

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 ПЛЕШКОВ
“ ____ ” _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему
“Синтез нечіткої системи автоматичного керування
рівнем напруги в розподільних електричних
мережах”

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕНМ-24М
ОПП «Енергетичний менеджмент»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

_____ Максим ОВЕЧЕНКО
« ____ » _____ 2025 р.

Керівник роботи
доктор технічних наук, професор
_____Сергій ОСАДЧИЙ

« ____ » _____ 2025 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 Енергетичний менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Плешков П.Г.

«___» _____ 2025 р.

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

Овеченка Максима Андрійовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Синтез нечіткої системи автоматичного керування рівнем напруги в розподільних електричних мережах

Synthesis of a fuzzy system for automatic voltage control in electrical distribution networks

2. Керівник роботи (проекту) Осадчий Сергій Іванович, докт. техн. наук., проф.

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 03.12.2025 р

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Метою представленого дослідження є наукове обґрунтування та розробка нової архітектури системи автоматичного управління режимами напруги в розподільчих електромережах, яка забезпечує як підвищення експлуатаційної надійності самих силових агрегатів з РПН, так і суттєве поліпшення параметрів якості напруги для кінцевих споживачів. Завдання роботи: 1. Виконати аналітичний огляд наявних рішень у сфері автоматизованого управління силовими трансформаторами, оснащеними РПН. 2. Здійснити формалізований опис науково-технічної задачі автоматичного контролю режимів напруги у розподільчих електромережах, які використовують трансформатори з РПН. 3. Побудувати деталізовану комп'ютерну модель запропонованої системи автоматизованого контролю режиму напруги. 4. Виконати всебічний аналіз очікуваної ефективності від впровадження запропонованих систем

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
<i>1</i>	<i>Вступ</i>	<i>6.10.2025</i>	
<i>2</i>	<i>Огляд та аналіз методів керування режимами напруги в розподільчих електромережах</i>	<i>23.10.2025</i>	
<i>3</i>	<i>Методологічні основи синтезу системи автоматичного керування напругою в розподільчих мережах</i>	<i>5.11.2025</i>	
<i>4</i>	<i>Імітаційне моделювання та дослідження ефективності нечіткої системи керування напругою</i>	<i>15.11.2025</i>	
<i>5</i>	<i>Охорона праці</i>	<i>20.11.2025</i>	
<i>7</i>	<i>Висновки</i>	<i>25.12.2025</i>	
<i>8</i>	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	<i>29.12.2025</i>	
<i>9</i>	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	<i>2.12.2025</i>	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2025 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2025 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Овеченко М. А. Синтез нечіткої системи автоматичного керування рівнем напруги в розподільних електричних мережах

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ОПП «Енергетичний менеджмент». – Центральноукраїнський національний технічний університет. – м. Кропивницький, 2025 р.

Робота присвячена вирішенню задачі підвищення ефективності керування режимами напруги в розподільчих електричних мережах шляхом удосконалення систем автоматики трансформаторних підстанцій.

В роботі проведено аналіз існуючих методів регулювання напруги та виявлено недоліки класичних регуляторів. Обґрунтовано доцільність застосування теорії нечітких множин для синтезу системи керування в умовах стохастичного характеру навантажень. Розроблено структуру та базу правил нечіткого контролера на основі алгоритму Мамдані, який враховує величину відхилення напруги, швидкість її зміни та добовий ресурс перемикачів. Особливістю розробленої системи є адаптивна зміна часової затримки спрацювання, що дозволяє фільтрувати короточасні збурення.

Ефективність запропонованого рішення перевірено шляхом імітаційного моделювання в середовищі MATLAB/Simulink. Результати досліджень показали, що використання нечіткого регулятора дозволяє зменшити кількість комутацій пристрою РПН на 19,4 % порівняно з базовою моделлю, забезпечуючи при цьому якість напруги відповідно до вимог стандарту ДСТУ EN 50160:2023.

Ключові слова: розподільча електрична мережа, регулювання напруги, нечітка логіка, алгоритм Мамдані

THE SUMMARY

Ovechenko M. A. Synthesis of a fuzzy system for automatic voltage control in electrical distribution networks

Specialty 141 – "Electric power, electrical engineering and electromechanics". – "Energy management ". – Central Ukrainian National Technical University. – Kropyvnytskyi, 2025

The work is devoted to solving the problem of increasing the efficiency of voltage control in distribution electrical networks by improving transformer substation automation systems.

The work analyzes existing voltage control methods and reveals the shortcomings of classical regulators. The feasibility of using fuzzy set theory for synthesizing a control system under conditions of stochastic nature of loads is substantiated. The structure and rule base of a fuzzy controller based on the Mamdani algorithm, which takes into account the magnitude of the voltage deviation, the rate of its change and the daily switching resource, is developed. A feature of the developed system is the adaptive change in the time delay of operation, which allows filtering short-term disturbances.

The effectiveness of the proposed solution is verified by simulation modeling in the MATLAB/Simulink environment. The results of the research showed that the use of a fuzzy controller allows reducing the number of switching operations of the on-load tap-changer by 19.4% compared to the base model, while ensuring voltage quality in accordance with the requirements of the DSTU EN 50160:2023 standard.

Keywords: electrical distribution network, voltage regulation, fuzzy logic, Mamdani algorithm

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ НАПРУГИ В РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ	12
1.1 Класифікація та принципи реалізації методів регулювання напруги в електромережах	12
1.2 Керування рівнями напруги шляхом зміни коефіцієнта трансформації... 22	22
1.2.1. Трансформатори з системою ПБЗ	23
1.2.2. Трансформатори з механічними РПН.....	24
1.2.3. Трансформатори з безконтактними (напівпровідниковими) системами РПН	34
1.3 Огляд методів та систем автоматичного керування коефіцієнтом трансформації	37
Висновки до розділу	40
РОЗДІЛ 2 МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ СИНТЕЗУ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ НАПРУГОЮ В РОЗПОДІЛЬЧИХ МЕРЕЖАХ	42
2.1 Формулювання науково-технічної задачі керування режимами напруги РЕМ	42
2.2 Обґрунтування вибору математичного інструментарію для автоматизації керування напругою	44
2.2.1. Основи нечіткої арифметики та математичного моделювання.	44
2.2.2. Архітектура та функціональні блоки нечіткої моделі.....	53
2.3 Математичне моделювання та алгоритмізація керування напругою в РЕМ.....	61
Висновки до розділу	74

РОЗДІЛ 3 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ НАПРУГОЮ.....	75
3.1 Архітектура та реалізація імітаційної моделі в середовищі MATLAB/Simulink	75
3.2 Проведення обчислювального експерименту та порівняльний аналіз алгоритмів.....	79
Висновки до розділу	85
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	86
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	92
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	94

ВСТУП

Актуальність роботи. В умовах поточної еволюції української енергетичної системи, надзвичайно пріоритетним стає забезпечення стабільного функціонування розподільчих електромереж.

Загально визнано, що ключовим компонентом в інфраструктурі таких мереж виступає знижувальний силовий агрегат (трансформатор). Зазвичай він комплектується механізмом для коригування рівня напруги безпосередньо в робочому режимі, відомим як РПН (регулювання під навантаженням). Виконаний огляд ситуації демонструє, що в діючих енергосистемах домінують трансформаторні підстанції, обладнані саме механічними типами РПН. Цим пристроям властиві суттєві вади; серед них найбільш критичною є лімітований комутаційний ресурс, зумовлений прогресуючим фізичним зносом рухомих контактних груп. Це не лише скорочує міжремонтний інтервал обладнання, але й створює ризики виникнення дугових розрядів та аварійних відмов, що безпосередньо впливає на безперебійність електропостачання.

Наявні на сьогодні алгоритми автоматизованого управління механізмами РПН надають можливість імплементувати такі параметри регулювання, що суттєво знижують частоту комутаційних операцій. Такий підхід спрямований на підвищення експлуатаційної довговічності силового трансформатора з РПН, що позитивно позначається на загальній стабільності функціонування всієї електророзподільчої інфраструктури.

Водночас, подібне обмеження має зворотний бік: воно спричиняє погіршення якості електричної енергії, зокрема, збільшуючи діапазон відхилень напруги від номінальних значень у споживачів. Фактично, виникає фундаментальний компроміс між довговічністю обладнання та дотриманням стандартів якості електропостачання, що є неприйнятним для сучасних вимог ринку та потреб споживачів.

Відтак, науково-технічне завдання, спрямоване на модернізацію та інтелектуалізацію систем автоматизованого контролю трансформаторного обладнання з РПН, набуває особливої гостроти. Метою такої модернізації є одночасна оптимізація двох традиційно взаємовиключних параметрів: збільшення експлуатаційного ресурсу пристроїв та забезпечення високих показників якості напруги.

Мета і завдання дослідження. Метою представленого дослідження є наукове обґрунтування та розробка нової архітектури системи автоматичного управління режимами напруги в розподільчих електромережах. Ця система має використовувати регульовальні можливості силових трансформаторів та базуватися на адаптивних алгоритмах, що гарантують синергетичне покращення: як підвищення експлуатаційної надійності самих силових агрегатів з РПН, так і суттєве поліпшення параметрів якості напруги для кінцевих споживачів.

Для реалізації сформульованої мети дослідження визначено таку послідовність наукових завдань, що підлягають вирішенню:

1. Виконати аналітичний огляд наявних рішень у сфері автоматизованого управління силовими трансформаторами, оснащеними РПН, з метою ідентифікації та систематизації їхніх іманентних недоліків та експлуатаційних обмежень.

2. Здійснити формалізований опис науково-технічної задачі автоматичного контролю режимів напруги у розподільчих електромережах, які використовують трансформатори з РПН. Ця формалізація повинна математично враховувати критерії для одночасної оптимізації показників експлуатаційної надійності обладнання та стандартів якості електричної енергії.

3. Запропонувати та обґрунтувати нові архітектурні рішення для системи автоматичного управління режимами напруги. Запропоновані схеми мають бути спроектовані таким чином, щоб їхня імплементація в розподільчих електромережах забезпечувала синергетичний ефект

підвищення надійності функціонування мережі та дотримання високих стандартів якості напруги.

4. Побудувати деталізовану комп'ютерну модель запропонованої системи автоматизованого контролю режиму напруги. Ця модель має базуватися на розроблених у попередньому пункті структурних рішеннях та бути адекватною для подальшого експериментального дослідження.

5. Виконати всебічний аналіз очікуваної ефективності від впровадження запропонованих систем.

Об'єктом дослідження виступає процес автоматичного регулювання параметрів напруги в межах розподільчих електромереж, що здійснюється із залученням регулювальних механізмів (РПН) силових трансформаторів

Предметом дослідження є система автоматизованого управління, призначена для контролю режимів напруги у тих сегментах розподільчих електромереж, які у своєму складі мають трансформатори, обладнані пристроями РПН.

Методологічна база дослідження. Досягнення визначених завдань та перевірка висунутих гіпотез забезпечувалися шляхом комплексного застосування сучасного наукового апарату. До нього увійшли: методики комп'ютерного імітаційного моделювання для відтворення динамічних процесів; теоретичні основи та практичні інструменти нечіткої логіки (fuzzy logic) і систем нечіткого керування (зокрема, моделі Мамдані); фундаментальні положення теорії електричних кіл (ТЕК); апарати класичної та сучасної теорії автоматичного керування (ТАК);

Наукові результати, отримані в ході роботи полягають в наступному

1. Представлено та теоретично обґрунтовано доцільність застосування методів, що базуються на апараті нечіткого керування (зокрема, з використанням алгоритмів типу Мамдані), для задач автоматизованого контролю вольтажних режимів. Цей підхід застосовано до розподільчих електромереж, що експлуатують трансформатори з РПН. Доведено, що імплементація таких систем дозволяє досягти синергетичного ефекту, а саме

одночасного покращення показників експлуатаційної надійності мережевого обладнання та стандартів якості регулювання напруги.

2. Створено оригінальну комп'ютерну імітаційну модель, що адекватно описує функціонування нечіткої системи автоматизованого контролю вольтажних режимів. Модель призначена для мереж, які містять силові трансформаторні агрегати з РПН. Даний програмний інструмент дозволяє проводити комплексний аналіз поведінки системи в різних режимах роботи та кількісно оцінювати ефект від її застосування в умовах, наближених до реальних.

Практична цінність роботи. Практична значущість виконаної роботи полягає у можливості прямого підвищення рівня експлуатаційної надійності функціонування розподільчих електромереж, що супроводжується покращенням якості вольтажних режимів у них. До головних результатів, готових до практичного застосування, належать:

1. Сформульована та апробована методика для побудови та верифікації бази правил нечіткої системи, призначеної для автоматизованого управління режимами напруги в мережах, що містять трансформатори, обладнані пристроями РПН.

2. Готова до використання комп'ютерна імітаційна модель системи, що функціонує на принципах нечіткої логіки, для контролю режимів напруги у мережах з трансформаторами з РПН. Ця модель може бути використана інженерним персоналом для налаштування, тестування та оптимізації параметрів системи перед її фізичним впровадженням.

Загальна характеристика наукової роботи. Кваліфікаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг роботи складає 97 сторінок. Основна частина викладена на 88 сторінках друкованого тексту, містить 43 рисунки та 1 таблицю. Список використаних джерел містить 20 джерел та викладений на 4 сторінках.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ НАПРУГИ В РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ

1.1 Класифікація та принципи реалізації методів регулювання напруги в електромережах

Забезпечення якості електричної енергії є ключовим завданням функціонування сучасних систем електропостачання. Для утримання значень напруги на вхідних клеммах електроприймачів у межах, регламентованих чинними стандартами (наприклад, ДСТУ EN 50160), у різних точках енергосистеми застосовують комплекс технічних заходів із коригування параметрів режиму. Невідповідність напруги номінальним значенням може призводити до зниження продуктивності обладнання, прискореного старіння ізоляції та збільшення технологічних втрат електроенергії.

У теорії та практиці експлуатації електричних мереж заведено розрізняти два фундаментальні види керування режимами напруги: централізоване та місцеве (локальне). Структурна класифікація цих методів наочно відображена на рис. 1.1 [2].



Рис. 1.1 Класифікація видів регулювання напруги

Централізоване керування реалізується безпосередньо у центрах живлення – вузлових підстанціях електричної мережі. Цей метод орієнтований на одночасне забезпечення якісним електропостачанням значної сукупності споживачів, пов'язаних спільною електромережею, таких як великі промислові кластери, мікрорайони або цілі міста. Технічно це зазвичай виконується за допомогою трансформаторів, обладнаних пристроями регулювання під навантаженням (РПН).

В межах централізованого підходу виокремлюють три базові стратегії керування, вибір яких залежить від характеру навантаження:

- стабілізація напруги.
- двоступеневе регулювання.
- зустрічне регулювання.

Розглянемо детальніше перший підхід. У випадках, коли добовий профіль споживання активної та реактивної потужності характеризується високою стабільністю та відсутністю різких флуктуацій, оптимальним рішенням є стабілізація напруги. Такий режим характерний для промислових об'єктів із безперервним технологічним циклом (металургійні, хімічні виробництва), що працюють у три зміни з рівномірним завантаженням агрегатів.

Головною метою стабілізації є підтримання на шинах споживача постійного рівня напруги, близького до номінального (U_{nom}), незалежно від часу доби. Типовий графік електричного навантаження для такої категорії споживачів, що ілюструє відсутність значних відхилень, наведено на рис. 1.2.

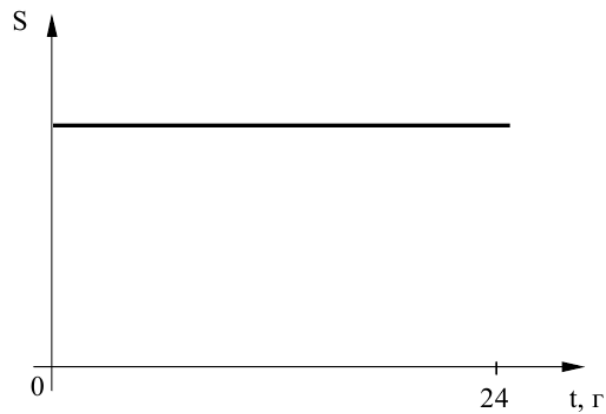


Рис. 1.2. Характеристика добового графіка навантаження для групи споживачів зі стабільним режимом енергоспоживання

Окремим різновидом керування режимами розподільчих мереж є регулювання напруги за часовим критерієм, графічна інтерпретація якого представлена на рис. 1.3.

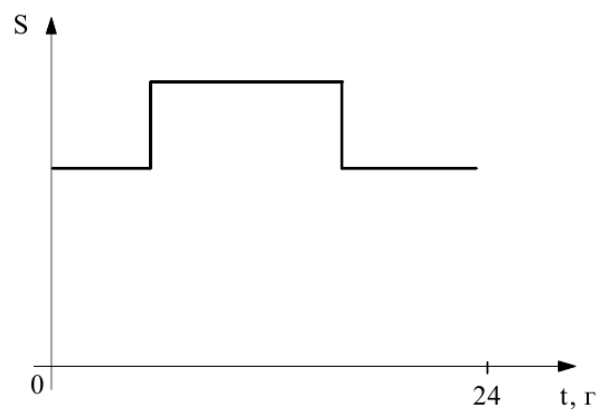


Рис. 1.3. Характеристика добового графіка навантаження для групи споживачів однозмінним режимом роботи

В основі даного методу лежить принцип програмного управління [5]. Суть цього підходу полягає у зміні коефіцієнта трансформації або параметрів компенсувальних пристроїв згідно із заздалегідь затвердженим алгоритмом, який прив'язаний до астрономічного часу, без використання безперервного зворотного зв'язку за поточним значенням напруги.

Застосування такої стратегії є технічно та економічно виправданим за умови наявності у вузлі навантаження специфічної категорії споживачів.

Йдеться про об'єкти, чії добові діаграми споживання активної та реактивної потужності характеризуються високою повторюваністю (детермінованістю) з дня у день.

Яскравим прикладом таких споживачів є промислові підприємства, що функціонують в однозмінному режимі. Технологічний цикл таких виробництв зазвичай має чіткі часові межі (наприклад, з 08:00 до 17:00), а високий рівень автоматизації виробничих ліній забезпечує стабільність споживаної потужності протягом робочої зміни. У таких випадках графік напруги набуває вигляду ступінчастої функції, що дозволяє налаштувати перемикання відпайок трансформатора або увімкнення конденсаторних батарей за таймером, мінімізуючи витрати на складні системи телеметрії.

Третій, найбільш адаптивний підхід – зустрічне регулювання – застосовується в тих сегментах енергосистеми, де графік електроспоживання характеризується значною нерівномірністю та стохастичністю протягом доби. Це типово для комунально-побутових споживачів, змішаних навантажень або підприємств із нестабільним виробничим циклом.

Сутність методу полягає у примусовій зміні напруги на шинах центру живлення (ЦЖ) залежно від величини сумарного струму навантаження. Головне завдання полягає не у стабілізації напруги на виході з підстанції, а у забезпеченні нормативних показників якості електроенергії безпосередньо у віддалених вузлах – так званих контрольних точках розподільчої мережі.

Логіка керування базується на компенсації втрат напруги в лініях електропередавання:

- в режимі максимальних навантажень (пікові години), коли втрати напруги в мережі найбільші, напругу на шинах ЦЖ підвищують (наприклад, до $105\% U_{ном}$), щоб "доставити" споживачеві номінальне значення.

- в режимі мінімальних навантажень (нічні провали), коли втрати в мережі незначні, напругу на шинах ЦЖ знижують, щоб уникнути перенапруги на затискачах споживача.

Така стратегія вимагає постійного моніторингу режимних параметрів та врахування імпедансу мережі. Характер зміни споживання для таких об'єктів проілюстровано на рис. 1.4.

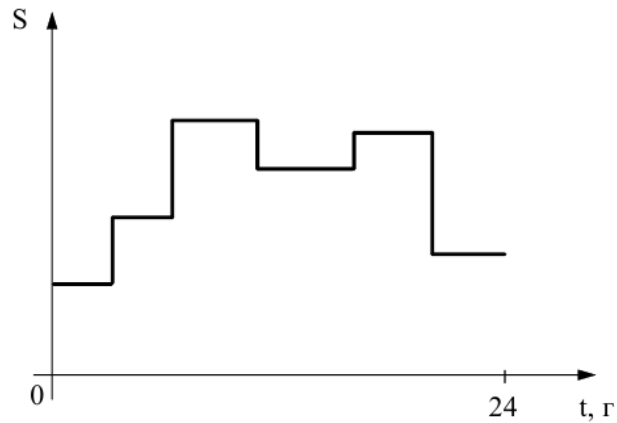


Рис. 1.4. Типовий добовий графік навантаження споживачів зі змінним режимом роботи

Як видно з діаграми, навантаження має чітко виражені піки (ранковий та вечірній максимуми) та провали, що робить застосування простих методів стабілізації неефективним.

