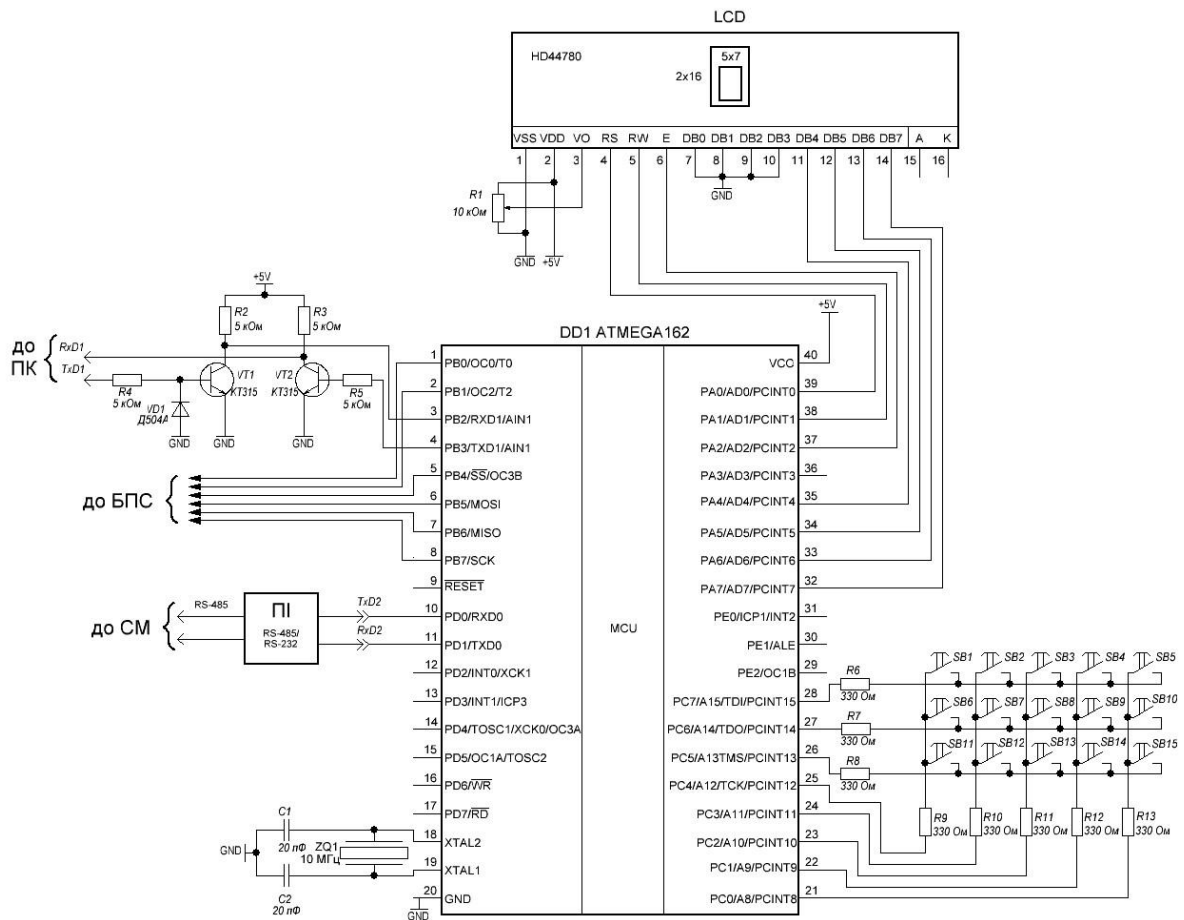


Рис. 4.3. Принципова схема блоку керування рівнем напруги в PEM

Втілення логіки функціонування програмного комплексу САК здійснено з використанням мови програмування C. Для створення та налагодження коду було застосовано спеціалізоване середовище розробки CodeVisionAVR, яке оптимізоване для роботи з однокристальними мікроконтролерами [102]. Програмний комплекс системи автоматичного керування (САК) зосереджений на реалізації блоку регулятора, що становить ядро всієї системи. Вхідні дані для обробки надходять з інтегрованої схеми ADE7758 через високошвидкісний послідовний інтерфейс SPI (Serial Peripheral Interface).

Схематичне представлення електричних з'єднань модуля перетворення сигналів (МПС) детально відображено на ілюстрації 4.4.