Для аналітичного дослідження процесів зустрічного регулювання та виконання електромеханічних розрахунків доцільно використовувати спрощені математичні моделі обладнання. Розглянемо схему заміщення, представлену на рис. 1.5.

Напруга на шинах високої напруги підстанції розраховується за формулою:

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

де ΔU_{12} – спад напруги в лінії.

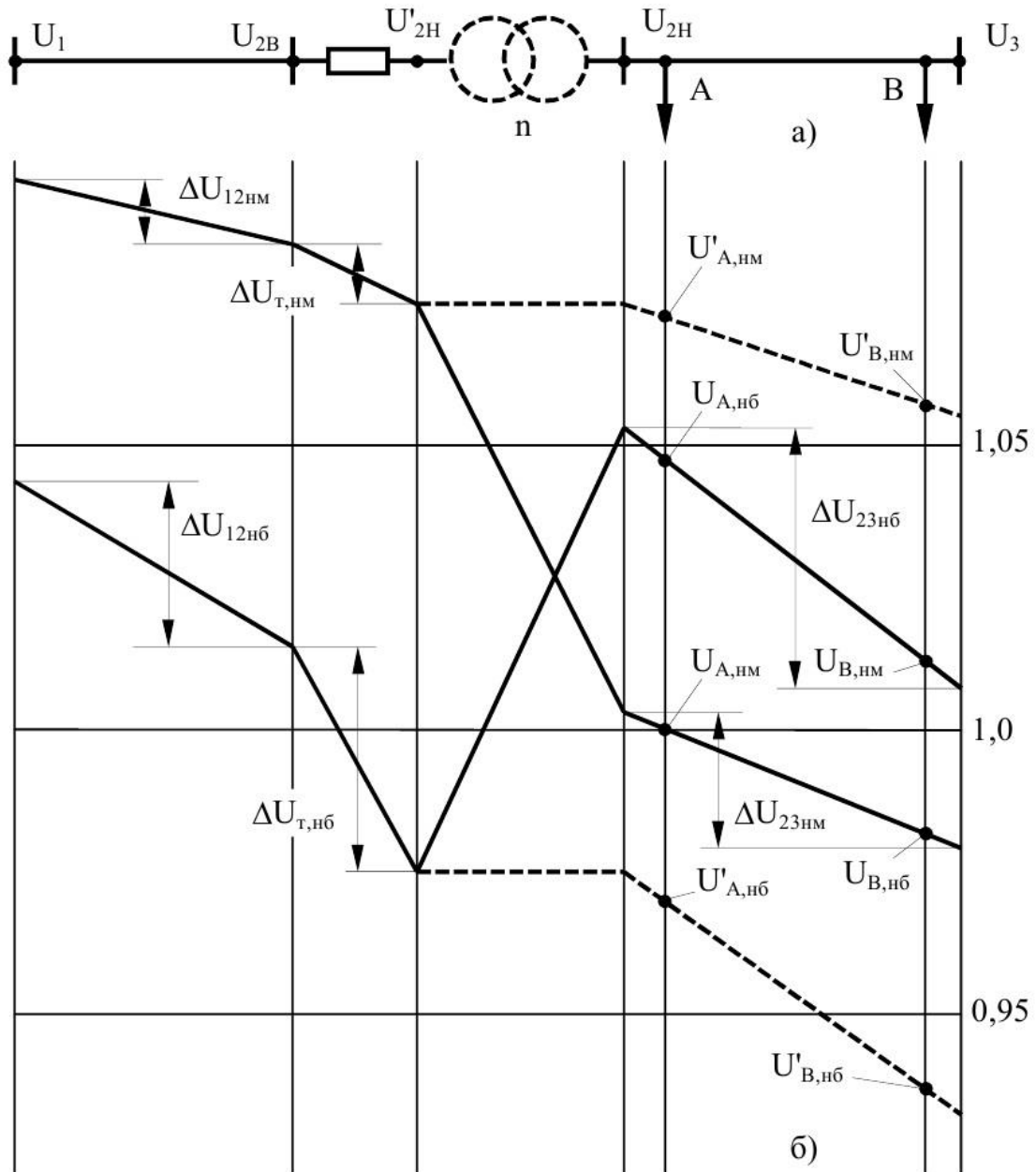


Рис. 1.5. Ілюстрація до пояснення принципу зустрічного регулювання напруги:

При розрахунку режимів роботи підстанції необхідно враховувати, що напруга на шинах низької напруги (НН) формується як результат взаємодії двох факторів. По-перше, відбувається електромагнітна трансформація вхідної напруги високої сторони (ВН) через ідеальний трансформаторний зв'язок. По-друге, від отриманого значення віднімається вектор падіння

напруги, зумовлений проходженням струму навантаження через активний та індуктивний опори обмоток трансформатора.

Аналіз графічних залежностей (позначених пунктирними лініями на рис. 1.5, б) демонструє поведінку системи за умови фіксованого коефіцієнта трансформації ($n = 1$, тобто без регулювання). Спостерігається наступна картина:

1. У режимі мінімальних навантажень, коли струми в лінії малі, втрати напруги прямують до нуля. Це призводить до того, що напруга у споживачів суттєво перевищує допустимий рівень (проблема перенапруги).

2. У режимі максимальних навантажень значні струми спричиняють великі втрати напруги, внаслідок чого потенціал на клеммах споживачів падає нижче критичної межі (проблема посадки напруги).

За таких умов електроприймачі, підключені до розподільчої мережі НН у характерних точках (позначених на графіку як точки А і В), опиняються в зоні неприпустимих режимів роботи. Це загрожує порушенням технологічних процесів або спрацюванням захисної автоматики.

Рішенням проблеми є примусова зміна коефіцієнта трансформації n на районній підстанції. Корируючи цей параметр, ми фактично зміщуємо рівень напруги U_{2H} вгору або вниз, адаптуючись до поточного навантаження. Результат такого регулювання відображено на графіку суцільною лінією: діапазон відхилень напруги входить у нормативну зону, забезпечуючи якісне електропостачання для всіх точок мережі.

У процесі експлуатації трансформаторного обладнання, особливо за умов мінімального навантаження, необхідно забезпечити зростання коефіцієнта трансформації. Це досягається шляхом зниження вторинної напруги до рівня, максимально наближеного до номінального значення. Такий підхід є критично важливим для підтримки оптимального режиму роботи мережі та мінімізації втрат енергії. У згаданому режимі функціонування обирається найбільше доступне стандартне значення коефіцієнта n , при якому має бути дотримана наступна обов'язкова умова:

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

Постійний моніторинг та коригування коефіцієнта трансформації дозволяє оперативно реагувати на зміни в енергосистемі, що є основою для забезпечення її стабільності. Варто зазначити, що регулювання коефіцієнта часто здійснюється за допомогою пристроїв регулювання напруги під навантаженням (РПН), які дозволяють виконувати ці операції без переривання електропостачання.

На противагу цьому, в умовах найбільшого навантаження на систему, потрібне скорочення коефіцієнта трансформації. Така дія призводить до збільшення вторинної напруги до рівня, який повинен бути максимально наближеним до $1,05U_{ном}$. Ця величина $1,05U_{ном}$ є верхньою межею, що часто використовується для компенсації внутрішніх втрат напруги в лініях електропередачі при пікових струмах. В рамках цього робочого режиму, обирається найбільше доступне стандартне значення коефіцієнта трансформації, за умови виконання наступного критерію:

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

Таким чином, забезпечується встановлення напруги на вихідних затискачах споживачів – як тих, що розташовані на значній відстані, так і близько підключених, – у встановлені допустимі межі. Це досягається завдяки використанню так званого зустрічного регулювання.

Ключовою особливістю цього підходу є його реакція на зміну навантажень.

- в режимі максимальних навантажень спостерігається природне зниження напруги у мережі (через зростання втрат), і зустрічне регулювання спрямоване на її підвищення.

- в режимі мінімальних навантажень, навпаки, напруга має тенденцію до зростання (внаслідок зменшення падіння напруги), і система регулювання здійснює її пониження.

Саме ця протилежно спрямована корекція залежно від рівня навантаження і дала назву цьому методу – зустрічне регулювання. Воно є основою для забезпечення сталості параметрів електроенергії у великих розподільчих мережах.

Локальне регулювання напруги виконується безпосередньо на затискачах кінцевого електроспоживача.

Оскільки цей метод корекції напруги вимагає значних капіталовкладень у засоби регулювання, які встановлюються у районах електричних мереж (РЕМ), його застосування обмежене. Він є економічно обґрунтованим і технічно необхідним лише для потужних споживачів, які висувають підвищені вимоги до якості електричної енергії. До таких об'єктів належать, зокрема, потужні асинхронні або синхронні електродвигуни, а також високоточні електротехнологічні установки (наприклад, індукційні печі, установки електрозварювання тощо), для яких відхилення напруги може критично вплинути на технологічний процес або спричинити вихід обладнання з ладу.

Залежно від кількості споживачів, підключених до шин, де здійснюється локальна корекція напруги, розрізняють два основні різновиди цього регулювання:

1. Індивідуальне регулювання: напруга коригується для одного конкретного потужного споживача (наприклад, шляхом встановлення окремого стабілізатора або автотрансформатора).

2. Групове регулювання: напруга регулюється для кількох електроспоживачів, які приєднані до однієї спільної шини (наприклад, за допомогою групового пристрою компенсації реактивної потужності або регулюючого трансформатора).

Зазначені методи регулювання напруги входять до загальної системи управління якістю електроенергії. Класифікація ключових методів регулювання напруги детально представлена на рис. 1.6.

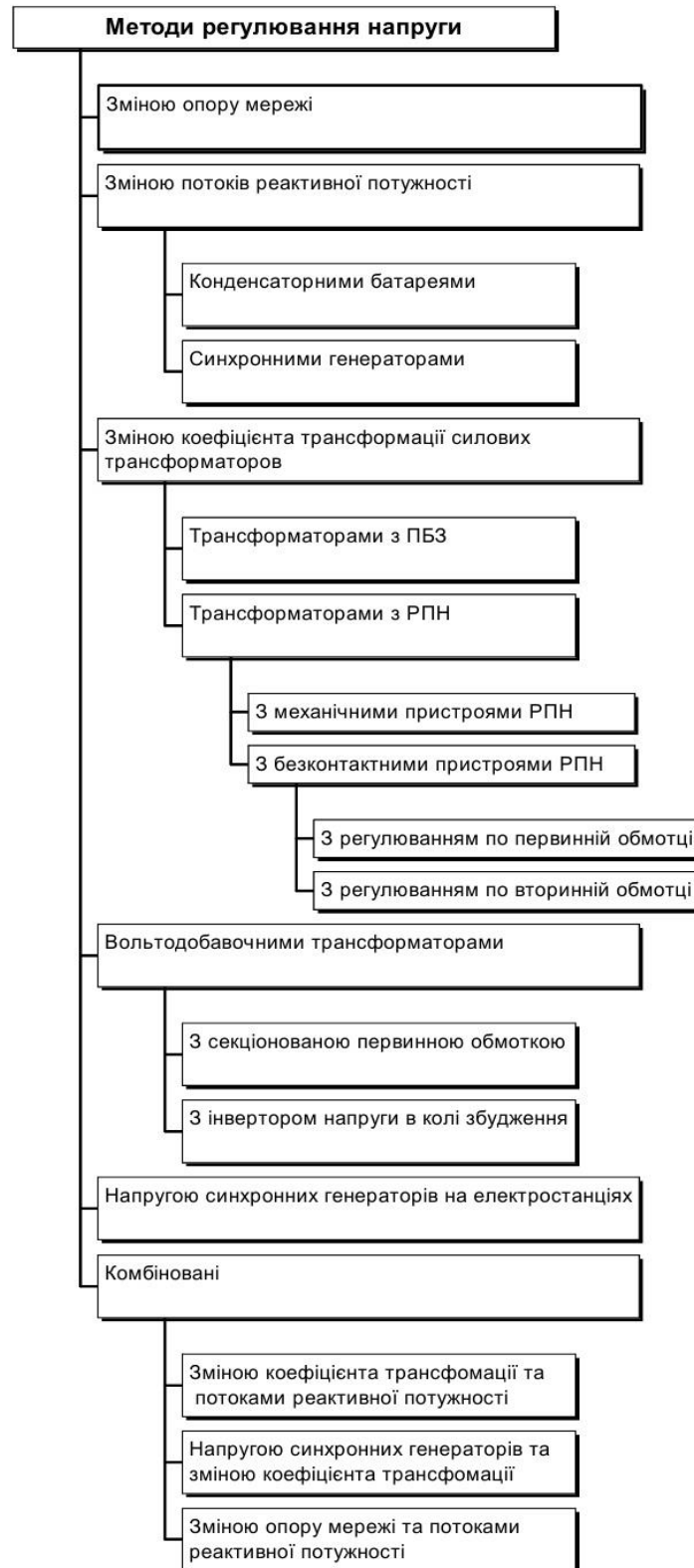


Рис. 1.6. Методи регулювання напруги в електромережах

1.2. Керування рівнями напруги шляхом зміни коефіцієнта трансформації

У сучасних розподільчих електричних мережах (РЕМ) критично важливим завданням є утримання відхилень напруги в межах нормованих стандартів. Головним технічним засобом для вирішення цієї задачі виступає зміна коефіцієнтів трансформації в силовому обладнанні [4]. Конструкція переважної більшості силових трансформаторів передбачає наявність спеціальних регулювальних відгалужень (анцапф) на обмотках, які комутуються за допомогою перемикаючих механізмів різної конфігурації.

Інженерна практика показує, що найбільш технічно та економічно виправданим є розміщення таких відгалужень на стороні вищої напруги (ВН). Це рішення зумовлене двома ключовими факторами:

1. Струмове навантаження: На стороні ВН, протікають значно менші струми порівняно зі стороною нижчої напруги (НН). Це дозволяє зменшити габарити контактної системи перемикача, знизити вимоги до дугогасіння та підвищити загальну надійність пристрою.

2. Точність регулювання: Обмотка ВН має значно більшу кількість витків, що дозволяє робити відгалуження для регулювання напруги з меншим кроком (більш плавно), забезпечуючи точніше налаштування вихідних параметрів.

Залежно від умов експлуатації та конструктивних особливостей, механізми зміни коефіцієнта трансформації класифікують на дві основні категорії:

1. Пристрої ПБЗ (перемикання без збудження): Зміна відгалужень можлива виключно на повністю відключеному від мережі трансформаторі (знята напруга як з боку ВН, так і з боку НН). Це найбільш поширений тип для розподільчих трансформаторів невеликої потужності.

2. Пристрої РПН (Регулювання під навантаженням): Складніші механізми, здатні виконувати комутацію обмоток без перерви в

електропостачанні, тобто під робочим струмом і напругою. Вони застосовуються там, де графік навантаження змінюється динамічно протягом доби.

1.2.1. Трансформатори з системою ПБЗ. На сьогоднішній день стандартом для трансформаторів із системою ПБЗ є наявність основного виводу (номінал) та чотирьох додаткових відгалужень для гнучкого налаштування. Зазвичай діапазон регулювання становить $\pm 2 \times 2,5\%$, що сумарно дає смугу регулювання у 10 % від номінальної напруги.

Оскільки перемикач вимагає повного знеструмлення обладнання, такі пристрої використовуються переважно для сезонного регулювання напруги (наприклад, зміна положення анцапфи при переході з зимового максимуму навантаження на літній мінімум). Принципову схему організації обмоток такого трансформатора зображено на рис. 1.7.

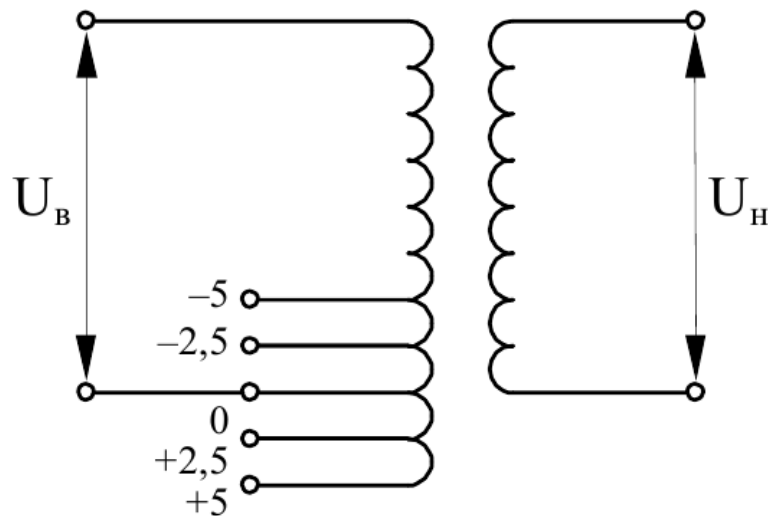


Рис. 1.7. Схема трансформатора з ПБЗ

Базове положення перемикача (так звана "нульова анцапфа") розраховане на роботу при вхідній напрузі, що відповідає номіналу конкретної мережі (стандартні класи напруги: 6, 10, 20 або 35 кВ). У цьому положенні коефіцієнт трансформації вважається номінальним. Конструкція сучасних трансформаторів дозволяє варіювати цей параметр ступенево.

Окрім основного виводу, передбачено чотири допоміжні позиції, які змінюють кількість витків первинної обмотки. Це дозволяє коригувати вихідну напругу з кроком у 2,5%, забезпечуючи такі рівні відхилення від номіналу: +5%, +2,5%, -2,5% та -5%.

Критичною особливістю експлуатації таких пристроїв є суворі вимоги до безпеки: будь-які маніпуляції з перемикачем дозволені виключно на повністю знеструмленому обладнанні. Це зумовлено тим, що контактна система ПБЗ не оснащена дугогасними камерами, і перемикач під струмом призведе до виникнення електричної дуги та руйнування пристрою. Через складність процедури відключення (яка вимагає узгодження з диспетчером та перерви в електропостачанні споживачів), зміна положень виконується вкрай рідко.

Зазвичай, корекція коефіцієнта трансформації має сезонний характер:

- восени анцапфу переводять у положення, що підвищує напругу (для компенсації падіння напруги через ріст навантажень взимку);
- навесні – повертають у положення зниження або номіналу.

Внаслідок цього, протягом доби трансформатор функціонує зі сталим коефіцієнтом трансформації, ігноруючи динаміку споживання. У періоди добових максимумів (вечірній пік) та мінімумів (нічний провал) напруга на виході змінюється лише за рахунок падіння напруги в мережі, що є пасивним режимом роботи. Це унеможливорює реалізацію принципу зустрічного регулювання – стратегії, за якої напругу в центрі живлення примусово підвищують у години пік і знижують при малому навантаженні для стабілізації напруги у віддалених споживачів. Це є головним технічним недоліком систем із ПБЗ порівняно з системами РПН.

1.2.2. Трансформатори з механічними РПН. На відміну від систем ПБЗ, силові трансформатори, оснащені модулями РПН (Регулювання Під Навантаженням) [5–8], являють собою більш складний та досконалий клас обладнання. Головна їхня відмінність полягає в інтеграції спеціалізованого електромеханічного пристрою, здатного змінювати кількість активних витків

обмотки без розриву ланцюга живлення споживачів. Окрім цього, такі агрегати характеризуються значно ширшим діапазоном регулювання (стандартно до $\pm 16\%$) та більшою дискретністю (кількістю шаблів) зміни напруги.

Розглянемо логіку роботи системи, спираючись на схему (рис. 1.8, б).

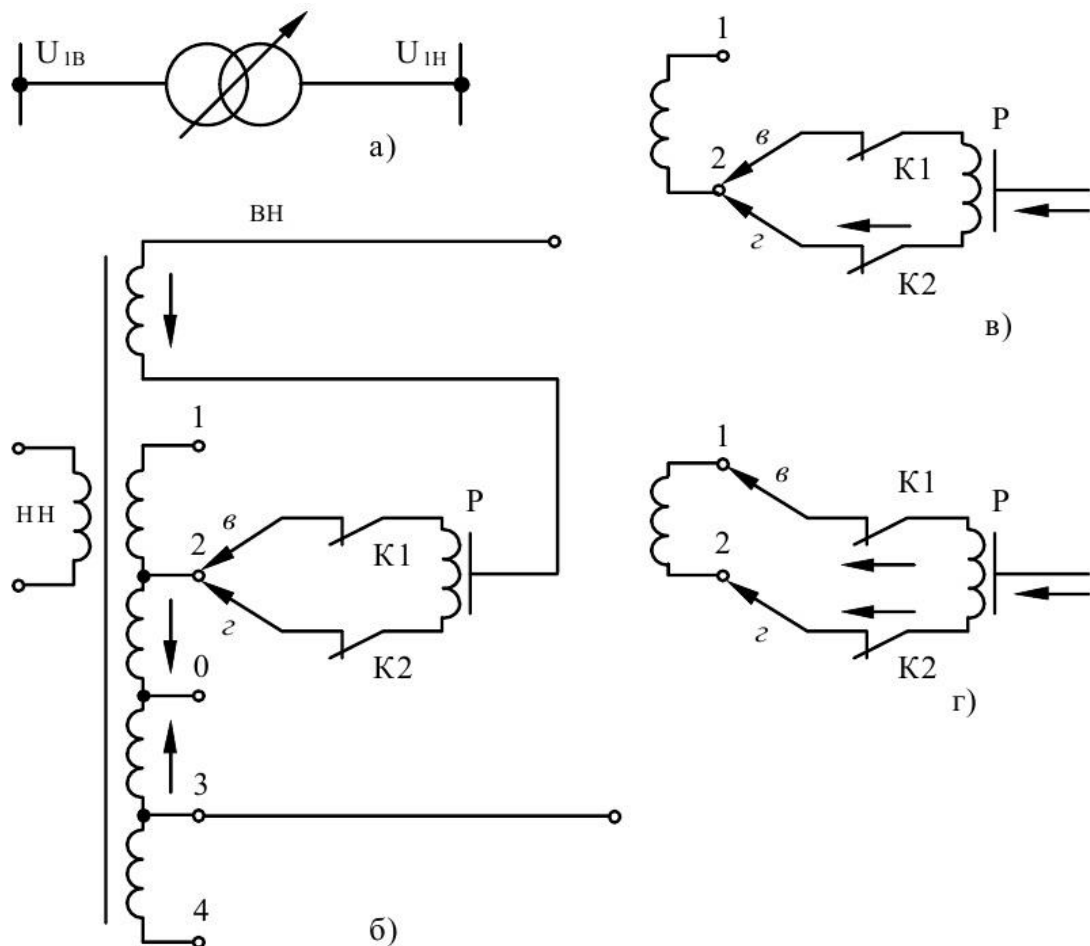


Рис. 1.8. Схема трансформатора з РПН:

а – умовне позначення; б – схема; в, г – порядок перемикання відгалужень

Обмотка високої напруги (ВН) у таких трансформаторах розділена на дві функціональні секції:

1. Основна (нерегульована) частина: Забезпечує базову трансформацію енергії.

2. Регулювальна частина: Містить набір відгалужень, підключених до нерухомих контактів селектора (позиції 1–4).

Унікальність схеми полягає у використанні спеціального перемикача полярності (предилектора), який дозволяє вмикати регулювальну обмотку двома способами:

- узгоджене ввімкнення (відгалуження 1-2): Вектор електрорушійної сили (ЕРС) регулювальної частини збігається за напрямком з ЕРС основної обмотки (показано стрілками на схемі). Це призводить до "додавання" витків i , як наслідок, збільшення коефіцієнта трансформації.
- зустрічне ввімкнення (відгалуження 3-4): Обмотка підключається "назустріч" основній. У цьому випадку її ЕРС віднімається від основної, що зменшує загальний коефіцієнт трансформації.

Точкою «0» позначено основний вивід. Важливо зазначити, що кількість витків для додавання (boost) та віднімання (buck) напруги може проектуватися як симетричною, так і несиметричною, залежно від специфіки мережі.

Сам механізм перемикання є критичним вузлом. На схемі зображено класичний реакторний тип комутації, що складається з рухомих контактів (в, г), силових контакторів (K_1 , K_2) та струмообмежувального реактора (Р). Середня точка реактора підключена до нерегульованої частини обмотки.

У стаціонарному режимі робочий струм навантаження ділиться порівну між двома плечима реактора. Оскільки струми в плечах течуть зустрічно, їхні магнітні потоки взаємно компенсуються, завдяки чому індуктивний опір реактора є мінімальним, а падіння напруги на ньому – незначним.

Процес перемикання вимагає чіткої послідовності дій для запобігання аваріям:

1. Розмикання K_1 (рис. 1.8, в): одне плече реактора знеструмлюється. Весь струм навантаження короткочасно протікає через друге плече та контакт K_2 .

2. Вибір відгалуження: Знеструмлений рухомий контакт переводиться з позиції 2 на позицію 1.

3. Замикання K_1 (режим «міста»): Контакт K_1 знову вмикається (рис. 1.8, г). У цей момент секція обмотки між відгалуженнями 1 і 2 виявляється замкнутою через реактор P . Виникає так званий циркуляційний струм, викликаний різницею потенціалів між сусідніми відгалуженнями (напругою щабля). Саме тут реактор виконує свою головну роль: його велика індуктивність обмежує цей струм до безпечних значень.

4. Завершення циклу: Розмикається контактор K_2 , рухомий контакт Γ переводиться на позицію 1, після чого K_2 знову замикається.

Варто додати, що хоча в тексті описано реакторну схему (поширену в США та старих радянських мережах), сучасним світовим стандартом є швидкодіючі резисторні перемикачі (тип Jansen). У них роль реактора виконують активні опори, які вводяться в коло лише на долі секунди (мілісекунди) під час прольоту контактів. Це робить пристрій компактнішим, але вимагає надійних пружинних механізмів для миттєвого перемикачання.

Наявність РПН дозволяє адаптувати коефіцієнт трансформації до поточного режиму споживання в реальному часі. Це відкриває можливість реалізації зустрічного регулювання: в години пік напругу автоматично піднімають, компенсуючи втрати в лінії, а вночі – знижують. Така гнучкість є фундаментом для автоматизації сучасних Smart Grid.

Однак технологія має суттєві мінуси:

- Висока вартість: трансформатор з РПН значно дорожчий за аналог з ПБЗ.
- Механічний знос: контакти, що комутують навантаження, піддаються ерозії дугою, а масло в баку контактора забруднюється продуктами розпаду, вимагаючи частого обслуговування або заміни.

У джерелі [9] також розглядаються альтернативні топології, наприклад, із використанням двох гілок грубого та однієї гілки тонкого регулювання. Шляхом послідовно-паралельних комбінацій цих гілок можна отримати

широкий діапазон напруг. Проте, практична реалізація таких схем ускладнена через необхідність надзвичайно складної комутаційної матриці, що знижує загальну надійність системи. Перспективним рішенням цієї проблеми в майбутньому вбачається перехід на напівпровідникові (тиристорні) комутатори, які позбавлені рухомих частин.

Для підвищення ефективності роботи мережі трансформатори з системою РПН, як правило, інтегруються з блоками автоматичного керування. Ці системи (автоматичні регулятори коефіцієнта трансформації) реалізують закладені алгоритми стабілізації напруги без участі оперативного персоналу.

Найбільш поширеним та базовим алгоритмом є принцип стабілізації за відхиленням напруги на шинах підстанції. На рис. 1.9 наведено функціональну структуру типового пристрою [10], що працює за цією логікою.

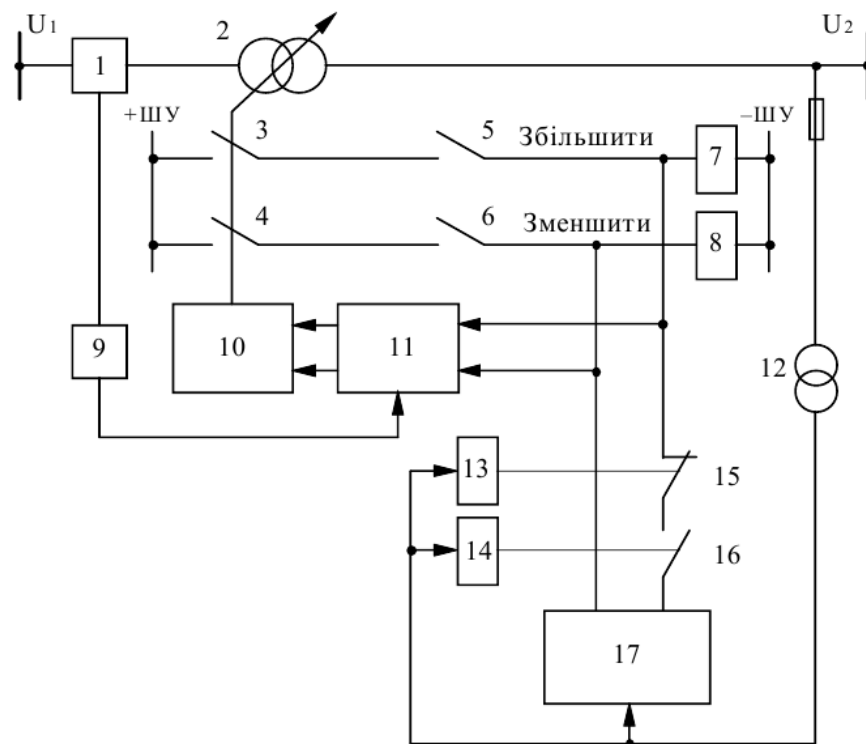


Рис. 1.9. Схема автоматичного пристрою регулювання напруги трансформатора

Ключовим параметром налаштування такого регулятора є «зона нечутливості» - діапазон напруги навколо номіналу, в межах якого регулятор не реагує на зміни, що дозволяє уникнути частих і непотрібних спрацьовувань (ефект "гойдалки").

Робота схеми базується на порівнянні поточної напруги з уставками:

1. Команда «Зменшити»: якщо виміряна напруга перетинає верхню межу зони нечутливості (стає зависокою), вимірювальний орган (блок 17) генерує імпульс на зниження. Цей сигнал надходить до електроприводу (блок 10), ініціюючи перехід на шабель із меншою напругою.

2. Команда «Збільшити»: при падінні напруги нижче встановленого мінімуму формується сигнал на підвищення коефіцієнта трансформації.

Оскільки процес механічного перемикавання контактів займає певний час (кілька секунд), а керуючий імпульс може бути короткочасним, у схемі передбачено механізм самопідхвату (запам'ятовування команди). Реле фіксації циклу (блок 8 для зниження або блок 7 для підвищення) утримують активний сигнал на приводі доти, доки механізм РПН повністю не завершить перехід на нове відгалуження. Це гарантує, що перемикач не зупиниться у проміжному положенні.

Критично важливою частиною схеми є система безпеки, що запобігає пошкодженню обладнання в аварійних режимах:

1. Блокування за струмом: Якщо під час запланованого перемикавання через трансформатор протікає струм короткого замикання (КЗ), робота РПН категорично заборонена. Контакти перемикача не розраховані на розрив струмів КЗ, і спроба комутації призведе до вибуху пристрою. Для цього використовується реле максимального струму (блок 1), яке через блокуючий елемент (блок 11) розриває ланцюг керування приводом. Якщо надструм виник вже в процесі перемикавання, схема дозволяє завершити розпочатий крок після ліквідації аварії.

2. Блокування при глибокій посадці напруги: у випадках значного зниження напруги (близького до зникнення живлення) формування команди

«Збільшити» примусово блокується. Це запобігає виведенню трансформатора на максимальну анцапфу, що могло б призвести до небезпечного стрибка напруги при відновленні нормального електропостачання.

Головним обмеженням описаного пристрою є відсутність зворотного зв'язку по струму навантаження (струмової компенсації). Регулятор підтримує стабільну напругу лише на виході трансформатора, не враховуючи падіння напруги в лініях електропередачі до споживача. Через це такий тип автоматики технічно не здатний реалізувати стратегію зустрічного регулювання, яка вимагає підвищення напруги на шинах підстанції пропорційно до зростання навантаження мережі.

У практиці експлуатації підстанцій значного поширення набули спеціалізовані контролери для керування приводами РПН, класичним представником яких є пристрій серії АРТ-1Н [16]. Ключовою технічною перевагою цього типу автоматики є використання алгоритму часової селекції. Суть методу полягає у формуванні команди на перемикання не миттєво, а з певною затримкою. Це виконує роль своєрідного часового фільтра, який дозволяє ігнорувати короточасні стрибки напруги (наприклад, при пуску потужних двигунів), запобігаючи хаотичній роботі приводу та підвищуючи загальну стійкість енергосистеми.

Окрім того, архітектура АРТ-1Н передбачає можливість дистанційного коригування базової уставки (заданого рівня напруги), що робить його зручним базовим елементом для побудови складніших систем диспетчерського керування [17, 18].

Проте, з точки зору сучасної електротехніки, даний тип регуляторів має суттєві архітектурні недоліки:

1. Відсутність прогнозування тренду: Пристрій не аналізує похідну зміни напруги (напрямок та швидкість зміни). Це призводить до ситуацій, коли регулятор починає перемикання, хоча напруга вже почала відновлюватися самостійно. Як наслідок – виконуються зайві комутації, що пришвидшує знос контактів РПН та вичерпує механічний ресурс обладнання.

2. Інерційність при аваріях: АРТ-1Н не має алгоритмів форсованої дії при глибоких просадках або стрибках напруги, продовжуючи відраховувати стандартну витримку часу, що знижує якість електроенергії в критичних режимах.

Окремим важливим завданням є реалізація струмової компенсації (Line Drop Compensation). Ця функція автоматично підвищує напругу на шини підстанції при зростанні струму навантаження, щоб компенсувати падіння напруги в довгих лініях і забезпечити нормальне живлення віддалених споживачів. Однак тут виникає небезпека для споживачів, що знаходяться близько до підстанції: надмірне підвищення напруги (щоб "проштовхнути" її в кінець лінії) може призвести до перенапруги на початку лінії.

Для вирішення цієї дилеми застосовують адаптивний спосіб регулювання [19], функціональну схему якого зображено на рис. 1.10.

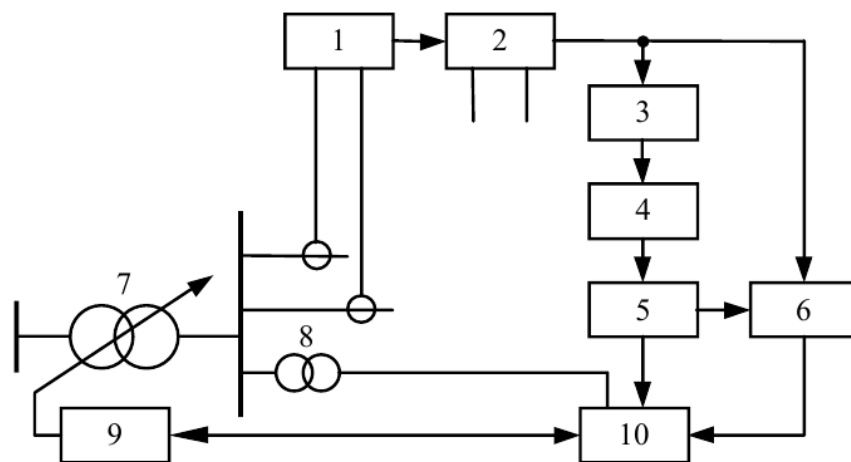


Рис. 1.10. Схема пристрою регулювання напруги трансформатора

Алгоритм працює наступним чином:

- моніторинг: система безперервно вимірює так звану "напругу компенсації", яка пропорційна струму навантаження (датчики 1 та 2).
- аналіз (блок 3): пусковий орган порівнює цю величину з гранично допустимим порогом безпеки.

- реакція: якщо розрахункова компенсація перевищує межу (що свідчить про ризик перенапруги для ближніх споживачів), сигнал через таймер затримки (блок 4) активує виконавчий механізм (блок 5).

- коригування: виконавчий орган примусово змінює уставку основного регулятора (блок 10) у бік зниження або блокує подальше зростання напруги (елемент 6).

Це дозволяє знайти компроміс: підтримувати напругу настільки високою, наскільки це безпечно для найближчого обладнання. Як тільки навантаження спадає, система автоматично повертає регулятор до штатного режиму роботи.

В більш досконалих моделях автоматичних регуляторів [31] реалізовано функцію аналізу динаміки процесу, а саме – визначення знака похідної від огинаючої кривої напруги. Впровадження цього математичного критерію дозволяє суттєво оптимізувати режим роботи механіки РПН, зменшивши кількість непотрібних комутацій, що прямо впливає на ресурс обладнання та надійність електропостачання в цілому. Функціональна логіка такого пристрою відображена на рис. 1.11.

Ключова відмінність цього алгоритму полягає у «інтелектуальній» оцінці необхідності регулювання. Команда на перемикання відгалуження (наприклад, для компенсації зниження напруги) формується системою лише за умови одночасного виконання двох вимог:

1. Статична умова: поточне значення напруги вийшло за межі встановленої зони нечутливості і залишається там протягом контрольного проміжку часу τ .

2. Динамічна умова: аналіз похідної показує, що напруга не має тенденції до самостійного повернення в норму.

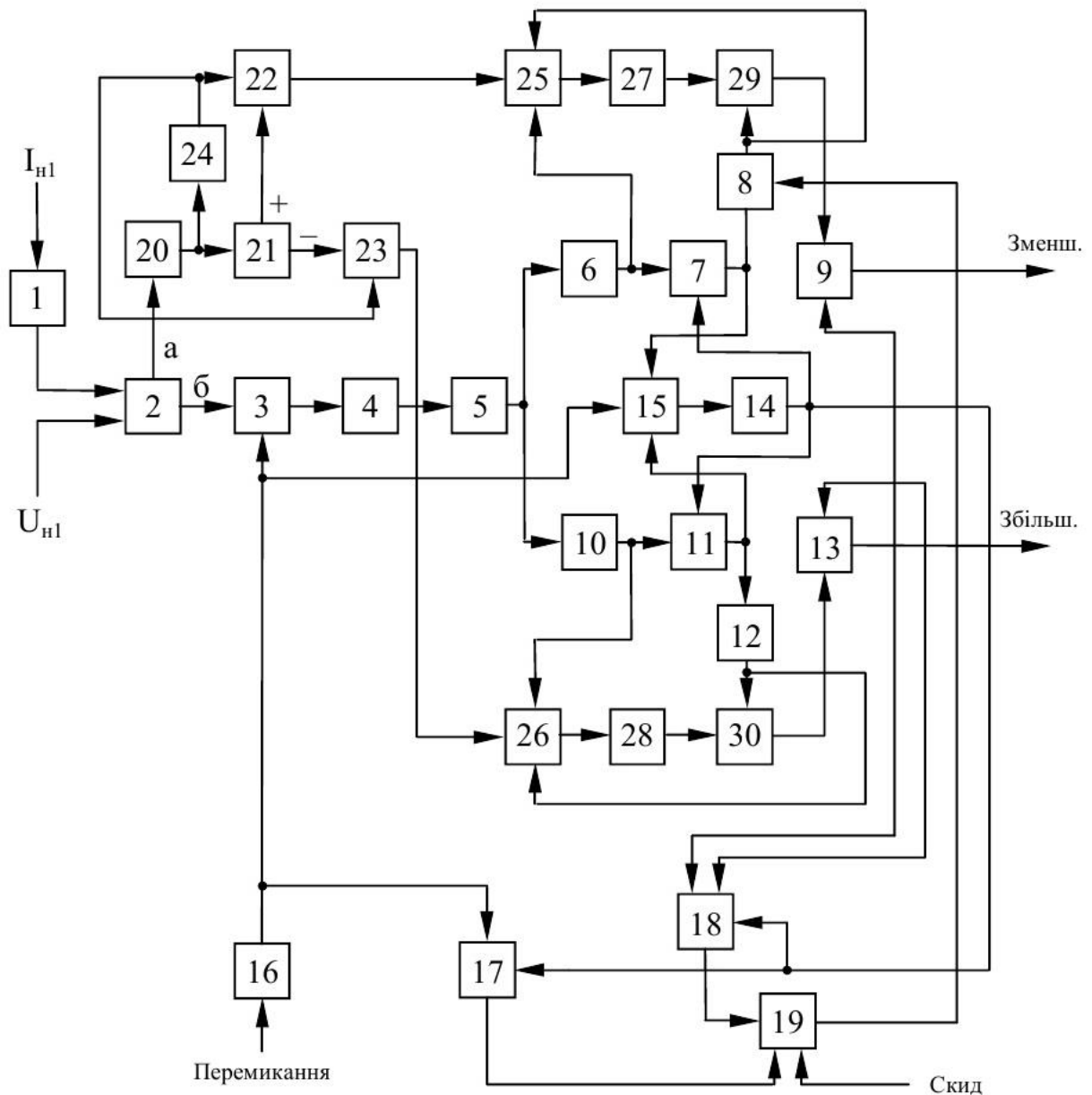


Рис. 1.11. Схема регулятора напруги

За реалізацію другої умови відповідає спеціалізований блок обчислення похідної.

Схема також містить розвинену систему самодіагностики (функціональні блоки 16–19). Цей контур безперервно моніторить стан електронних кіл регулятора та справність силового електроприводу. У разі виявлення будь-якої внутрішньої відмови (наприклад, обрив кола керування або заклинювання механізму), робота автоматики миттєво блокується, щоб запобігти аварійним режимам.