Як було раніше зазначено, оптимальним рішенням для конвертації ефективних значень струмів та напруги з аналогового формату в цифровий є застосування спеціалізованого інтегрального компонента – мікросхеми ADE7758. Цей високотехнологічний пристрій забезпечує необхідний рівень точності та швидкості обробки даних, що повністю відповідає вимогам системи автоматичного керування (САК).

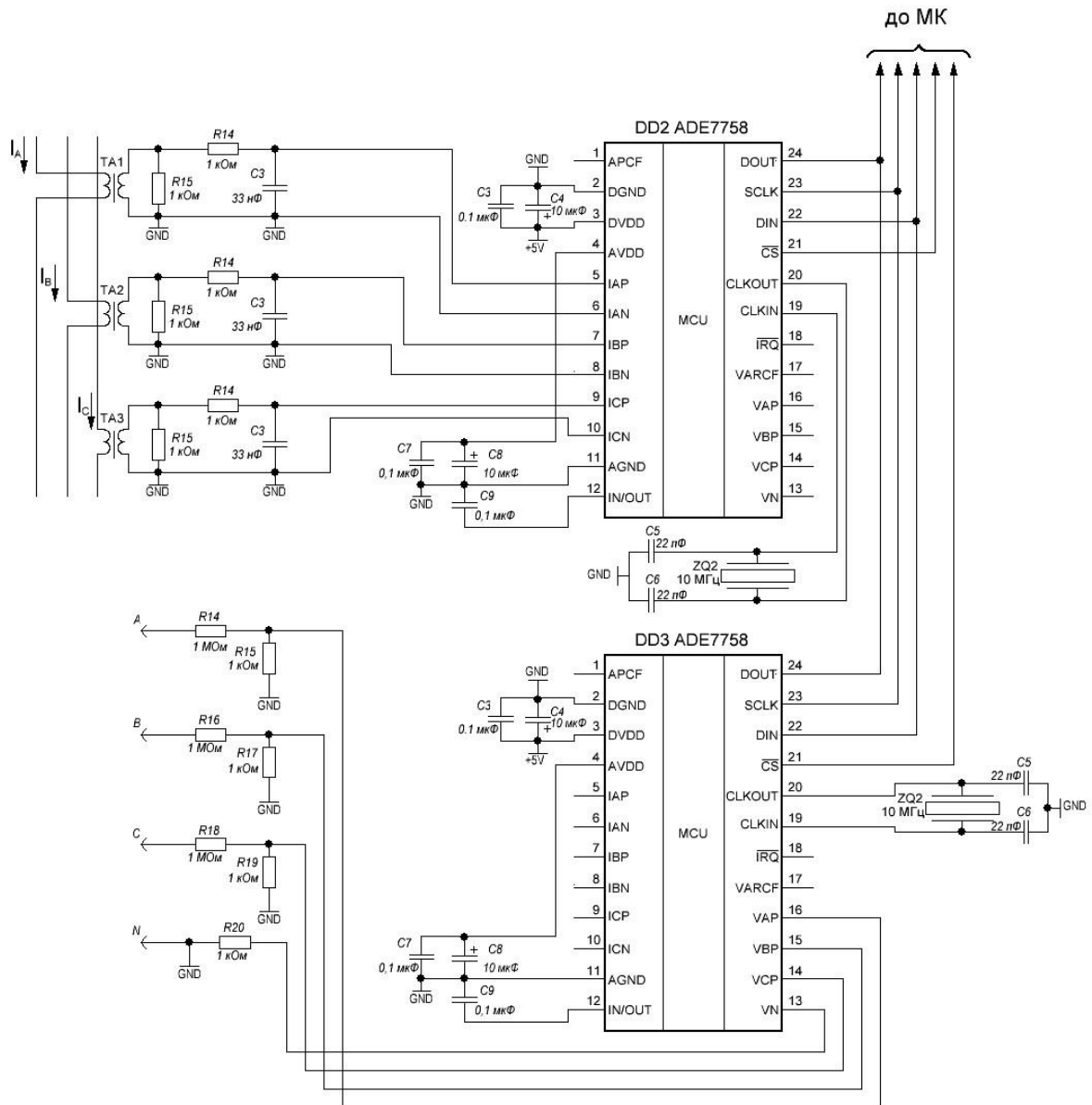


Рис. 4.4. Принципова схема блоку перетворення сигналів

Висновки до розділу

1. Запропонована система інтелектуального управління рівнями напруги в розподільчих електричних мережах базується на використанні нечіткої логіки та може бути впроваджена за допомогою сучасної елементної бази. Розроблений варіант схемотехнічного рішення для системи автоматичного контролю напруги в розподільчих електромережах відрізняється оптимальною архітектурою та економічною доцільністю.