Незважаючи на прогресивність методу оцінки похідної, описаний спосіб (як і попередні аналоги) має суттєве експлуатаційне обмеження – інерційність.

Головною проблемою залишається жорстка прив'язка до часової затримки τ . Навіть у випадку критичного, глибокого падіння напруги (яке може бути небезпечним для технологічного процесу споживача), система все одно «чекає» закінчення часу τ перед тим, як діяти. Це унеможливорює миттєву компенсацію значних відхилень, що знижує загальний клас якості електроенергії і може призвести до відключення чутливого електронного обладнання ще до того, як регулятор встигне спрацювати.

1.2.3. Трансформатори з безконтактними (напівпровідниковими) системами РПН. Класичні електромеханічні системи РПН, попри їх поширеність, мають два фундаментальні недоліки: наявність рухомих контактів, що піддаються ерозії та потребують заміни масла, та значна інерційність. Повний цикл перемикання механічного приводу зазвичай займає не менше 5 секунд [42], що є неприпустимо повільно для сучасних динамічних навантажень.

Вирішенням цих проблем стало впровадження безконтактних комутаційних систем, побудованих на базі потужних напівпровідникових ключів (тиристорів або IGBT-транзисторів) [43]. Заміна механіки на електроніку дає революційний приріст швидкодії: час переходу з однієї відпайки на іншу скорочується до 10–20 мс (що відповідає тривалості одного напівперіоду промислової частоти 50 Гц). Така швидкість дозволяє здійснювати комутацію в момент переходу струму через нуль, що повністю виключає виникнення електричної дуги, мінімізує генерацію вищих гармонік і суттєво покращує динамічну стійкість системи електропостачання в цілому [42].

У науковій літературі розглядаються різні топології таких пристроїв. Наприклад, у джерелі [44] представлено схему регулятора змінної напруги на напівпровідниках (рис. 1.12).

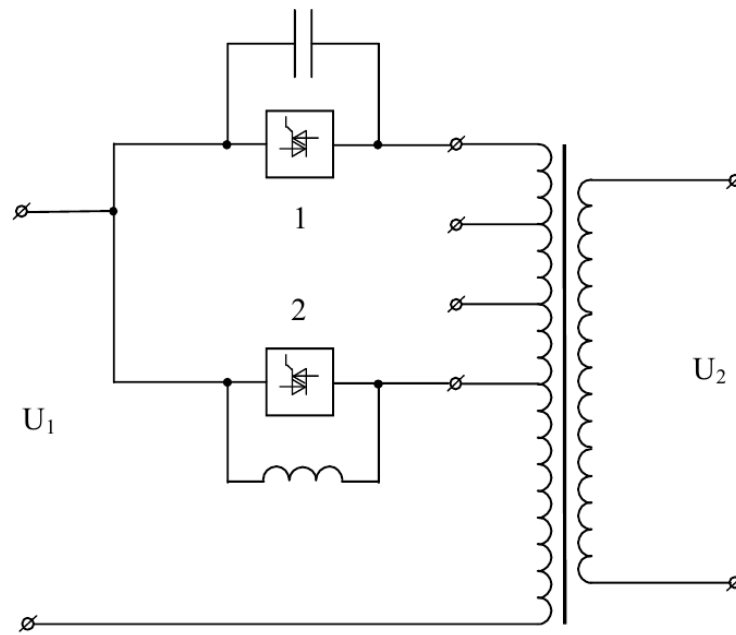


Рис. 1.12. Функціональна структура пристрою керування змінною напругою

Попри очевидні переваги у швидкості, цей варіант має слабкі місця:

1. Вразливість до перевантажень: напівпровідникові кристали мають дуже малу теплову інерцію, тому схема критично потребує швидкодіючого захисту від струмів короткого замикання, який у базовій версії відсутній.

2. Спотворення синусоїди: у перехідних режимах, особливо при фазовому регулюванні або несинхронізованому перемиканні, можлива генерація вищих гармонік, що забруднює мережу.

Окремий напрямок досліджень [49, 50] пропонує здійснювати регулювання напруги шляхом комутації секцій вторинної обмотки трансформатора (рис. 1.13). Ідея полягає у зміні кількості активних витків безпосередньо на стороні навантаження за допомогою тиристорних блоків.

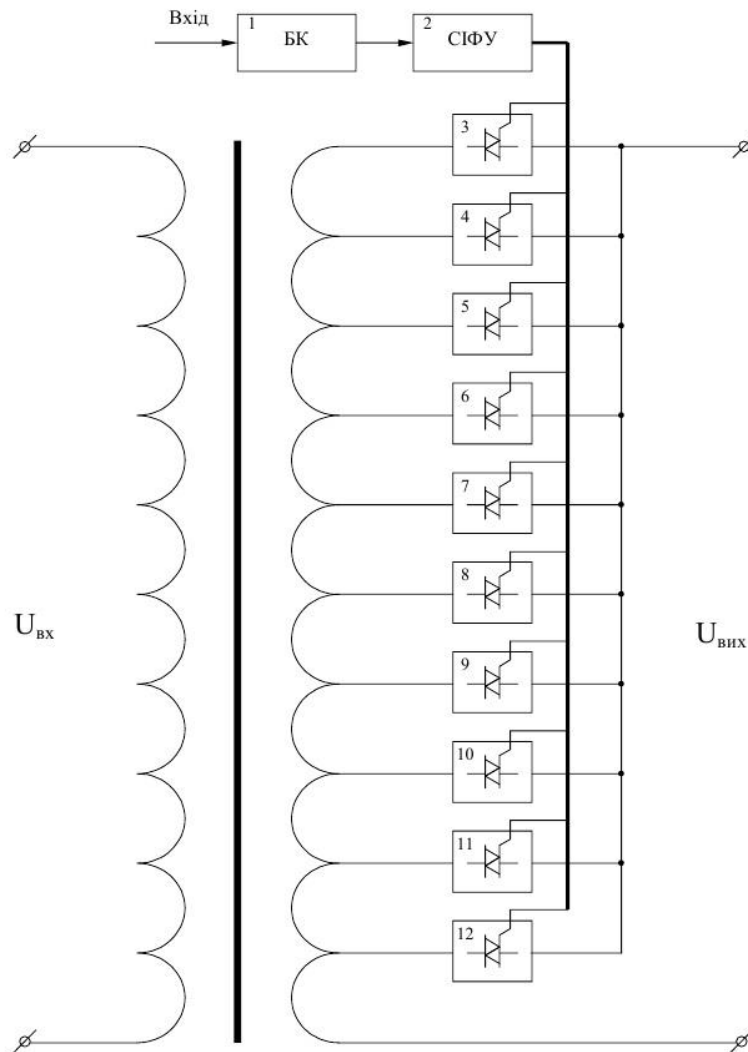


Рис. 1.13. Рис. 1.13. Функціональна схема системи регулювання трансформатора з тиристорним пристроєм РПН

Однак, інженерний аналіз виявляє суттєву економічну та технічну проблему такого підходу. Згідно із законом збереження енергії ($S = U \times I$), на вторинній стороні (низька напруга) протікають струми величезної величини. Для потужних силових трансформаторів ці значення досягають кількох тисяч ампер.

Оскільки одиничний тиристор має обмежену здатність пропускання струму, для реалізації ключа на стороні НН доводиться:

- збирати громіздкі збірки з десятків паралельно з'єднаних тиристорів.
- встановлювати масивні системи охолодження (радіатори, вентилятори) для відведення тепла, що виділяється на p-n переходах.

Це робить конструкцію надзвичайно дорогою, габаритною та складною в обслуговуванні, що нівелює переваги безконтактного методу. Тому більш перспективним вважається встановлення напівпровідників на стороні ВН, де струми значно менші.

1.3 Огляд методів та систем автоматичного керування коефіцієнтом трансформації

Інженерна еволюція засобів керування пристроями РПН призвела до появи широкого спектру систем автоматичного керування (САК), які відрізняються за складністю алгоритмів та апаратною реалізацією.

Фундаментальним і найпростішим алгоритмом, що застосовується в галузі, є стабілізація за відхиленням [19]. Суть методу полягає у постійному моніторингу вихідної напруги трансформатора та порівнянні її з еталонною уставкою. Приклад апаратної реалізації такої логіки наведено в джерелі [20], а функціональну схему відповідного пристрою зображено на рис. 1.14.

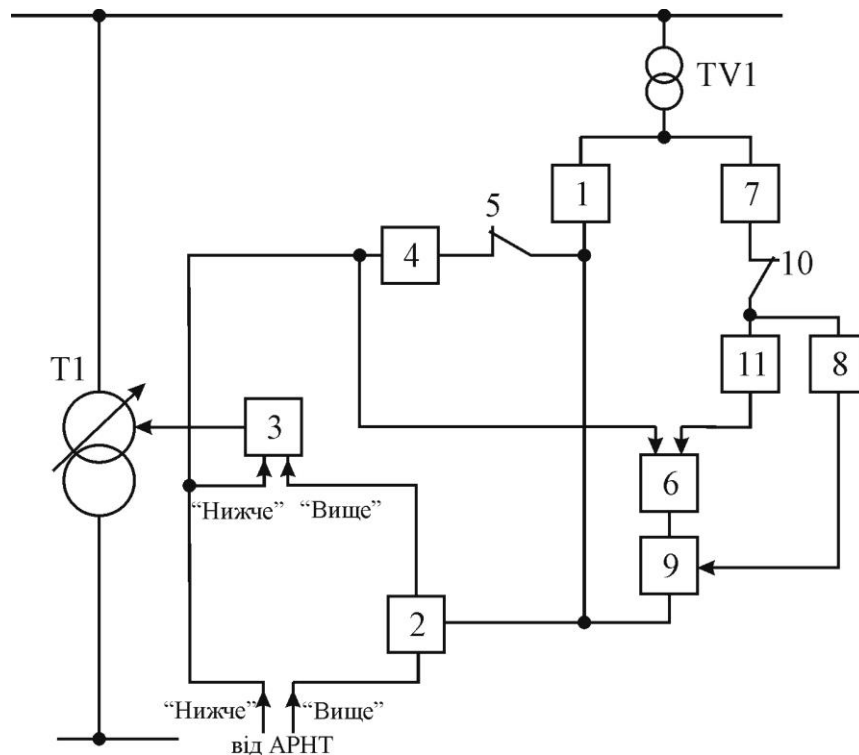


Рис. 1.14. Структурна схема пристрою керування напругою

Попри простоту, цей підхід має суттєві вади:

- ігнорування навантаження: система "не бачить" струму споживача, а отже, не може компенсувати падіння напруги в лінії (відсутність зустрічного регулювання).
- відсутність пофазного керування: більшість таких схем працюють за усередненим значенням напруги або контролюють лише одну фазу, що унеможливує балансування несиметричних режимів шляхом пофазної зміни коефіцієнтів трансформації (для спеціальних трансформаторів).

Більш прогресивним підходом є алгоритм, що враховує втрати напруги в розподільчій мережі – так зване зустрічне регулювання (Line Drop Compensation).

Протягом тривалого часу промисловим стандартом для реалізації цього закону залишався регулятор АРТ-1Н [7, 11, 23] (функціональна схема – рис. 1.15).

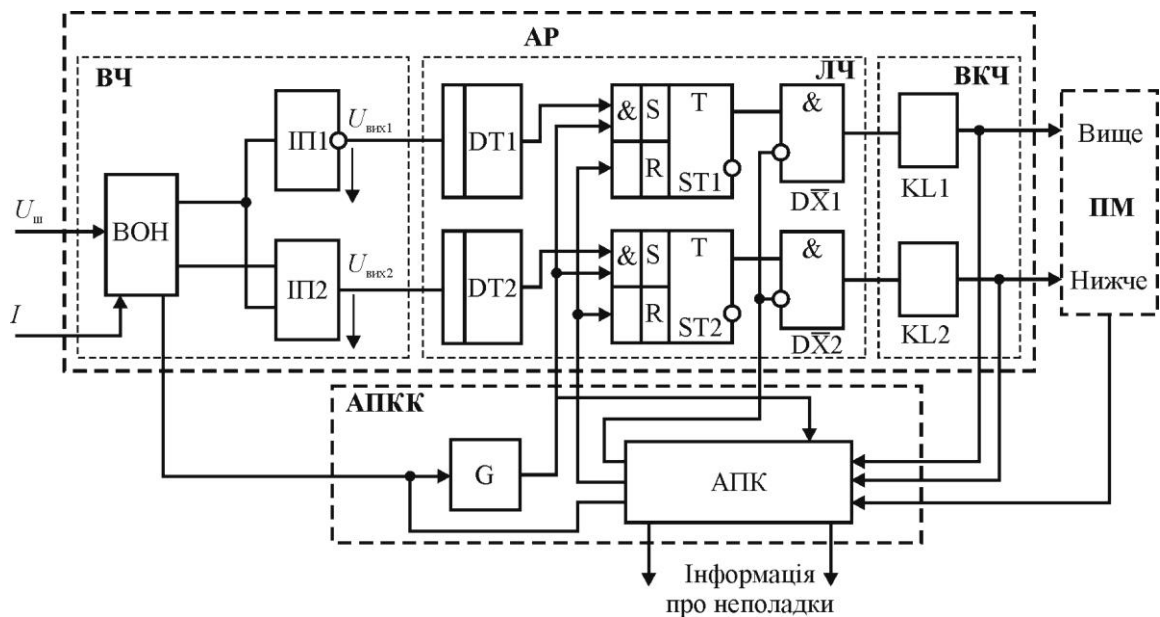


Рис. 1.15. Структурна схема автоматичного регулятора АРТ-1Н

Цей пристрій намагається утримувати напругу у віддаленого споживача в межах норми, підвищуючи напругу на шинах підстанції

пропорційно до струму навантаження. Проте, аналіз його роботи виявляє низку слабких місць:

1. Відсутність прогнозування: Регулятор не визначає знак похідної (напрямок зміни напруги), через що часто виконує помилкові перемикання в моменти, коли напруга вже почала відновлюватись самостійно.

2. Низька динаміка: АРТ-1Н не розрахований на відпрацювання різких збурень, що призводить до короточасних виходів напруги за нормативні межі.

У роботі [24] запропоновано модифікацію цього методу для захисту споживачів, розташованих близько до підстанції. Суть вдосконалення полягає в адаптивній зміні уставки: якщо струмова компенсація розраховує занадто високу напругу (небезпечну для "ближніх" споживачів), система автоматично обмежує верхню межу регулювання. Однак, оскільки це рішення є надбудовою над класичною схемою АРТ-1Н, воно успадковує всі інерційні недоліки базового пристрою.

Аналіз алгоритмів роботи існуючих пристроїв дозволив виявити ключовий фактор, що впливає на знос обладнання – часову затримку спрацювання τ .

Цей параметр виступає фільтром низьких частот, відсіюючи короточасні флуктуації напруги. Тут виникає класичний конфлікт оптимізації:

- велика затримка зменшує кількість перемикань, суттєво подовжуючи механічний ресурс РПН, але призводить до тривалого перебування споживачів під "поганою" напругою (зниження якості електроенергії).

- мала затримка забезпечує ідеальну якість напруги, але призводить до частого спрацювання приводу, швидкого обгорання контактів і вичерпання ресурсу.

Найбільш ефективним рішенням цієї дилеми вбачається створення адаптивної САК, де величина затримки τ не є константою, а динамічно змінюється залежно від поточного "бюджету перемикань". Наприклад, якщо

за останню добу РПН спрацьовував надто часто, система автоматично збільшує затримку, "жертвуючи" точністю заради збереження ресурсу.

Складність реалізації такої адаптивної системи полягає в тому, що залежність між оптимальною затримкою, кількістю перемикачів і якістю напруги є суттєво нелінійною. Класичні математичні моделі (диференціальні рівняння) не здатні ефективно описати стохастичний характер зміни навантаження та зносу контактів.

Враховуючи фактичну неможливість побудови точної детермінованої моделі, найбільш доцільним інструментом для синтезу закону керування є апарат нечіткої логіки (Fuzzy Logic). Цей метод дозволяє формалізувати експертні знання у вигляді лінгвістичних правил, забезпечуючи гнучке керування в умовах невизначеності.

Висновки до розділу

1. На основі проведеного аналізу існуючих методів стабілізації параметрів електроенергії встановлено, що забезпечення нормативних показників якості напруги на затискачах кінцевих споживачів є складною технічною задачею. Її вирішення вимагає застосування ієрархічної системи керування, яка поєднує як засоби централізованого регулювання (на рівні центрів живлення енергосистеми), так і заходи локальної корекції безпосередньо у вузлах розподільчих мереж.

2. Визначено, що для умов сучасних розподільчих електричних мереж (РЕМ) найбільш технічно ефективним та економічно обґрунтованим методом керування режимами є дискретна зміна коефіцієнта трансформації. Головним силовим елементом реалізації цього підходу виступають трансформатори, оснащені системами регулювання під навантаженням (РПН). Саме ці пристрої забезпечують можливість динамічної адаптації рівнів напруги відповідно до добових графіків навантаження без перерви в електропостачанні.

3. Критичний огляд існуючих алгоритмів керування приводами РПН показав, що найбільш прогресивними на сьогодні є системи, що реалізують принцип зустрічного регулювання (компенсація падіння напруги в лінії). Однак, класичні апаратні реалізації цього закону (наприклад, на базі реле типу АРТ-1Н) мають обмежену ефективність через жорстку логіку роботи та неможливість адаптації часової затримки до умов експлуатації. Це призводить до прискореного зносу обладнання або зниження якості напруги, що обґрунтовує доцільність розробки нових, адаптивних законів керування, зокрема з використанням методів нечіткої логіки.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ СИНТЕЗУ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ НАПРУГОЮ В РОЗПОДІЛЬЧИХ МЕРЕЖАХ

2.1. Формулювання науково-технічної задачі керування режимами напруги РЕМ

Впровадження будь-якого інноваційного підходу в інженерну практику неможливе без ґрунтовного опрацювання його теоретичного базису. Тому першочерговим етапом дослідження є систематизація та опис фундаментальних принципів, на яких будується пропонована методика. Це передбачає не лише загальну характеристику методу, але й формалізацію математичних законів, правил логічного виведення та алгоритмічних процедур, що лежать в основі процесу прийняття рішень системою керування.

Критично важливим аспектом наукового пошуку є чітке окреслення області ефективного застосування запропонованого алгоритму. Такий аналіз дозволяє об'єктивно оцінити співвідношення переваг та недоліків методу, а також ідентифікувати класи прикладних задач, де його використання є найбільш виправданим. З методичної точки зору, найбільш доцільним шляхом верифікації є розв'язання ряду тестових (характерних) задач з подальшим порівняльним аналізом ефективності нового алгоритму відносно класичних підходів. Це дає змогу виявити специфічні умови експлуатації, в яких особливості методу проявляються найяскравіше.

У контексті керування складними технічними об'єктами, теорія нечітких множин (Fuzzy Logic) демонструє найвищу ефективність при вирішенні задач ситуаційного аналізу та прийняття рішень в умовах інформаційної невизначеності. Це особливо актуально в ситуаціях, коли:

- Неможливо отримати точні кількісні виміри всіх параметрів системи в реальному часі.
- Об'єкт керування характеризується суттєвою нелінійністю та стохастичним характером збурень (випадкові зміни навантаження).
- Застосування детермінованих математичних методів вимагає надмірних обчислювальних потужностей або неприпустимо великих часових витрат для знаходження оптимуму.

Саме тому інтеграція принципів нечіткого керування (Fuzzy Control) в системи автоматизації електроенергетичних об'єктів вважається одним із найперспективніших напрямків розвитку галузі.

У рамках даної магістерської роботи фокус дослідження зосереджено на синтезі системи нечіткого регулювання напруги для розподільчих та живлячих мереж середнього і низького класів напруги: від 0,4 кВ до 10 (35) кВ. Специфіка цих мереж полягає у безпосередній близькості до кінцевого споживача, що накладає суворі вимоги до якості електроенергії.

Головним критерієм якості керування обрано утримання відхилень напруги в межах, регламентованих чинним стандартом ДСТУ EN 50160:2023 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення». Згідно з цим документом, система повинна забезпечувати стабілізацію напруги (зазвичай у діапазоні $\pm 10\%$ від номіналу) при збереженні інших показників якості електроенергії.

Окреслені проблеми автоматизації є фундаментальними для електроенергетики. Їх актуальність не залежить від поточної кон'юнктури енергоринку чи економічних циклів, оскільки надійність та якість електропостачання є базовими вимогами функціонування інфраструктури. У цьому контексті створення гібридних систем, що поєднують перевірені часом класичні методи з потужними алгоритмами штучного інтелекту (до яких належить нечітка логіка), є важливим кроком до побудови інтелектуальних мереж (Smart Grid).

Варто зазначити, що дана робота не ставить за мету розробку нових фізичних моделей елементів електричної мережі (трансформаторів, ліній). Основна мета дослідження полягає в іншому – у пропозиції та обґрунтуванні нового математичного інструментарію для вирішення класичної інженерної задачі, оцінці його ефективності та визначенні меж, де використання нечіткого регулятора дозволяє перевершити традиційні системи керування за показниками швидкодії та ресурсу обладнання.

2.2 Обґрунтування вибору математичного інструментарію для автоматизації керування напругою

Базисом для побудови систем нечіткого керування (Fuzzy Control) виступає фундаментальний математичний апарат теорії нечітких множин (Fuzzy Sets Theory). Для глибокого розуміння принципів роботи розроблюваного регулятора необхідно детально розглянути аксіоматику цієї теорії. Ключовими аспектами, що потребують аналізу в рамках даного дослідження, є правила нечіткої арифметики, операції над нечіткими величинами, а також методи синтезу лінгвістичних моделей та алгоритмів прийняття рішень. Саме викладенню цих теоретичних засад присвячено даний підрозділ.

2.2.1. Основи нечіткої арифметики та математичного моделювання. Класична математика оперує точними числовими значеннями. Проте в реальних електроенергетичних задачах ми часто стикаємося з ситуацією, коли аналітична залежність між входом та виходом об'єкта $y = f(x)$ є відомою (наприклад, закон Ома або рівняння стану трансформатора), але параметри вхідних сигналів неможливо виміряти з абсолютною точністю.

У таких випадках на зміну скалярним величинам приходять нечіткі числа. Це особливий клас нечітких множин, який дозволяє формалізувати

наближені дані. Наприклад, замість точного твердження «напруга дорівнює 220 В», використовується лінгвістична оцінка «напруга приблизно 220 В».

Принцип обробки нечітких даних полягає в наступному. Нехай вхідні змінні задані нечіткими числами:

- $x_1 =$ «близько 9»;
- $x_2 =$ «близько 10».

Якщо математична модель об'єкта описується функцією суми $y = x_1 + x_2$, то результатом операції буде не конкретне число 19, а нове нечітке число y . Графічно воно буде представлене функцією належності, центр якої знаходиться в точці 19, а "ширина" основи (носій множини) буде визначатися сумою невизначеностей доданків (рис. 2.1).

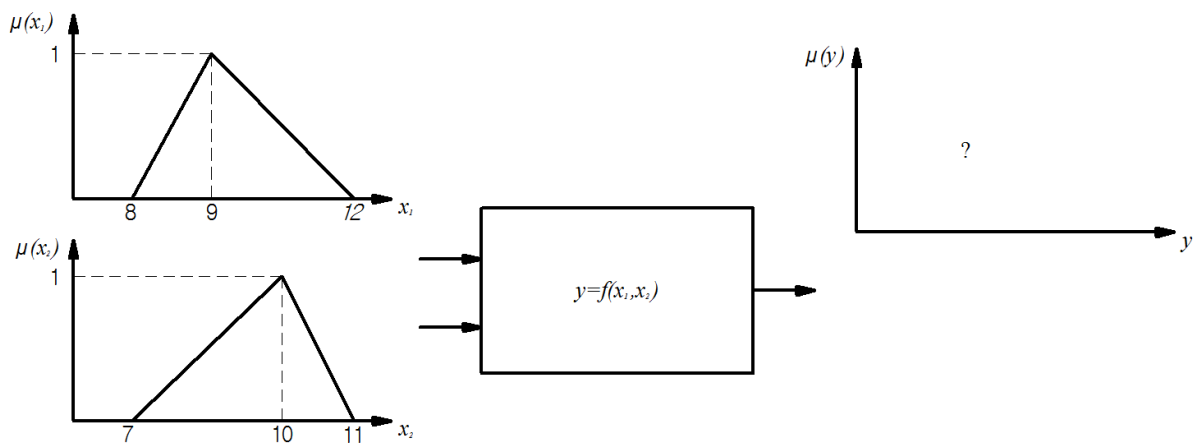


Рис. 2.1. Визначення нечіткого вихідного параметра моделі за нечіткими даними про вхідні величини

Такий підхід базується на принципі узагальнення (Extension Principle), який дозволяє поширити будь-які алгебраїчні операції (додавання, множення, ділення) з області дійсних чисел на область нечітких множин. Це дає можливість моделювати поведінку системи керування РПН навіть за умов, коли інформація від датчиків є зашумленою або неповною.

У випадках, коли функціонування системи описується аналітичним рівнянням, $y = f(x)$ що включає стандартні алгебраїчні дії (сумування, віднімання, множення чи ділення), виникає необхідність адаптації цих операцій для роботи з нечіткими аргументами. Розробка коректних методів виконання таких обчислень є критично важливою, оскільки вона відкриває можливість інтеграції суб'єктивних експертних оцінок (які базуються на інтуїції та досвіді персоналу) у суворі рамки класичних математичних моделей.

Особливу цінність ці методи мають для побудови гібридних архітектур. У таких системах можливе поєднання "чітких" (crisp) та "нечітких" (fuzzy) функціональних блоків. Наприклад, вихідний сигнал нечіткого контролера може бути використаний як вхідний параметр для стандартного ПД-регулятора, або навпаки – чіткі фізичні величини можуть проходити попередню обробку перед фазифікацією. Це дозволяє поєднати точність класичної теорії керування з гнучкістю інтелектуальних систем.

Теоретичним фундаментом нечіткої арифметики є концепція, згідно з якою будь-яка операція над дійсними числами може бути екстрапольована на нечіткі множини. Цей підхід був сформульований засновником теорії нечітких множин Лотфі Заде і отримав назву «Принцип узагальнення» (Extension Principle).

Суть принципу полягає у трансфері ступенів належності з області визначення в область значень функції. Це дозволяє розрахувати функцію належності вихідної величини, спираючись на відомі функції належності вхідних параметрів.

Розглянемо застосування цього принципу для двох базових топологій систем керування:

1. SISO (Single Input Single Output): Системи з одним входом і одним виходом.
2. MISO (Multiple Input Single Output): Системи з векторним входом (декілька параметрів) та скалярним виходом.

Нехай задано класичну детерміновану систему SISO, яка здійснює відображення f , трансформуючи множину вхідних значень X у множину вихідних значень Y (графічна ілюстрація процесу наведена на рис. 2.2).

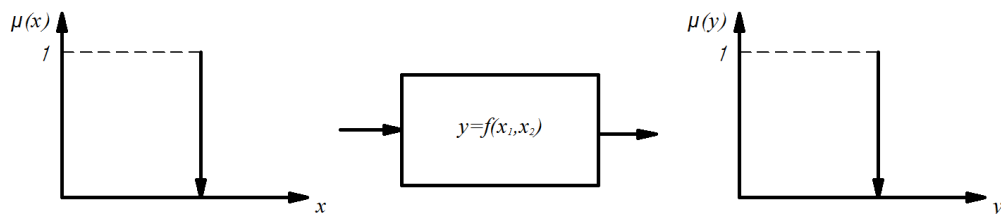


Рис. 2.2. Класична система SISO (один вхід – один вихід) із чітким вхідним параметром x та вихідним y

Якщо вхідний сигнал x стає нечітким, принцип узагальнення дозволяє однозначно визначити форму нечіткого виходу y .

Розглянемо випадок, коли на вхідній множині (універсумі) X визначено нечітку множину A . Якщо задано деяке функціональне відображення f , то згідно з принципом узагальнення, образом множини A буде нова нечітка множина $B = f(A)$, визначена на вихідній множині Y .

Аналітично це перетворення записується у вигляді виразу (2.1), де символ \cup позначає операцію логічного об'єднання (агрегації) усіх елементів, що формують вихідну множину:

$$B = f(A) = \bigcup_{x \in X} \left\{ \frac{\mu_A(x)}{y} \mid y = f(x) \right\} \quad (2.1)$$

У контексті інженерних задач електроенергетики, таких як керування режимами РЕМ, фізичні величини (напруга U , струм I , коефіцієнт потужності $\cos\varphi$) є неперервними. Тому в подальших викладках ми виходимо з припущення, що предметні області вхідних X та вихідних Y змінних відповідають множині дійсних чисел (або її підмножинам).

Нехай зв'язок між чітким входом x та чітким виходом y описується детермінованою функцією:

$$y = f(x), \quad \text{де } x \in X, y \in Y \quad (2.2)$$

У цьому випадку, застосовуючи принцип узагальнення для системи типу SISO (Single Input Single Output – «один вхід, один вихід»), функція належності вихідного параметра $\mu_B(y)$ визначається через супремум (точну верхню межу) функцій належності вхідних значень по всім x , які відображаються в даний y :

$$\begin{cases} \mu_B(y) = \sup_{x: y=f(x)} \mu_A(x) \\ \mu_B(y) = 0, \quad \text{якщо } \{x \mid y = f(x)\} = \emptyset \end{cases} \quad (2.3)$$

Фізичний зміст виразу (2.10) полягає в наступному: якщо існують кілька різних значень вхідної напруги x , які в результаті перетворення функцією f дають одне й те саме значення керуючого впливу y , то ступінь істинності (належності) для цього y обирається рівним найбільшому зі ступенів належності цих вхідних значень.

Для практичних реалізацій, де кількість елементів дискретна або функція неперервна на компактi, операцію пошуку супремуму (\sup) можна замінити на простішу операцію пошуку максимуму (\max). Тоді формула (2.3) трансформується у вираз (2.4):

$$\mu_B(y) = \max_{x: y=f(x)} \mu_A(x) \quad (2.4)$$

Графічна інтерпретація цього процесу наведена на рис. 2.3.

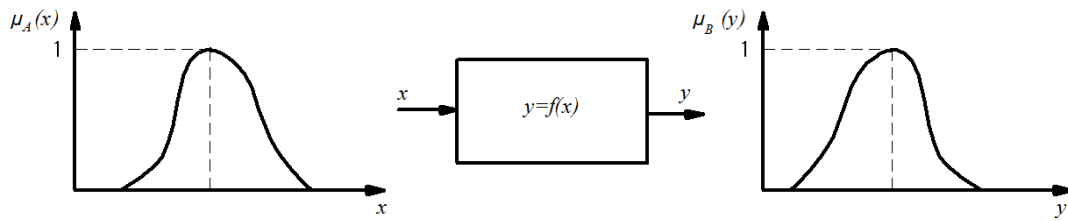


Рис. 2.3. Перетворення нечіткого входу x у нечіткий вихідний параметр y традиційною SISO-системою

Вона наочно демонструє, як форма "купола" функції належності вхідної змінної деформується при проходженні через функціональне перетворення, формуючи вихідну нечітку множину.

Архітектурною основою будь-якої нечіткої моделі є база знань, яка формується із сукупності лінгвістичних правил продукційного типу. У загальному вигляді таке правило встановлює причинно-наслідковий зв'язок між входом та виходом системи і записується наступним чином:

$$\text{ПРАВИЛО}_i: \text{ЯКЩО} \langle \text{умова} \rangle \text{ ТО} \langle \text{висновок} \rangle \quad (2.5)$$

Для математичної реалізації цього лінгвістичного опису використовується набір спеціалізованих процедур, об'єднаних терміном «нечітка математика». Цей інструментарій дозволяє перетворити якісні експертні оцінки на кількісні керуючі сигнали.

Розглянемо структуру правила для типової системи керування з двома входами (MISO – Multi Input Single Output), яка є найбільш релевантною для задач регулювання напруги (де входами можуть бути, наприклад, відхилення напруги x_1 та швидкість її зміни x_2). Формальний запис такого правила виглядає так:

$$\text{ЯКЩО}(x_1 \in A) \text{ І}(x_2 \in B), \text{ ТО}(y \in C) \quad (2.6)$$

У цьому виразі:

- Антецедент (ліва частина): Містить умови, де A та B – це нечіткі терми (лінгвістичні оцінки, наприклад, «МАЛЕ», «СЕРЕДНЄ», «НЕГАТИВНЕ»), задані відповідними функціями належності $\mu_A(x_1)$ та $\mu_B(x_2)$.
- Консеквент (права частина): Визначає вихідну дію C (наприклад, «ЗБІЛЬШИТИ НАПРУГУ»).
- Оператори: Ключовими елементами є логічні зв'язки «І» (AND), «АБО» (OR), а також імплікація «ЯКЩО-ТО» (IF-THEN).

Саме ці оператори виконують роль "цементу", що скріплює окремі лінгвістичні поняття в єдиний алгоритм. Точність та адекватність синтезованої моделі критично залежить від двох факторів:

1. Гранулярності термів: кількості, форми та параметрів обраних функцій належності (трикутні, гаусові, трапецієподібні).
2. Математичної інтерпретації логічних зв'язок: вибору конкретних формул для реалізації операцій перетину та об'єднання.

У теорії нечітких множин базові логічні зв'язки реалізуються через класи операторів:

1. Оператор перетину (Intersection): Відповідає логічному зв'язку «І». У математичному сенсі він моделюється за допомогою трикутних норм (t-norms). Найпоширенішими реалізаціями є:
 - Min-перетин (Заде): $\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$;
 - Алгебраїчний добуток: $\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)$.
2. Оператор об'єднання (Union): Відповідає зв'язці «АБО». Реалізується через трикутні конорми (s-norms). Типові приклади:
 - Max-об'єднання (Заде): $\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$;
 - Алгебраїчна сума: $\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)$.

Фундатор теорії Лотфі Заде розробляв нечітку логіку як гармонійне розширення класичної булевої алгебри. Він постулював, що класична

двозначна логіка (де істина = 1, хиба = 0) є граничним, частинним випадком нечіткої.

Це накладає певну аксіоматичну вимогу: граничні умови. Тобто, якщо функції належності приймають лише значення 0 або 1, то результати нечітких операцій повинні повністю співпадати з результатами класичних операцій булевої алгебри.

Однак, у сучасних інженерних застосуваннях часто відходять від жорстких канонічних операторів. *min / max* Для підвищення чутливості регуляторів використовують так звані компенсаційні оператори (наприклад, γ -оператор), які дозволяють гнучко налаштовувати "жорсткість" прийняття рішень, навіть якщо вони не повною мірою задовольняють аксіоматику класичної теорії множин.

Фундаментальною вимогою при побудові теорії нечітких множин є забезпечення граничної сумісності: будь-яка нечітка операція при роботі з чіткими значеннями (ступені належності $\mu(x) \in \{0,1\}$) повинна давати результати, ідентичні результатам булевої алгебри. Виходячи з цього принципу, для операції об'єднання (яка математично реалізується через клас функцій, званих s-нормами), можна сформулювати ряд бажаних алгебраїчних властивостей (2.7)–(2.12).

1. Комутативність. Ця властивість стверджує інваріантність результату відносно порядку операндів:

$$A \cup B = B \cup A \quad (2.7)$$

Порядок надходження сигналів на вхід регулятора не має значення. Результат об'єднання нечітких термів «НАПРУГА МАЛА» та «СТРУМ ВЕЛИКИЙ» буде однаковим, незалежно від того, яка змінна розглядається першою.

2. Асоціативність. Властивість, що дозволяє довільно групувати елементи при послідовних операціях:

$$(A \cup B) \cup C = A \cup (B \cup C) \quad (2.8)$$

Це дає можливість виконувати об'єднання множин послідовно, парами, без зміни кінцевого результату, що спрощує алгоритми обробки даних у багатовимірних (MISO) системах.

3. Ідемпотентність. Властивість самоподібності при об'єднанні множини самій з собою:

$$A \cup A = A \quad (2.9)$$

Дана властивість виконується для класичного *max*-оператора, але може порушуватися для деяких альтернативних *s*-норм (наприклад, для алгебраїчної суми, де результат може перевищити вихідне значення, якщо воно не нормоване).

4. Гранична умова (об'єднання з порожньою множиною). Порожня множина \emptyset (де функція належності $\mu(x) \equiv 0$ на всьому універсумі) виступає нейтральним елементом для операції об'єднання:

$$A \cup \emptyset = A \quad (2.10)$$

5. Поглинання (об'єднання з універсальною множиною). Універсальна множина X (де $\mu(x) \equiv 1$) є домінуючим елементом. Результатом такої операції завжди буде сам універсум:

$$A \cup X = X \quad (2.11)$$

6. Закон виключеного третього. У класичній логіці об'єднання множини A та її доповнення \bar{A} завжди дає універсум (істину):

$$A \cup \bar{A} \neq X \quad (2.12)$$

Це ключовий пункт розбіжності. У нечіткій логіці закон виключеного третього (2.12) часто не виконується. Оскільки елемент може належати множині A зі ступенем 0,6, а її доповненню \bar{A} зі ступенем $1 - 0,6 = 0,4$, то їх *max*-об'єднання дасть 0,6, що не дорівнює 1 (істині).

Це означає, що в нечітких системах існує стан невизначеності, коли об'єкт не є ні повністю A , ні повністю «не A ». Саме ця властивість дозволяє фаззі-контролерам здійснювати плавне, безступінчасте регулювання, уникаючи жорстких бінарних перемикачів.

2.2.2. Архітектура та функціональні блоки нечіткої моделі. Типова структурна схема нечіткого контролера, розрахованого на обробку двох вхідних параметрів та генерацію одного керуючого впливу (система класу MISO), наведена на рис. 2.4.

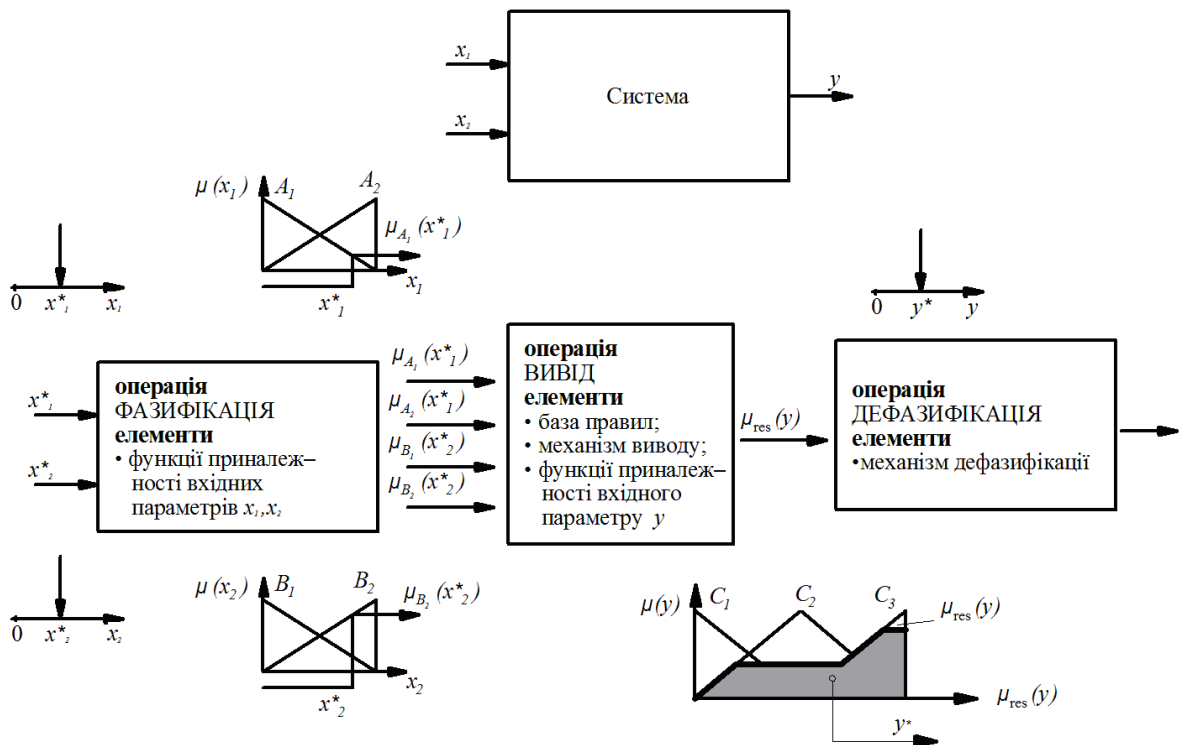


Рис. 2.6. Структура нечіткої моделі з двома вхідними параметрами та одним вихідним

Процес перетворення інформації в такій системі відбувається поетапно через каскад функціональних блоків.

Етап 1: Фазифікація (Fuzzification). На першому етапі на вхід системи надходять чіткі (crisp) числові значення вимірних фізичних величин x_1^* та x_2^* . У контексті регулювання напруги це можуть бути, наприклад, миттєве значення відхилення напруги (δU) та швидкість її зміни ($d(\delta U) / dt$).

Головне завдання блоку фазифікації – трансформувати ці фізичні величини у формат лінгвістичних змінних. Для цього використовується набір попередньо визначених функцій належності $\mu_{A_i}(x_1)$ та $\mu_{B_j}(x_2)$, які зберігаються в пам'яті контролера.