2. Інтеграція трансформаторів струму та напруги як первинних сенсорів у вимірювальних каналах системи автоматичного контролю забезпечує низку значних технічних та експлуатаційних переваг. Такий підхід до побудови САК розподільчих електромереж дозволяє досягти гальванічної розв'язки силових та вимірювальних ланцюгів, що суттєво підвищує безпеку експлуатації та надійність обладнання.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ

Для охорони праці в електроустановках важливе значення має впровадження заходів, спрямованих на зниження ризиків ураження електричним струмом. Одним із ключових засобів є захисне заземлення – це спеціальне електричне з'єднання з землею неструмоведучих металевих частин, які можуть опинитися під напругою через замикання на корпус або інші причини, наприклад, індуктивний вплив чи удар блискавки. Головна мета захисного заземлення – усунення небезпеки ураження струмом при контакті з обладнанням, яке стало небезпечним через виникнення напруги на його поверхні.

Захисне заземлення відрізняється від робочого заземлення, що забезпечує нормальну роботу електроустановки, та заземлення блискавкозахисту, яке захищає від струмів блискавки. Принцип дії захисного заземлення полягає в зниженні потенціалу обладнання до безпечного рівня, що запобігає ураженню працівників. Воно застосовується як в мережах до 1000 В, так і в мережах напругою понад 1000 В. Захисне заземлення є одним із найпростіших і водночас ефективних засобів захисту від ураження струмом. Еквівалентом землі може слугувати вода ріки чи моря, кам'яне вугілля в корінному заляганні тощо.

Для виконання безпечних робіт перед початком обслуговування електроустановок необхідно здійснити низку технічних заходів. Серед них — відключення обладнання, що виводиться в ремонт, встановлення тимчасових огорож та попереджувальних знаків, таких як «Не вмикати — працюють люди». Також важливо приєднати переносне заземлення та перевірити відсутність напруги на струмопровідних частинах.

Щоб запобігти замиканням на землю та коротким замиканням, необхідно контролювати стан ізоляції обладнання. Це досягається через вимірювання опору ізоляції, яке дозволяє виявити дефекти та уникнути

аварійних ситуацій. У випадку погіршення стану ізоляції ризик ураження струмом зростає, тому своєчасний контроль ізоляції є важливою частиною безпечної експлуатації електроустановок.

Керівництво підприємства має забезпечити утримання електроустановок у належному стані, призначивши відповідальних за їхню експлуатацію фахівців. Важливим аспектом є також забезпечення достатньої кількості кваліфікованих електротехнічних працівників, які повинні проходити регулярне навчання та перевірки знань. Оперативне обслуговування електроустановок може здійснюватися як постійним, так і виїзним персоналом, який відповідає за декілька об'єктів.

Для забезпечення безпеки електроустановки з підвищеною небезпекою, зокрема ті, що працюють з напругою понад 1000 В, потребують спеціальних заходів. Занулення — це інший важливий захисний метод, який полягає в з'єднанні неструмоведучих металевих частин із заземленою нейтраллю для запобігання небезпечним наслідкам у разі короткого замикання. Занулення спрямоване на автоматичне відключення установки при аваріях і зниження напруги на корпусі обладнання.

Ці заходи безпеки обов'язкові в приміщеннях з підвищеною небезпекою, вибухонебезпечних зонах, а також в електромережах з напругою понад 380 В змінного струму або 440 В постійного. Зануленню підлягають всі металеві частини електроустановок, що можуть стати небезпечними через замикання.

Для контролю та підтримки безпечної експлуатації електроустановок необхідно здійснювати регулярні огляди, випробування ізоляції, а також забезпечувати оперативний персонал необхідними інструментами та інструкціями. Тільки комплексний підхід до організації роботи, що включає навчання працівників та постійний технічний контроль, дозволяє знизити ризики ураження струмом і забезпечити надійну роботу електрообладнання.

Таким чином, правильна організація захисних заходів, таких як заземлення, занулення, регулярні огляди та контроль ізоляції, є критично важливою для безпеки працівників і безперебійної роботи електроустановок.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Виконане дослідження ключових методів контролю напруги виявило, що найефективнішим та широко застосовуваним підходом у розподільчих електромережах (РЕМ) є принцип зустрічного регулювання. Впровадження цієї системи автоматичної стабілізації електричної напруги дає можливість брати до уваги падіння потенціалу в лініях електропередач, що відходять від джерела живлення. Таким чином, це суттєво підвищує якісні показники напруги безпосередньо на клеммах електроприймачів споживачів.

2. Проведене дослідження методів та обладнання для коригування напруги шляхом модифікації співвідношення витків обмоток виявило, що найширше застосування знаходить електромеханічний комплекс РПН (регулювання під навантаженням) потужних трансформаторів. Однак, варто зауважити, що ключовим обмеженням механічного РПН є його порівняно невисока довговічність. Це пов'язано з інтенсивним зносом комутаційних елементів, які регулярно замикають та розмикають електричні кола з номінальними струмами трансформатора.

3. Дослідження наявних механізмів автоматичного контролю напруги у потужних трансформаторах, оснащених пристроями регулювання під навантаженням (РПН), виявило суттєві обмеження в їхній функціональності. Виявляється, що ці системи зазвичай зосереджуються лише на одному з двох ключових аспектів регулювання напруги, нехтуючи іншим. У випадках значних коливань електричної напруги виникають особливо несприятливі умови експлуатації. Такі режими характеризуються істотними відхиленнями від нормативних показників, що негативно впливає на якість енергопостачання. Як наслідок, споживачі тривалий час отримують електроенергію низької якості, що може призвести до низки проблем.

4. Проведений аналіз існуючих систем автоматичного керування (САК) режимами напруги розподільчих електричних мереж (РЕМ) виявив необхідність впровадження адаптивної затримки сигналу перемикання відгалуження пристрою регулювання під навантаженням (РПН) силового трансформатора. Така модифікація спрямована на досягнення балансу між зменшенням кількості перемикачів механічного пристрою РПН та підтримкою належної якості електроенергії.

5. Результати експериментальних досліджень виявили, що тривалість затримки сигналу, який ініціює перемикання пристрою регулювання під навантаженням (РПН), має бути скоригована з урахуванням ступеня зношення його контактної системи. Ця залежність є критично важливою для забезпечення надійної роботи трансформаторного обладнання. При впровадженні даної методології оптимальним рішенням є врахування показників, які передаються моніторинговою системою, що відстежує функціональний стан потужного трансформаторного обладнання. Ця система збирає та аналізує критичні дані про роботу трансформатора, включаючи температуру обмоток та масла, рівень вологості, концентрацію розчинених газів, часткові розряди та інші важливі параметри.

6. У підсумку проведеного аналізу щодо вибору оптимального математичного інструментарію для розв'язання поставленої проблеми автоматизованого управління було виявлено, що для подолання найскладнішої складової цього завдання найефективнішим є застосування апарату нечіткої логіки. Цей метод дозволяє найточніше визначити взаємозв'язок між тривалістю затримки сигналу для перемикання пристрою регулювання під навантаженням (РПН) та показниками, які надходять від системи моніторингу стану потужного трансформатора.

7. На підставі математичного інструментарію нечіткої логіки було створено комплексну математичну модель та розроблено алгоритм функціонування модуля, який визначає тривалість затримки сигналу для

перемикання пристрою регулювання під навантаженням (РПН). У контексті нечіткої логіки оптимальним вибором для механізму виведення постає метод Мамдані. Цей підхід вирізняється своєю ефективністю завдяки кільком ключовим перевагам. По-перше, він відзначається відносною простотою реалізації в програмному коді. По-друге, складові цього алгоритму характеризуються інтуїтивно зрозумілою структурою та наочністю.

8. При створенні математичного опису системи регулювання напруги було використано комплексний підхід, що поєднує класичний метод передаточних функцій із сучасним інструментарієм теорії нечітких множин. Розроблені математичні моделі стали фундаментом для реалізації комп'ютерних імітаційних моделей інноваційної системи автоматичного керування.

9. У процесі дослідження ефективності запропонованої нечіткої системи керування напругою в розподільчих електричних мережах було створено комплекс імітаційних моделей у середовищі "Matlab/Simulink". Цей програмний інструментарій дозволив реалізувати розроблені закони автоматичного регулювання та впровадити інноваційний нечіткий алгоритм розрахунку часової затримки комутацій РПН.

10. Запропонована система інтелектуального управління рівнями напруги в розподільчих електричних мережах базується на використанні нечіткої логіки та може бути впроваджена за допомогою сучасної елементної бази. Розроблений варіант схемотехнічного рішення для системи автоматичного контролю напруги в розподільчих електромережах відрізняється оптимальною архітектурою та економічною доцільністю.