Результатом роботи цього блоку є набір ступенів належності $\mu_{A_i}(x_1^*)$ та $\mu_{B_j}(x_2^*)$. Ці величини, що лежать у діапазоні $[0,1]$, кількісно характеризують, наскільки вхідні параметри відповідають лінгвістичним термам.

Приклад: Якщо вхідна напруга становить 205 В, фазифікатор може визначити, що це значення належить до терму «НИЗЬКА» (B_1) зі ступенем 0,8 і до терму «НОРМАЛЬНА» (B_2) зі ступенем 0,2.

Етап 2: Блок логічного виведення. Це центральний обчислювальний вузол моделі («мозок» регулятора). Блок виведення оперує отриманими ступенями належності і на їх основі формує результуючу функцію належності вихідної змінної $\mu_{res}(y)$. Геометрично ця функція часто має складну, багатoverшинну форму, оскільки є суперпозицією кількох активних правил.

Для коректної роботи машина виведення базується на трьох фундаментальних компонентах:

1. База Знань (Rule Base): Репозиторій продукційних правил, що формалізують експертний досвід керування об'єктом.

2. Вихідні лінгвістичні змінні: Набір функцій належності для вихідного параметра y (наприклад, команди для приводу РПН: «ПІДНЯТИ», «ОПУСТИТИ»).

3. Алгоритм виведення: Математичний апарат, що реалізує процедуру прийняття рішень.

Логічні правила встановлюють причинно-наслідкові зв'язки між станом мережі (входами) та необхідною реакцією (виходом). Типовий запис правила має вигляд (2.13):

$$R_k : \text{ЯКЩО } x_1 \in A_i \text{ І } x_2 \in B_j, \text{ ТО } y \in C_k \quad (2.13)$$

Процедура формування вихідної функції $\mu_{res}(y)$ є ітеративною і складається з трьох послідовних кроків (елементів алгоритму):

1. Агрегування антецедентів (Element IM1). На цьому кроці визначається ступінь істинності (вага) кожного окремого правила R_k . Оскільки умова правила зазвичай містить оператор «І» (наприклад, «напруга низька» І «струм великий»), для обчислення ваги правила α_k використовується операція перетину (min-кон'юнкція або алгебраїчний добуток):

$$\alpha_k = \min(\mu_{A_i}(x_1^*), \mu_{B_j}(x_2^*)) \quad (2.14)$$

2. Активізація висновків / Імплікація (Element IM2). Знайдена вага правила α_k застосовується до функції належності вихідного терму C_k . Цей процес називається нечіткою імплікацією.

3. Акумуляція результатів (Element IM3). Оскільки одночасно можуть спрацювати декілька правил (наприклад, правило №1 радить «ТРОХИ ПІДНЯТИ», а правило №2 – «ПІДНЯТИ СИЛЬНО»), їхні висновки необхідно об'єднати. Елемент IM3 виконує накладання всіх активованих функцій

висновків (операція s-норми, найчастіше *max*-об'єднання) для отримання єдиної результуючої поверхні $\mu_{res}(y)$.

Завершальним етапом обробки інформації є процедура, що виконується блоком «ДЕФАЗИФІКАЦІЯ» (DEFUZZIFICATION). Його функція полягає у трансформації отриманої на попередньому етапі результуючої поверхні $\mu_{res}(y)$ у єдине чітке числове значення y^* . Це критично необхідно, оскільки виконавчі механізми реального світу (наприклад, сервопривод РПН) не розуміють лінгвістичних команд «трохи підняти», а потребують конкретного фізичного сигналу (наприклад, імпульс тривалістю 200 мс або напруга 24 В).

Існує кілька алгоритмів отримання цього значення (метод максимуму, метод середнього максимуму), проте стандартом «де-факто» для систем плавного регулювання є Метод Центру Тяжіння (Center of Gravity – CoG).

Математично він реалізується як обчислення абсциси центру мас фігури, обмеженої функцією належності $\mu_{res}(y)$. Для неперервного випадку формула має вигляд:

$$y^* = \frac{\int_Y y \cdot \mu_{res}(y) dy}{\int_Y \mu_{res}(y) dy} \quad (2.15)$$

Цей метод забезпечує найбільш зважене рішення, оскільки враховує площу всіх активних висновків, а не лише пікові значення.

Розглянемо детальніше роботу блоку «ФАЗИФІКАЦІЯ» на прикладі, проілюстрованому на рис. 2.7.

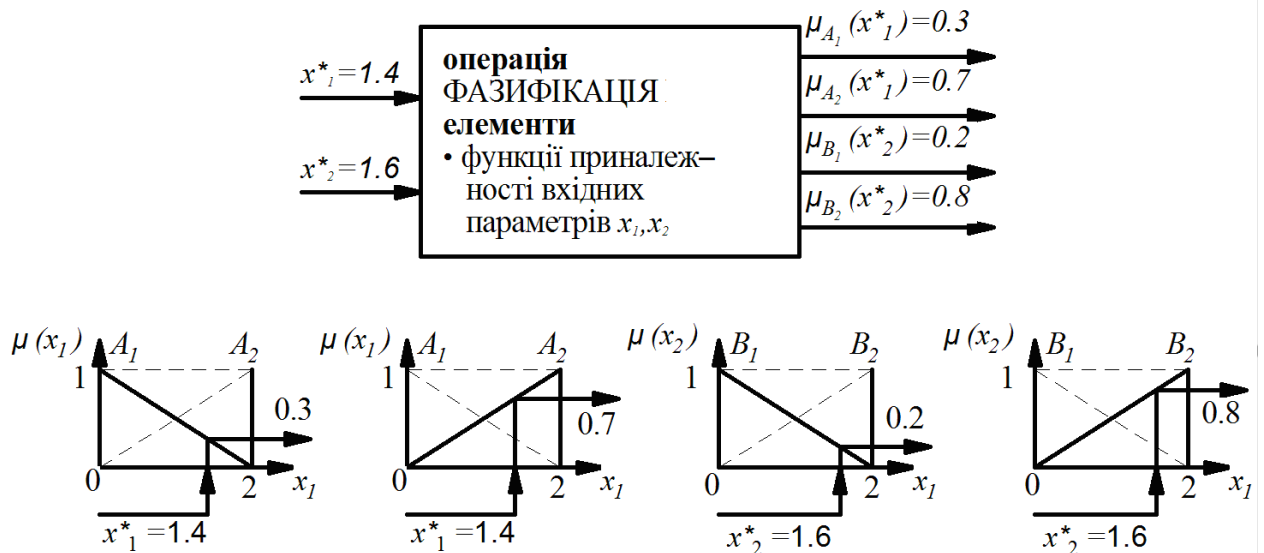


Рис. 2.7. Блок фазифікації та приклад його функціонування

Нехай вхідний параметр (скажімо, відхилення напруги у відсотках) має конкретне вимірне значення $x_1^* = 1,4$.

Система проектує це число на графіки функцій належності.

1. Перетин з множиною A_1 («МАЛЕ»): Значення функції $\mu_{A_1}(1,4) = 0,3$. Це інтерпретується так: система на 30% впевнена, що це відхилення є малим (близьким до еталонного нуля).

2. Перетин з множиною A_2 («ВЕЛИКЕ»): Значення функції $\mu_{A_2}(1,4) = 0,7$. Це означає, що зі ступенем істинності 0,7 дане відхилення класифікується як суттєве.

Таким чином, фізична величина $x_1^* = 1,4$ одночасно належить до двох класів, але з різною вагою. Саме тут проявляється гнучкість методу: замість жорсткого порогу (як у реле: "все що більше 1 – це аварія"), ми отримуємо плавний перехід. Точність роботи всієї моделі критично залежить від параметрів функцій належності: їхньої форми (трикутна, трапецієподібна, гаусова) та ширини основи.

Блок «ВИВІД» (рис. 2.8) інтегрує отримані ступені $\mu_A(x_1)$ та $\mu_B(x_2)$ для формування вихідної поверхні.

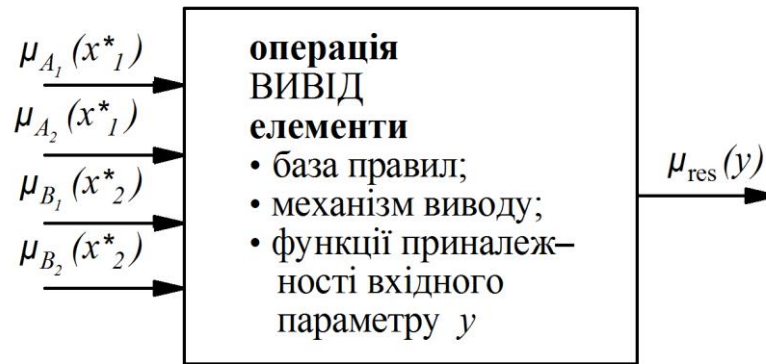


Рис. 2.8. Блок виведення нечіткої моделі

Формалізована послідовність дій алгоритму виглядає наступним чином:

1. Оцінка істинності передумов: Для кожного правила з бази знань обчислюється рівень його виконання (Firing Strength). Якщо умова складна («ЯКЩО А І В»), застосовується операція *min* або добуток.

2. Імплікація (Активация висновків): Знайдений рівень істинності «обрізає» або масштабує функцію належності вихідного терму відповідного правила.

3. Агрегація (Aggregate): Усі усічені функції висновків накладаються одна на одну (зазвичай через оператор *max*), утворюючи фінальну фігуру $\mu_{res}(y)$, яка і передається на дефазифікацію.

Розвиток теорії керування постійно стимулює появу нових архітектур нечітких моделей (наприклад, Такагі-Сугено, нейро-нечіткі мережі ANFIS). Це зумовлено величезним розмаїттям реальних об'єктів, які часто працюють в умовах зашумлених даних.

Ключова перевага нечіткого моделювання над класичними диференціальними рівняннями полягає у толерантності до невизначеності. Для створення адекватного фаззі-регулятора не потрібно знати точні фізичні коефіцієнти об'єкта (індуктивність розсіювання трансформатора, точний опір лінії тощо). Достатньо мати якісну інформацію експертного рівня («при сильному падінні напруги – швидко підняти анцапфу»). Це дозволяє

розробляти ефективні системи керування при значно менших обсягах апріорної інформації та обчислювальних витратах.

Концептуальний фундамент лінгвістичного моделювання, що намагається імітувати людську логіку прийняття рішень, був закладений у фундаментальних працях Лотфі Заде. Проте практична імплементація цієї теорії для керування динамічними технічними об'єктами вперше була здійснена професором Ебрагімом Мамдані (Ebrahim Mamdani) у 1975 році (на прикладі керування паровим двигуном).

Мамдані не лише адаптував теорію нечітких множин до задач автоматизації, але й запропонував методику формалізації евристичних знань людини-оператора. Цей підхід набув широкої популярності в інженерних колах завдяки своїй інтуїтивній зрозумілості та простоті реалізації. На відміну від альтернативних архітектур (зокрема, моделей Такагі-Сугено, де у висновках правил використовуються поліноміальні функції), модель Мамдані оперує виключно лінгвістичними змінними як на вході, так і на виході.

У рамках підходу Мамдані об'єкт керування (наприклад, електрична мережа) розглядається як «чорний ящик». Це означає, що розробнику не обов'язково знати точні диференціальні рівняння, що описують внутрішні електрофізичні процеси. Достатньо мати набір експертних правил, які описують реакцію системи на зовнішні збурення.

Кожне правило в такій моделі формує в багатовимірному просторі станів певну «нечітку точку» (локальну область знань). Сукупність цих точок утворює складну нелінійну поверхню керування, а механізм нечіткого виведення виконує роль інтерполятора, що забезпечує плавний перехід між цими вузловими точками.

Аналіз застосування даного методу в промислових контролерах дозволяє виділити такі ключові переваги:

1. Архітектурна прозорість: логіка роботи контролера є зрозумілою («читабельною») для людини, оскільки база знань формується природною

мовою (наприклад: «ЯКЩО напруга низька, ТО підняти анцапфу»). Це спрощує налагодження та верифікацію системи.

2. Компактність бази знань: Порівняно з класичними табличними методами, нечітка логіка дозволяє охопити складну поведінку об'єкта меншою кількістю правил завдяки властивості перекриття функцій належності.

3. Робастність: Алгоритм стійкий до шумів у вхідних даних. Точність математичного обчислення тут поступається місцем загальній адекватності поведінки системи, що є критично важливим для задач керування в реальному часі.

Класичний алгоритм виведення Мамдані складається з чотирьох послідовних етапів. Розглянемо їх математичний опис:

Етап 1. Фазифікація (Fuzzification). На цьому кроці визначаються ступені істинності для умов (антецедентів) кожного правила. Якщо правило R_k має вигляд «ЯКЩО $x_1 \in A$ І $x_2 \in B \dots$ », то ступінь виконання правила α_k обчислюється як перетин вхідних значень з відповідними функціями належності.

Етап 2. Нечіткий висновок (Implication). Визначається внесок кожного правила у формування вихідного сигналу. У методі Мамдані використовується min-імплікація («відсікання»). Функція належності висновку $\mu_{Ck}(y)$ «обрізається» на рівні α_k :

$$\mu'_{Ck}(y) = \min(\alpha_k, \mu_{Ck}(y)) \quad (2.16)$$

де min – операція знаходження мінімуму, що відповідає логічному «І». Таким чином, ми отримуємо усічену фігуру (трапецію замість трикутника), висота якої відповідає впевненості системи у даному правилі.

Етап 3. Композиція / Агрегація (Aggregation). Всі усічені функції висновків окремих правил $\mu'_{Ck}(y)$ об'єднуються в єдину результуючу нечітку

множину. Для цього використовується max-композиція (операція логічного «АБО»):

$$\mu_{\Sigma}(y) = \max_k(\mu'_{Ck}(y)) = \bigcup_{k=1}^N \mu'_{Ck}(y) \quad (2.17)$$

де N – загальна кількість активних правил. Отримана функція $\mu_{\Sigma}(y)$ описує фінальну область прийняття рішення.

Етап 4. Дефазифікація (Defuzzification). Для отримання чіткого керуючого впливу z_0 (або y^*) найчастіше застосовується метод центру тяжіння (Centroid method). Він полягає у знаходженні абсциси центру мас фігури, обмеженої функцією $\mu_{\Sigma}(y)$:

$$z_0 = \frac{\int_Y y \cdot \mu_{\Sigma}(y) dy}{\int_Y \mu_{\Sigma}(y) dy} \quad (2.18)$$

Цей інтегральний метод забезпечує найбільш плавне регулювання, оскільки враховує площу всіх активних висновків, нівелюючи різкі зміни керуючого сигналу.

2.3 Математичне моделювання та алгоритмізація керування напругою в РЕМ

Для верифікації розробленої методики та перевірки адекватності роботи нечіткого регулятора було створено імітаційну модель ділянки розподільчої мережі. В якості об'єкта дослідження обрано типову радіальну схему електропостачання, однолінійну діаграму якої наведено на рис. 2.9.

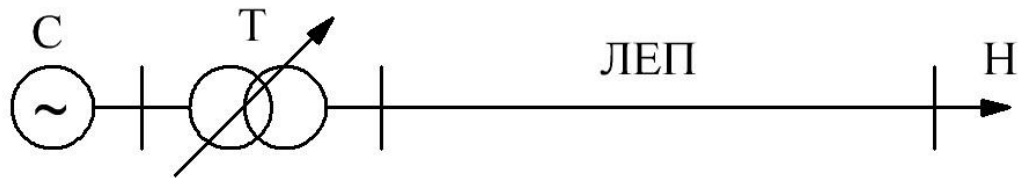


Рис. 2.9. Електрична принципова схема фрагменту мережі

Топологія досліджуваної мережі включає чотири ключові вузли:

1. С – еквівалент зовнішньої енергосистеми.
2. Т – головна понижувальна підстанція з пристроєм РПН.
3. ЛЕП – магістральна лінія електропередачі.
4. Н – вузол комплексного навантаження споживачів.

Для наближення результатів моделювання до реальних умов експлуатації було використано технічні характеристики стандартного електротехнічного обладнання, що широко застосовується в мережах України:

1. Живляча енергосистема (С). Моделюється як джерело напруги нескінченної потужності. Це ідеалізоване представлення означає, що внутрішній опір джерела приймається рівним нулю ($Z_S \approx 0$). Отже, напруга та частота на шинах живлення залишаються незмінними ($U = const, f = 50$ Гц) незалежно від величини та характеру навантаження, що підключається.

2. Силовий трансформатор (Т). Використано модель двообмоткового трансформатора з розщепленою обмоткою низької напруги, тип ТДН-10000/110 (Трифазний, з дугтям та природною циркуляцією мастила, з регулюванням під Навантаженням):

- номінальна потужність: $S_{nom} = 10$ МВА.
- напруга обмотки ВН: $U_{ВН} = 115$ кВ.
- напруга обмотки НН: $U_{НН} = 11$ кВ.
- втрати короткого замикання (втрати в міді): $\Delta P_{кз} = 22$ кВт.

- напруга короткого замикання: $U_k = 10,5\%$.

3. Лінія електропередачі (ЛЕП). Моделюється П-подібною схемою заміщення повітряної лінії, виконаної сталевалюмінієвим проводом марки АС-70:

- довжина траси: $L = 30$ км.

- активний опір: $r_0 = 0,46$ Ом/км (визначає втрати активної потужності та нагрів проводів).

- індуктивний опір: $x_0 = 0,34$ Ом/км (визначає падіння напруги від реактивної складової струму).

4. Навантаження (Н). Представлено у вигляді динамічного споживача з номінальною повною потужністю $S_H = 10$ МВА. Для дослідження роботи регулятора в різних режимах коефіцієнт потужності ($\cos\varphi$) варіювався в діапазоні $0,7 \dots 1,0$. Це дозволяє імітувати як чисто активне навантаження (нагрівачі, освітлення), так і змішане активно-індуктивне (асинхронні двигуни промислових підприємств).

Для реалізації логіки контролера РПН у даній роботі обрано алгоритм нечіткого виведення типу Мамдані (Mamdani).

Цей вибір базується на порівняльному аналізі з альтернативними методами (наприклад, Сугено) і продиктований специфікою об'єкта керування:

1. Евристична природа: Алгоритм Мамдані ідеально підходить для формалізації експертних знань диспетчера (правила виду "ЯКЩО напруга низька, ТО підняти анцапфу"), що робить систему прозорою та зрозумілою.

2. Наочність: Всі етапи (від фазифікації до дефазифікації) мають чітку графічну інтерпретацію, що спрощує налагодження моделі.

3. Простота імплементації: Відсутність складних поліноміальних залежностей у висновках правил значно спрощує програмну реалізацію контролера на базі промислових мікропроцесорів.

При проектуванні лінгвістичних змінних для розроблюваної системи автоматичного керування (САК) було застосовано чотири базові типи функцій належності (Membership Functions – MF). Такий набір дозволяє найбільш гнучко описати характер зміни технологічних параметрів:

1. Трикутні функції (Triangular MF): Найпоширеніший тип для опису значень, що групуються навколо певного центру. Задаються трійкою чисел (a, b, c) , де b – вершина (мода), а a і c – межі основи:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a, \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b, \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c, \\ 0, & c < x, \end{cases}$$

2. Трапецієподібні функції (Trapezoidal MF): Використовуються для опису інтервалів, де параметр має сталі значення "істинності" (наприклад, зона "Норма"). Визначаються четвіркою параметрів (a, b_1, b_2, c) , де інтервал $[b_1, b_2]$ – це верхня основа трапеції (ядро нечіткої множини):

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a, \\ \frac{x-a}{b_1-a}, & a < x < b_1, \\ \frac{c-x}{c-b_2}, & b_2 < x < c, \\ 0, & c < x, \end{cases}$$

3. Z-подібні функції (Z-shaped MF): Відкриті ліворуч сплайн-функції, що ідеально підходять для опису граничних термів типу "Дуже малий" або "Низький". Задаються парою параметрів (b, c) , що визначають зону спадання функції від 1 до 0:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x < b, \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c, \\ 0, & c < x. \end{cases}$$

4. S-подібні функції (S-shaped MF): Відкриті праворуч функції, дзеркальні до Z-подібних. Використовуються для термів типу "Дуже великий" або "Високий". Задаються параметрами (a, b) , що визначають ділянку зростання:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a, \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b, \\ 1, & b < x. \end{cases}$$

Структурно синтезований нечіткий регулятор розглядається як MISO-система (Multiple Input, Single/Multiple Output), функціонування якої базується на обробці вектора вхідних змінних X . До складу цього вектора входять три ключові діагностичні параметри, що визначають поточний режим мережі:

1. Розрахункова напруга у споживача (U_{load}): це значення, отримане шляхом математичного моделювання падіння напруги в лінії (або прямих вимірів Smart Meter), яке є головним об'єктом стабілізації.

2. Ресурс перемикачів (N_{sw}): поточна кількість комутацій РПН, накопичена за добу. Цей параметр вводиться для реалізації функції збереження механічного ресурсу контактів.

3. Тенденція зміни напруги ($Sign(dU/dt)$): індикатор напрямку дрейфу напруги (зростання/спадання), що дозволяє алгоритму прогнозувати розвиток перехідного процесу.

На основі аналізу цих даних база правил формує вектор керування Y , що містить дві компоненти:

- Команда комутації ($\$CMD\$$): дискретний сигнал, що вказує необхідну дію приводу («Вгору», «Вниз» або «Без змін»).
- Адаптивна затримка (τ_{delay}): розрахунковий час, який необхідно вичекати перед виконанням команди, щоб відфільтрувати короткочасні збурення.

Важливою особливістю реалізації є те, що зовнішнє середовище (датчики телеметрії, SCADA-система) оперує виключно чіткими (детермінованими) величинами. Фізичні прилади видають конкретні числа (наприклад, 224В або 15 перемикачів).

Тому архітектура контролера передбачає обов'язкові етапи перетворення сигналів:

1. Фазифікація: вхідні чіткі числа трансформуються у нечіткі лінгвістичні змінні (ступені належності μ) для обробки машиною логічного виведення.

2. Дефазифікація: після спрацювання правил отриманий нечіткий висновок (у вигляді функції належності) конвертується назад у чіткий керуючий сигнал. Це необхідно, оскільки виконавчий механізм РПН (електропривод) здатен сприймати лише однозначні фізичні команди.

Схема нечіткого блоку показана на рис. 2.10.

Для реалізації алгоритму фазифікації було розроблено систему лінгвістичних змінних, що описують стан об'єкта керування. Всі числові значення напруги приведені до відносних одиниць (в.о.), де за базис прийнято номінальну напругу мережі ($U_{nom} = 1.0$).

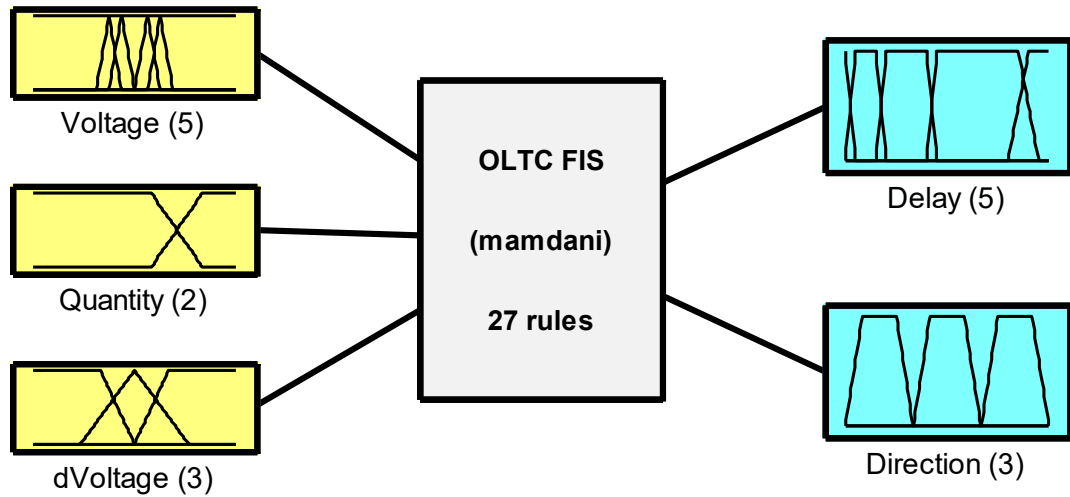


Рис. 2.10. Схема нечіткого блоку

Вхідний вектор змінних:

1. Змінна «Напруга» (Voltage). Характеризує діюче значення напруги на шинах навантаження (рис. 2.11).

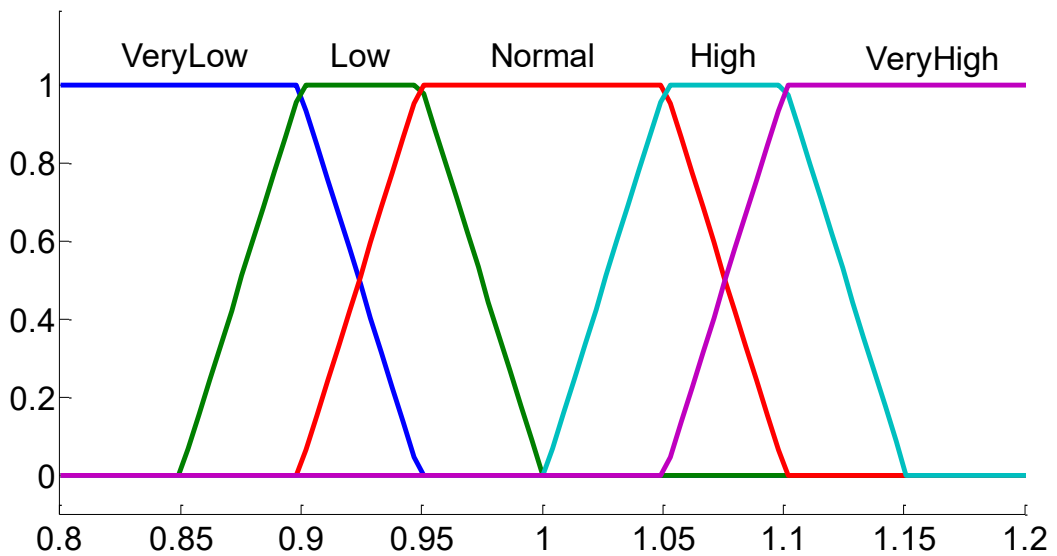


Рис. 2.11. Значення нечіткої змінної «Напруга»

Для забезпечення високої чутливості в зоні нормального режиму та адекватної реакції в аварійних режимах, універсум розбито на п'ять термів з перекриттям:

- VeryLow (Дуже низька): Описує критичне зниження напруги. Реалізовано трапецієподібною функцією з вектором параметрів: $\mu_{VL} = [0.6; 0.6; 0.899; 0.949]$;
- Low (Низька): Відповідає режиму, що вимагає корекції. Параметри функції: $\mu_L = [0.85; 0.9; 0.95; 1.0]$;
- Normal (Нормальна): Цільовий діапазон регулювання (зона нечутливості). Параметри: $\mu_N = [0.899; 0.949; 1.051; 1.101]$
- High (Висока): Режим перенапруги. Параметри: $\mu_H = [1.001; 1.051; 1.101; 1.151]$
- VeryHigh (Дуже висока): Критична перенапруга. Параметри: $\mu_N = [1.051; 1.101; 1.2; 1.2]$

2. Змінна «Кількість» (Quantity). Відображає накопичений знос обладнання (кількість комутацій N_{sw} за добу) (рис. 2.12).

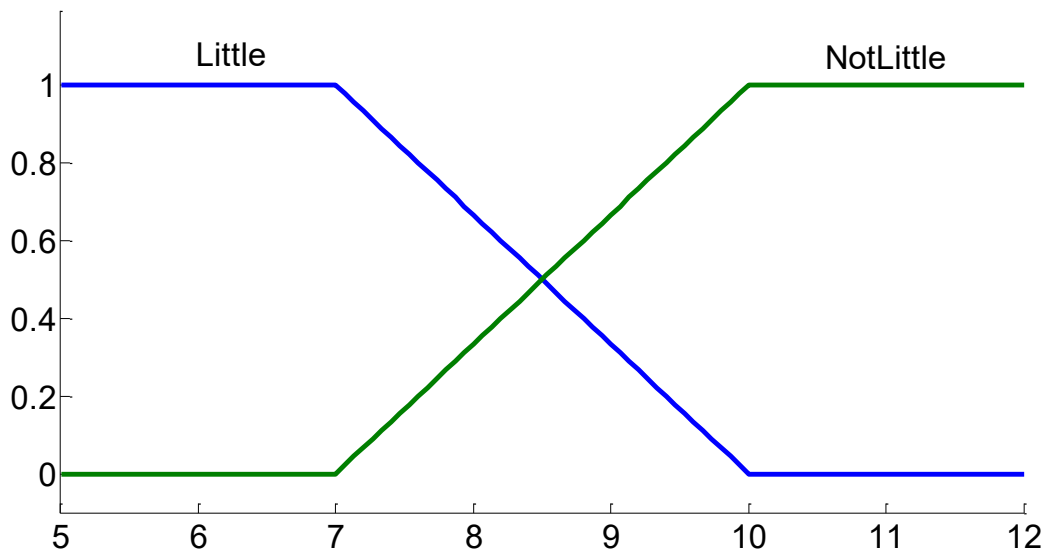


Рис. 2.12. Значення нечіткої змінної «Кількість»

Використовуються граничні функції:

- Little (Мало): Z-подібна функція (спадаюча), що дозволяє активне регулювання. Параметри: $[0; 0; 7; 10]$.

- Not Little (Не мало): S-подібна функція (зростаюча), що активує режим економії ресурсу при наближенні до ліміту. Параметри:[7;10;12;12].

3. Змінна «Динаміка» (dVoltage). Описує першу похідну напруги dU / dt , визначаючи тренд процесу (рис. 2.13):

4.

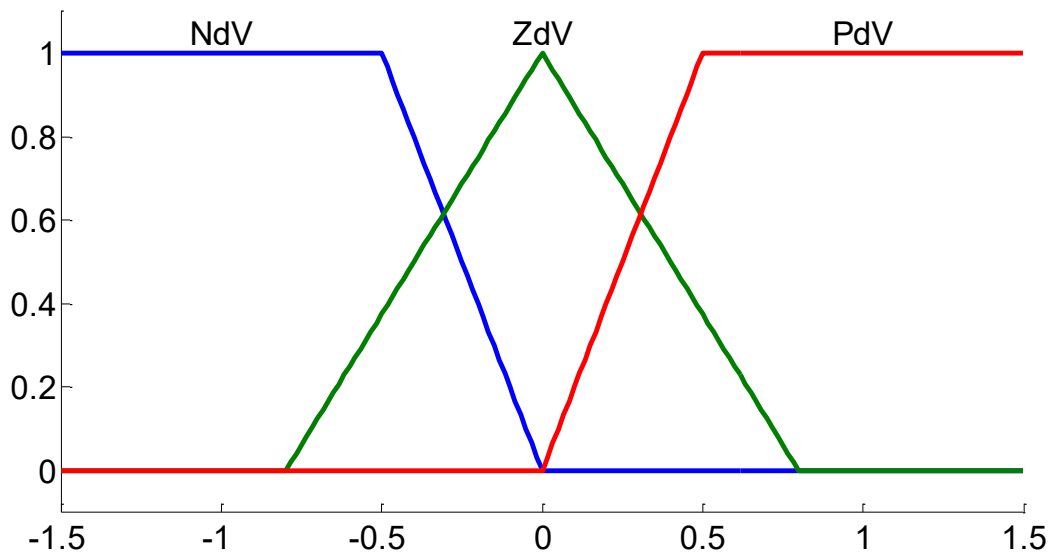


Рис. 2.13. Значення нечіткої змінної «Динаміка»

- NdV (Негативна): Напруга падає. Z-подібна функція:[-1.5;-1.5;-0.5;0].
- ZdV (Нульова): Процес стабільний. Трикутна функція (симетрична):[-0.8;0;0.8].
- PdV (Позитивна): Напруга зростає. S-подібна функція:[0;0.5;1.5;1.5].

Вихідний вектор керування описаний нижче.

1. Змінна «Напрямок» (Direction). Формує команду для приводу РПН. Після дефазифікації методом центру тяжіння, знак отриманого числа визначає напрямок обертання приводу (рис. 2.14):

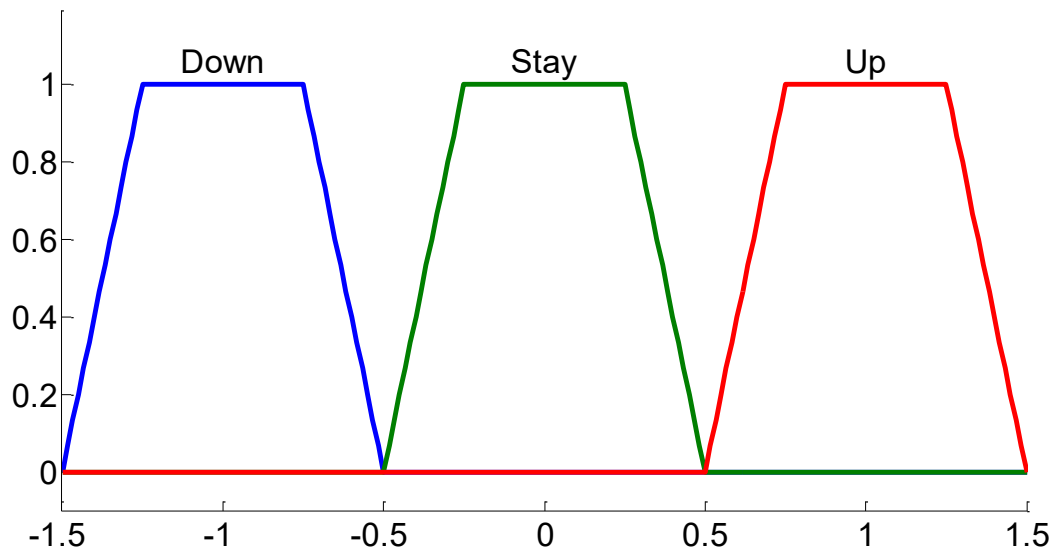


Рис. 2.14. Значення нечіткої змінної «Напрямок»

- Down (Вниз): Команда на зниження напруги. Трапеція в негативній області: $[-1.5; -1.25; -0.75; -0.5]$
- Stay (Стоп): Утримання положення. Симетрична трапеція навколо нуля: $[-0.5; -0.25; 0.25; 0.5]$.
- Up (Вгору): Команда на підвищення. Трапеція в позитивній області: $[0.5; 0.75; 1.25; 1.5]$.

2. Змінна «Затримка» (Delay)

Визначає адаптивну витримку часу τ у нормованому діапазоні від 0 до 1 (де 1 – максимальна затримка, наприклад, 180 с) (рис. 2.15):

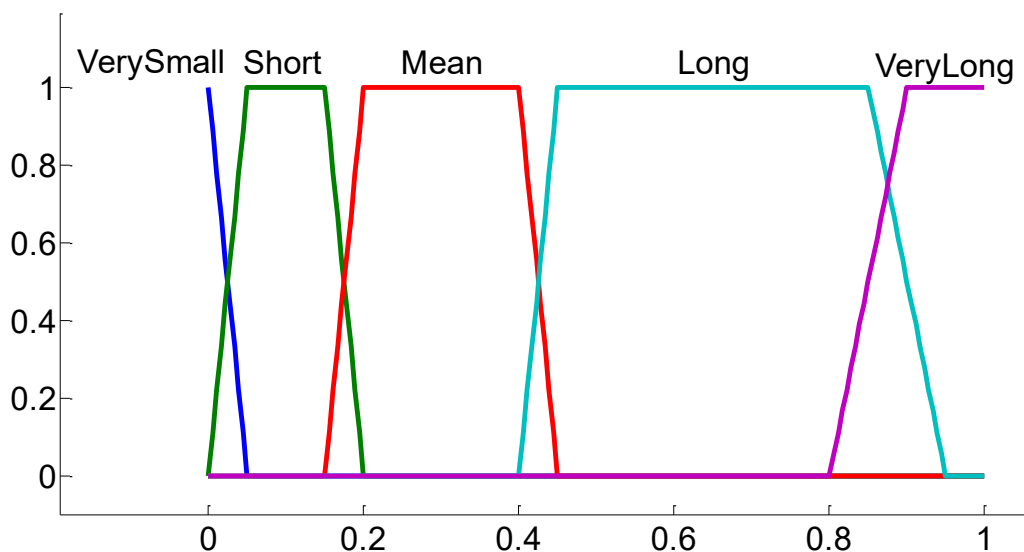


Рис. 2.15. Значення нечіткої змінної «Затримка»

- VerySmall (Мінімальна): Для миттєвої реакції. Z-функція: [0;0;0;0.05].
- Short (Коротка): [0;0.05;0.15;0.2].
- Mean (Середня): [0.15;0.2;0.4;0.45].
- Long (Довга): [0.4;0.45;0.85;0.95].
- VeryLong (Максимальна): Для блокування частих перемикачів. S-функція: [0.8;0.9;1.0;1.0].

На основі сформованого набору лінгвістичних змінних було розроблено матрицю правил (Rule Base), яка є інтелектуальним ядром контролера. Загальна кількість продукційних правил склала 27 одиниць. Ця кількість є оптимізованою підмножиною від повного комбінаторного перебору станів ($5_{\text{напруга}} \times 2_{\text{кількість}} \times 3_{\text{динаміка}} = 30$ варіантів), що дозволило охопити всі критичні режими роботи без надмірного ускладнення обчислень.

Логіка формування правил базувалася на наступних евристичних принципах та стратегіях керування:

1. Адаптація часу реакції (Proportional Logic). Перший рівень логіки встановлює обернену залежність між величиною помилки та часом затримки (змінна «Delay»).

- Аварійний режим: якщо відхилення напруги є критичним (терми «Дуже низька» або «Дуже висока»), пріоритетом стає швидкість реакції. У цьому випадку затримка встановлюється мінімальною («Коротка» або «Дуже мала»), щоб якнайшвидше повернути параметр у допустимі межі та запобігти пошкодженню обладнання споживачів.
- Стабільний режим: якщо напруга знаходиться поблизу номіналу (терм «Нормальна»), контролер переходить у режим "фільтрації завад". Затримка встановлюється максимальною («Довга» або «Дуже довга»), щоб уникнути реакції на короткочасні флуктуації.

2. Прогностична функція (Derivative Control). Другий рівень логіки враховує тренд процесу (змінна «Динаміка» / похідна dU / dt). Це дозволяє контролеру відрізнити випадкові збурення від стійких тенденцій:

- Дивергентний процес (погіршення): якщо напруга є «Низькою» і продовжує падати (похідна $dU / dt < 0$), це свідчить про поглиблення проблеми. У такому разі час затримки примусово зменшується для прискорення втручання. Аналогічно діє логіка при «Високій» напрузі, що продовжує зростати.
- Конвергентний процес (самовідновлення): якщо напруга «Низька», але похідна позитивна (напруга вже почала зростати сама, наприклад, після пуску двигуна), контролер "гальмує" свою дію (збільшує затримку). Це запобігає зайвому перемиканню, оскільки система, ймовірно, відновиться самостійно.

3. Формування вектору керування (Direction Logic)/ Визначення знаку керуючого впливу реалізує класичний закон негативного зворотного зв'язку:

- при фіксації просадки напруги (стани «Низька», «Дуже низька») генерується команда «Вниз» (що у даній конфігурації приводу відповідає дії на підвищення коефіцієнта/напруги).
- при фіксації перенапруги (стани «Висока», «Дуже висока») генерується команда «Вгору» (дія на зниження).
- у зоні нечутливості («Нормальна») активується команда «Стоп», що блокує роботу електроприводу.

4. Ресурсне обмеження (Life Cycle Management). Четвертий рівень логіки відповідає за збереження механічного ресурсу РПН. Контролер безперервно моніторить лічильник комутацій за поточну добу (змінна «Кількість»):

- поки ліміт не вичерпано (стан «Мало»), система працює у штатному режимі з оптимальними затримками.
- при наближенні до добового ліміту (стан «Не мало»), вмикається алгоритм "економії ресурсу": базовий час затримки для всіх

режимів суттєво збільшується. Це робить регулятор більш інертним ("м'лявим"), дозволяючи реагувати лише на найглибші та найтриваліші відхилення напруги.

Графічна інтерпретація роботи синтезованого алгоритму Мамдані (поверхня керування) наведена на рис. 2.16.