11. Інтеграція трансформаторів струму та напруги як первинних сенсорів у вимірювальних каналах системи автоматичного контролю забезпечує низку значних технічних та експлуатаційних переваг. Такий підхід до побудови САК розподільчих електромереж дозволяє досягти

гальванічної розв'язки силових та вимірювальних ланцюгів, що суттєво підвищує безпеку експлуатації та надійність обладнання.

12. В результаті аналізу визначено ключові загрози, такі як ураження електричним струмом, і запропоновано заходи для їх усунення. Основними засобами захисту є заземлення, занулення, контроль ізоляції та навчання персоналу, що дозволяє забезпечити безпеку працівників і безперебійну роботу обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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.
2. Шкрабець, Ф. П. Основи електропостачання : навч. посіб. / Ф. П. Шкрабець, П. Г. Плешков. - Кіровоград : РВЛ КНТУ, 2010. - 408 с.
3. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за освітньо-професійними програмами «Електротехнічні системи електроспоживання» та «Енергетичний менеджмент» / [П. Г. Плешков, Н. Ю. Гарасьова, А. І. Котиш] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2017 - 48 с.
4. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності: ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). [Чинний з 1.10.2014]. - К.: Держстандарт України, 2014. – 27 с.
5. Правила улаштування електроустановок. – К.: Мінрегіонвугілля України, 2017. – 617 с.
6. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств: навч. посіб. / [О. І. Соловей, В. П. Розен, П. Г. Плешков та ін.]; Кіровоград. нац. техн. ун-т. – Черкаси: Чабаненко Ю., 2015. – 316 с.
7. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання : Підручник / І.В. Жежеленко, А.К. Шидловський, Г.Г. Півняк, Ю.Л. Саєнко. – Д. : Національний гірничий університет, 2009. – 319 с. : іл.

8. Testa Alfredo, Curcio Ciuseppe, Menniti Daniele. Regolazione della tensione in cabine MT/BT in presenza di carichi non omotetici // Energ. elett. – 1993. – 70, № 10. – Р. 416–422.

9. Пат. 44616А Україна, МКИ Н 01 F 29/04, Н 01 Н 19/12. Трифазний перемикач відгалужень обмоток трансформатора під навантаженням: Пат. 44616А Україна, МКИ Н 01 F 29/04, Н 01 Н 19/12 / А.Л. Вайнштейн, Р.А. Ангоріна, М.Ф. Андросов, Т.М. Синицина (Україна); ВАТ "Український наук.-досл. проектно-конструк. та технол. інститут трансформаторобудування". – № 2001064055; Заявл. 13.06.2001; Опубл. 15.02.2002.

10. Пат. 27824 Україна, МКИ Н 01 F 29/02, Н 01 Н 9/00. Перемикач ступенів обмоток трансформатора: Пат. 27824 Україна, МКИ Н 01 F 29/02, Н 01 Н 9/00 / Д. Дохнальд, Д. Неймер, В. Альбрехт, Г. Клос, Р. Лаутерволд, Х. Лісманн-Міске (Німеччина); Машинен фабрик рейнхаузен Гмбх.. – № 94005451; Заявл. 06.05.93; Опубл. 16.10.2000.

11. Пат. 27394 Україна, МКИ Н 02 J 3/12. Спосіб регулювання напруги силового трансформатора: Пат. 27394 Україна, МКИ Н 02 J 3/12 / М.А. Бікі, Г.І. Цієр, Ю.Н. Шафір (Україна); ВАТ "Запоріжтрансформатор". – № 93007732; Заявл. 07.09.93; Опубл. 15.09.2000.

12. Voltage control for high voltage power transformers. Заявка 2190219 Великобритания, МКИ G 05 F 1/14 / Hiscock Nicolas John, Goodfellow Christopher Robin. – №8610881; Заявл. 03.05.86; Опубл. 11.11.87; НКИ G3U.

13. Automatika paralelních transformátoru: А.с. 213864 ЧССР, МКИ Н 01 F 32/08 / Hanzal Petr (ЧССР). – №288-80; Заявл. 01.05.80; Опубл. 14.01.84.

14. Sposób i układ regulacji napięcia transformatora: Пат. 140552 ПНР, МКИ G 05 F 1/14 / Dolny Ryszard, Drop Stanisław, Morawski Czesław, Wierzbicki Wojciech. – №239044; Заявл. 15.11.82; Опубл. 30.07.88.

15. Means and method for controlling electrical transformer voltage regulating tapchangers: Пат. 5136233 США, МКИ G 05 F 1/20 / Klikenberg Jerry R., Dueker Alwin C. – №682911; Заявл. 09.04.91; Опубл. 04.08.92; НКИ 323/343.

16. Harlow J.H., La Place C.J. A microcomputer control for step-voltage regulators // IEEE Trans. Power Apparatus and Systems. – 1985.–Vol. 104, № 3.– P. 621–627.

17. Suxing Sun, Zhicheng You, Xiaoping Li, Dexian Yang. Dianli xitong zigonghua // Autom. Electric Systems. – 1995.– 19, № 7.–P. 50–54.

18. Strategies for real-time voltage var monitoring, communications and control. Ilić-Spong Marija, Medanić Jurai. "2nd International Conference Power System Monitoring and Control. Durham, 8–11 July, 1986". London, 1986, С. 166–171 (англ.).

19. Gueth Gerhard. Statische Pegeltransformatoren für electrische Energienebertragungssysteme: Diss. Dokt. Techn. Wiss Eidgenoess / Tech. Hochschul. Zürich, 1982.

20. Пат. 25246 України, МКИ Н 02 J 3/24. Спосіб регулювання напруги: Пат. 25246 України, МКИ Н 02 J 3/24/ В.О. Удовенко; Заявл. 15.01.98; Опубл. 25.12.98, Бюл. №6.

21. Пат. 4733158 США, МКИ G 05 F 1/16. Control circuit for tap-switching power supplies and multitap transformers: Пат. 4733158 США, МКИ G 05 F 1/16 / Marchione Vito J., Brunelle James W; Datametrics Corp. – № 898713; Заявл. 21.08.86; Опубл. 22.03.88; НКИ 323/258.

22. Craig A.D., Moor P.M., Long C.D. High-speed MV/LV power line communication system for remote metering, load control and network automation // Power Engineering. – 1996.– 10, № 4.– P.154–158.

23. Delfino Bruno, Pincti Paolo. Fieldbus negli impianti elettrici // AEI: Autom., energ., inf. – 1993.– 80, № 11.–P. 54–60.

24. Мокін Б.І., Грабко В.В., Львов І.Ю. Спосіб регулювання напруги в електричних мережах // Збірка праць IV – ої Міжнар. наукової конференції “Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств” (PQ 2000). – 2000. – С.153.

25. Mokin B., Grabko V., Lvov I. About one method to control the voltage in electric nets // Proc. 5-th International Conf. on Development and Application Systems (DAS 2000). – Suceva (Romania). – 2000. – С.16-19.

26. Львов І.Ю. Підвищення якості регулювання напруги силового трансформатора // Вісник ВПІ. – 2002. – №3. – С. 62-64.

27. Грабко В.В., Львов І.Ю. Про один метод синтезу регулятора напруги для силових трансформаторів з пристроями РПН // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: Электротехника и энергетика, выпуск 4: Донецк: ДонГТУ, 1999. – С. 258 – 262.

28. Пат. 35207А Україна. Регулятор напруги для силових трансформаторів: Пат. 35207А Україна, МКИ Н 02 Р 13/06 / Б.І. Мокін, В.В. Грабко, І.Ю. Львов; Вінницький державний технічний університет. – №99094925; Заявл. 03.09.99; Опубл. 15.03.01, Бюл. №2.

29. Грабко В.В., Львов І.Ю. Синтез структури блоку прийняття рішення ієрархічної системи регулювання напруги // Проблемы создания новых машин и технологий. Научные труды КГПУ. Вып. 2/2000 (9). – Кременчуг: КГПУ, 2000. – С.65–68.

30. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1975. – 768 с.

31. Юхимчук С.В., Лысогор В.Н., Марущак В.Ю. Автоматизация проектирования систем автоматического управления: Учеб. пособие. – К.: УМ ВО, 1989. – 172 с.

32. Мокін Б.І., Грабко В.В., Львов І.Ю. До питання підвищення ефективності регулювання напруги в електричних мережах // Вісник ВПІ. – 1999. – №3. – С. 32 – 35.

33. Мокін Б.І., Грабко В.В., Львов І.Ю. Комп'ютерне моделювання системи регулювання напруги в електричних мережах // Проблемы создания новых машин и технологий. Сборник научных трудов Кременчугского государственного университета, выпуск 2. – Кременчуг: КГПИ. – 1999. – С. 143-146.

34. Мокін Б.І., Юхимчук С.В. Математичні моделі робастної стійкості та чутливості нелінійних систем. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 122 с.