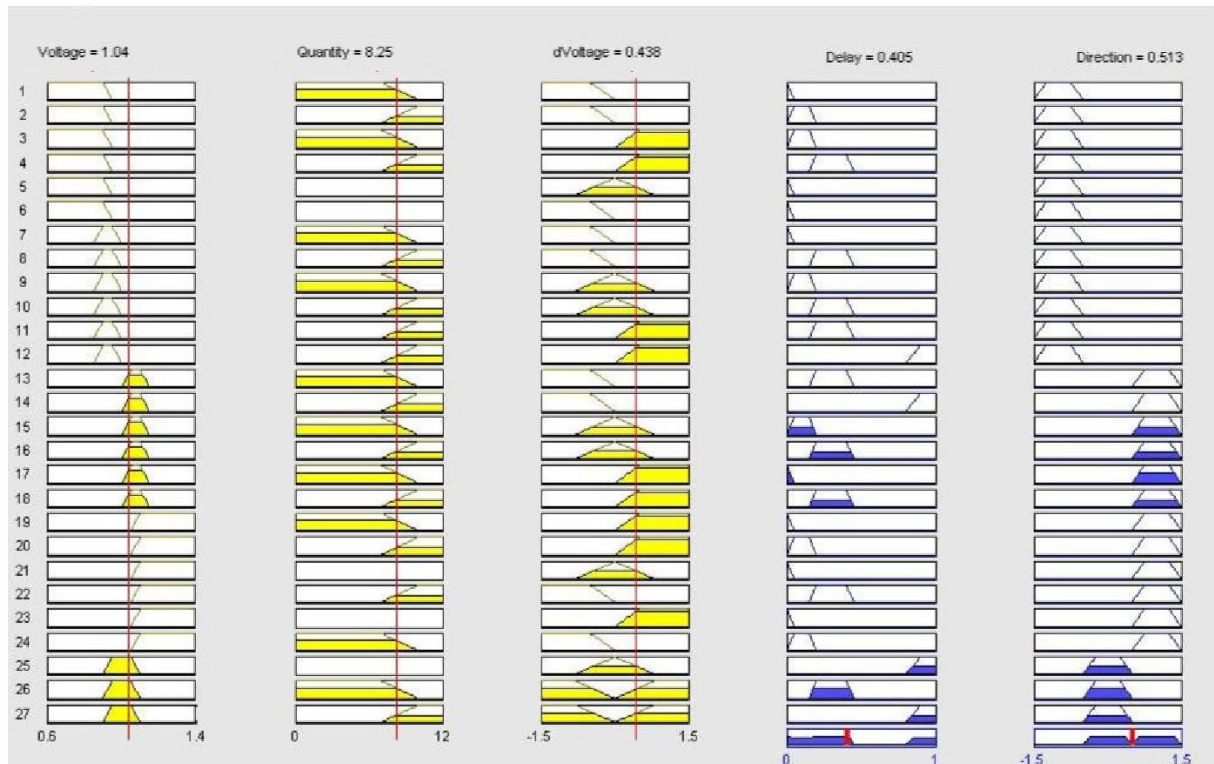


Рис. 2.16. Демонстрація роботи алгоритму Мамдані для нечіткого виводу

Оскільки аналітичний розрахунок поведінки такої складної нелінійної системи є вкрай трудомістким, єдиним надійним способом перевірки ефективності розробленої САК є проведення комп'ютерного імітаційного моделювання. Цей етап дозволить без ризику для реального обладнання дослідити перехідні процеси та кількісно оцінити переваги нечіткого регулятора порівняно з класичними аналогами.

Висновки до розділу

1. На основі системного аналізу проблематики регулювання напруги в сучасних розподільчих мережах (РЕМ) виконано чітку постановку задачі керування. Визначено, що класичні детерміновані методи часто виявляються неефективними в умовах стохастичної природи навантажень та неповноти інформації про стан об'єкта. Сформульовано вимоги до перспективної системи керування, яка повинна забезпечувати адаптивність до динамічних змін режимів та мінімізувати знос комутаційного обладнання.

2. Детально опрацьовано теоретичні основи теорії нечітких множин (Fuzzy Logic) як ключового інструментарію для вирішення поставленої задачі. Проаналізовано правила нечіткої арифметики, принципи фазифікації вхідних даних та методи дефазифікації вихідних сигналів. Доведено, що застосування лінгвістичних змінних дозволяє ефективно формалізувати експертні знання диспетчера та побудувати гнучку модель керування об'єктом типу «чорний ящик» без необхідності складання його точних диференціальних рівнянь.

3. Шляхом порівняльного аналізу різних архітектур нечіткого виведення (Такагі-Сугено, Цукамото, Мамдані) обґрунтовано доцільність використання алгоритму Мамдані (Mamdani). Вибір саме цього методу продиктований низкою факторів: він забезпечує високу інтерпретабельність бази правил (зрозумілість логіки «ЯКЩО-ТО» для персоналу); дозволяє реалізувати нелінійну залежність часу затримки від величини відхилення напруги; гарантує утримання показників якості електроенергії в межах, регламентованих стандартом ДСТУ EN 50160:2023.

РОЗДІЛ 3

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ НАПРУГОЮ

3.1 Архітектура та реалізація імітаційної моделі в середовищі MATLAB/Simulink

Ключовим етапом верифікації теоретичних положень роботи є проведення чисельного експерименту. З метою кількісної оцінки ефективності розробленої системи автоматичного керування (САК) та порівняння її з класичними аналогами, було створено комплексний віртуальний стенд. В якості інструментального середовища обрано програмний комплекс MATLAB з розширенням Simulink, який є загально визнаним стандартом для моделювання електромеханічних перехідних процесів в енергетиці.

В основу алгоритмічної частини моделі покладено синтезований у попередньому розділі контролер Мамдані, адаптований для керування електроприводом РПН в режимі реального часу.

На рис. 3.1 представлено топологію головної схеми моделювання.

Вона відтворює ділянку розподільчої мережі та складається з трьох функціональних макроблоків:

1. Блок Uvn_source: Імітує поведінку зовнішньої енергосистеми (центру живлення). Реалізований як ідеальне джерело трифазної напруги з номіналом 115 кВ, що дозволяє задавати як стабільний режим, так і різні сценарії збурень (просадки, сплески напруги).

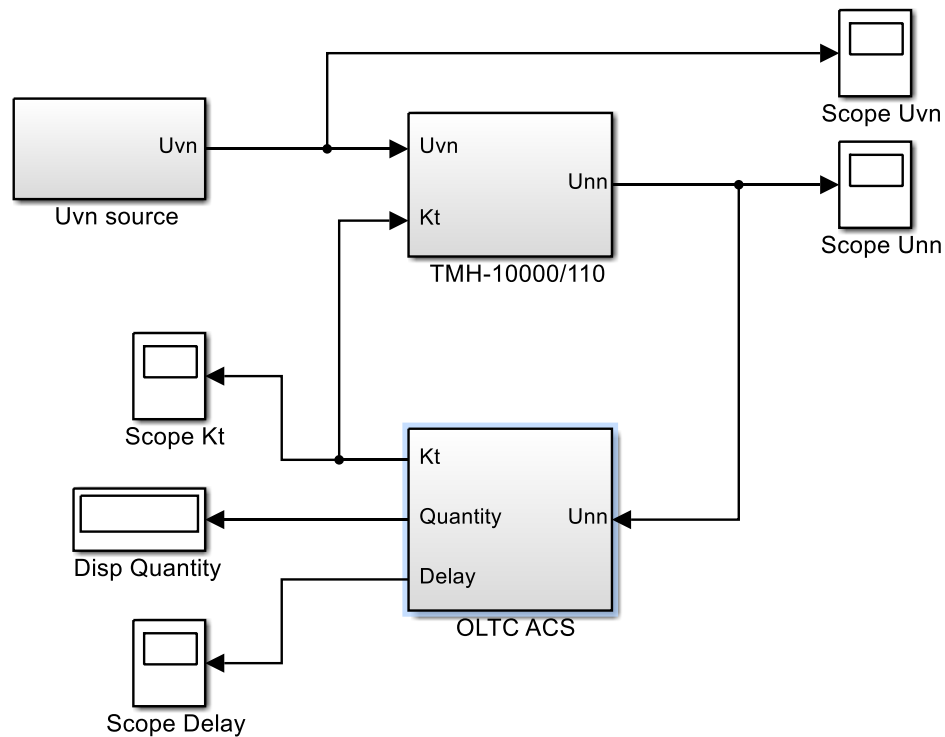


Рис. 3.1. Загальна модель системи автоматичного керування режимом напруги РЕМ

2. Блок ТМН-10000/110: Динамічна модель силового трансформатора з розщепленою обмоткою. Цей елемент базується на блоці, параметри якого (активний опір обмоток, індуктивність розсіювання, струм холостого ходу) налаштовані відповідно до паспортних даних реального трансформатора типу ТМН. Важливою особливістю є наявність керованого входу для зміни коефіцієнта трансформації «на льоту».

3. Блок OLTC ACS: підсистема, що реалізує логіку автоматичного регулювання напруги. Вона отримує вимірювальні сигнали зі вторинної сторони трансформатора та генерує керуючі впливи.

Детальна архітектура керуючого блоку OLTC ACS наведена на рис. 3.2.

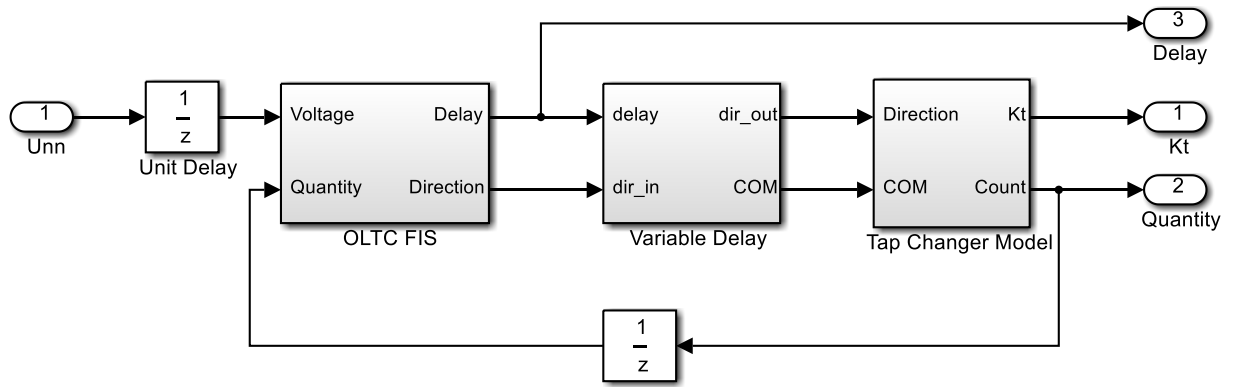


Рис. 3.2. Схема моделі блоку «OLTC ACS»

Вона має ієрархічну структуру і включає три спеціалізовані підсистеми, що взаємодіють між собою:

1. Підсистема OLTC FIS (Fuzzy Inference System). Це безпосередньо модель нечіткого контролера (рис. 3.3).

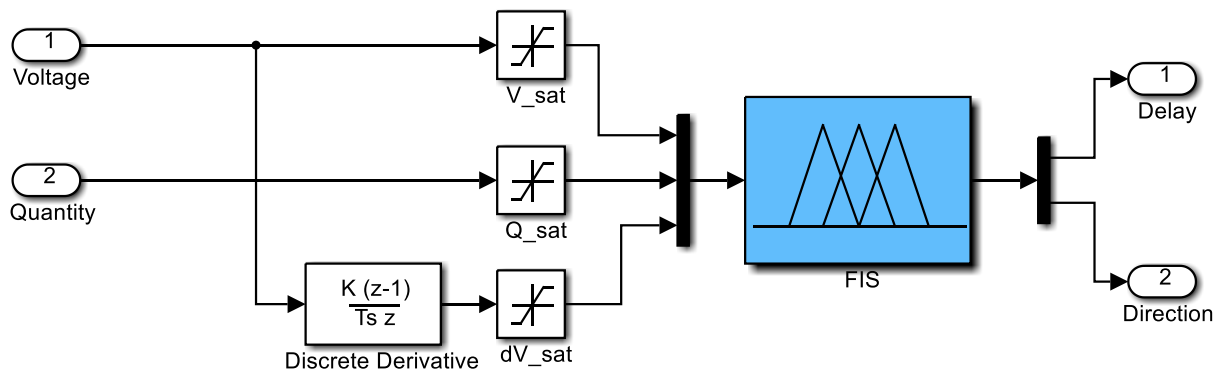


Рис. 3.3. Схема моделі блоку «OLTC FIS»

Вона містить блоки фазифікації вхідних сигналів (помилка напруги, похідна, лічильник перемикачів), машину логічного виведення з базою правил та блок дефазифікації. Її виходом є два сигнали: вектор напрямку комутації (Up/Down/Stop) та розраховане значення часової затримки.

2. Підсистема Tap Changer Model. Логічний блок, що емулює роботу фізичного механізму перемикачів (рис. 3.4).

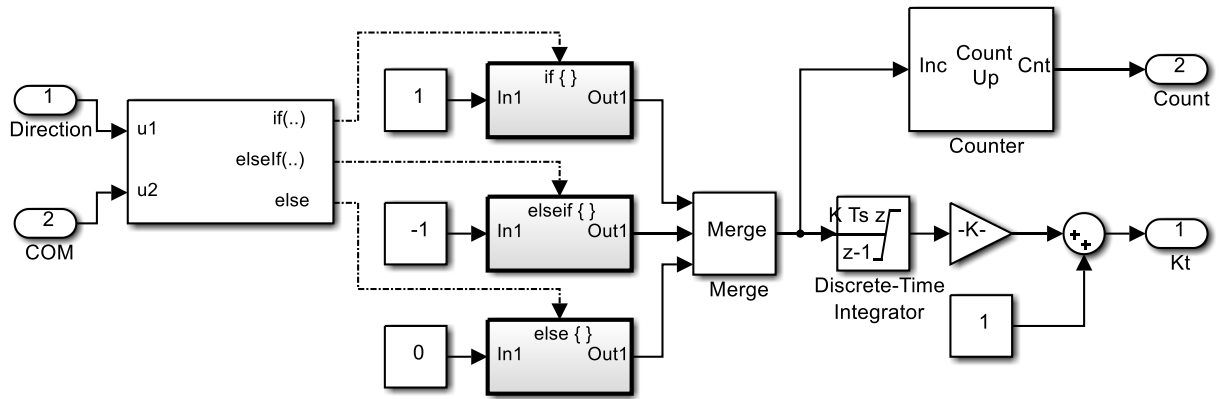


Рис. 3.4. Схема моделі блоку «Tap Changer Model»

Він враховує дискретність процесу (перехід по сходинках $\pm 1,78\%$), механічні обмеження (крайні положення анцапф, наприклад ± 9 ступенів) та інерційність приводу.

3. Підсистема Variable Delay. Блок реалізації адаптивної часової витримки (рис. 3.5).

На відміну від стандартних реле часу, цей модуль здатний динамічно змінювати час очікування залежно від команди, що надходить з нечіткого контролера. Це дозволяє системі миттєво реагувати на аварійні відхилення і "фільтрувати" дрібні коливання в нормальному режимі.

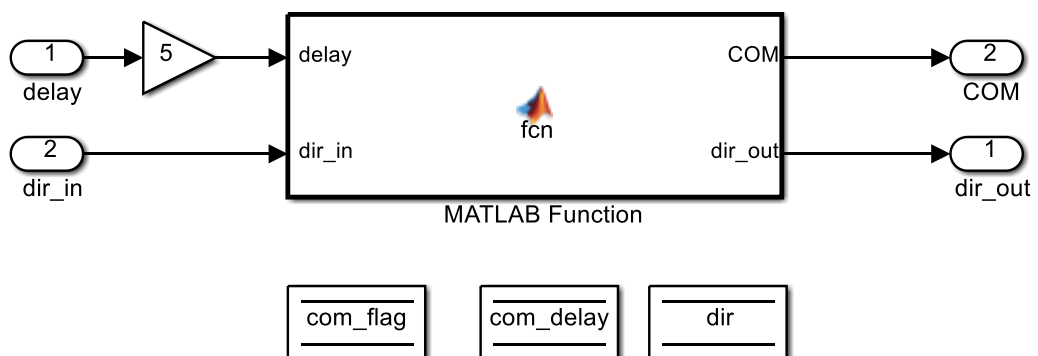


Рис. 3.5. Схема моделі блоку «Variable Delay»

3.2 Проведення обчислювального експерименту та порівняльний аналіз алгоритмів

Для отримання об'єктивної кількісної оцінки переваг розробленої нечіткої системи, дослідження проводилося методом порівняльного аналізу. У якості еталонної (базової) моделі було обрано класичну систему автоматичного регулювання пропорційного типу. Цей вибір зумовлений тим, що саме такі регулятори (наприклад, на базі блоків АРТ-1Н або їх цифрових аналогів) наразі є стандартом де-факто в розподільчих мережах України.

Еталонна модель налаштована на реалізацію закону зустрічного регулювання, який передбачає підвищення напруги на шинах підстанції пропорційно до зростання струму навантаження. Однак, на відміну від нечіткого контролера, базова модель має фіксовані параметри:

- незмінну зону нечутливості (deadband);
- постійну витримку часу на перемикання, незалежну від динаміки процесу.

Обидві системи (нечітка та класична) тестувалися в ідентичних умовах: на них подавалися однакові сценарії зміни навантаження та збурення з боку живлячої мережі.

Детальна візуалізація динаміки перехідних процесів представлена на серії осцилограм (рис. 3.6 – 3.13). Графіки відображають поведінку напруги у споживача, реакцію виконавчого механізму РПН та траєкторію зміни коефіцієнта трансформації у часі. Узагальнені числові показники ефективності, такі як сумарна кількість комутацій, інтегральна квадратична помилка регулювання та відхилення від номіналу, зведені у підсумкову таблицю 3.1.

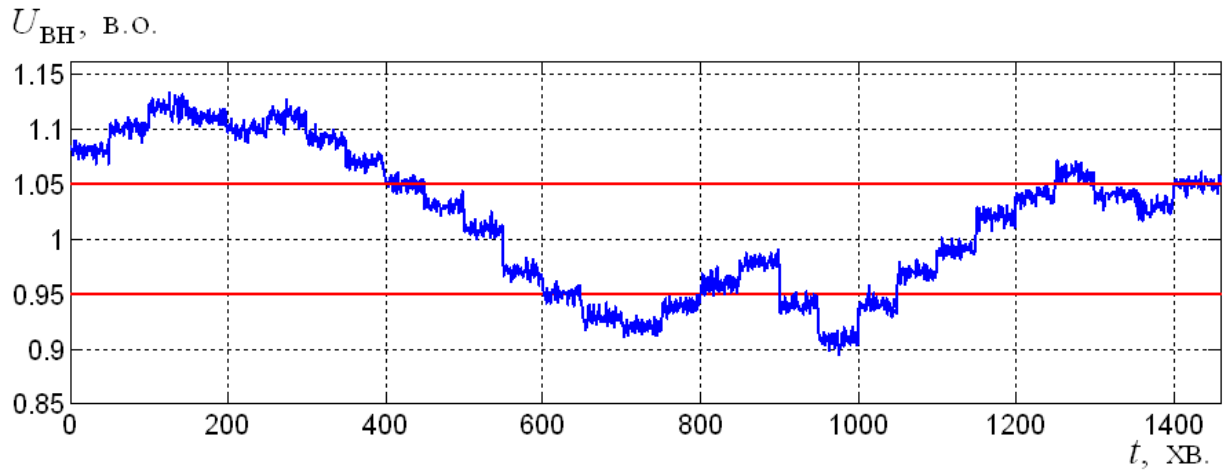


Рис. 3.6. Часова залежність діючого значення напруги (в.о.) на стороні ВН силового трансформатора

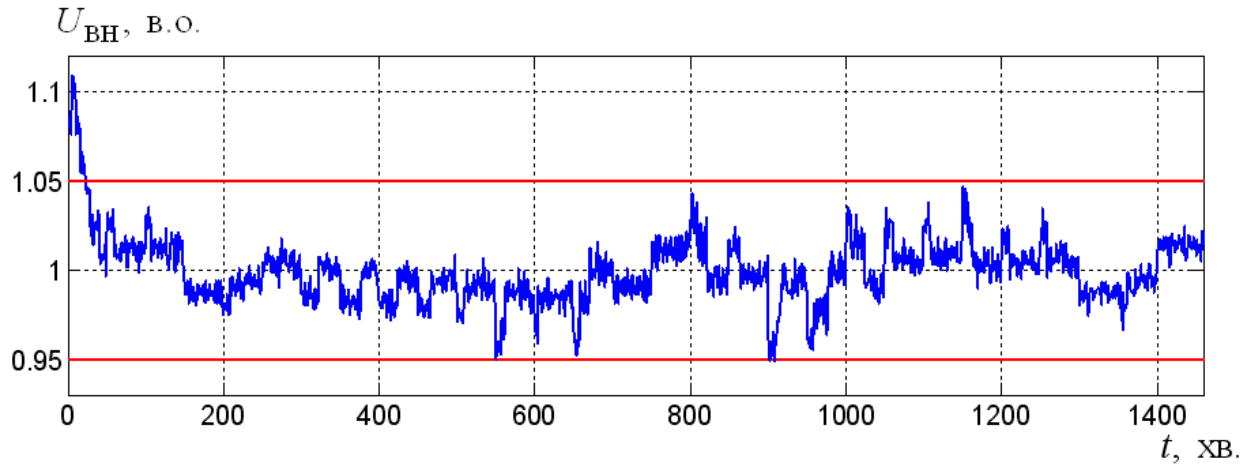


Рис. 3.7. Часова залежність діючого значення напруги (в.о.) на стороні НН силового трансформатора для базової САК

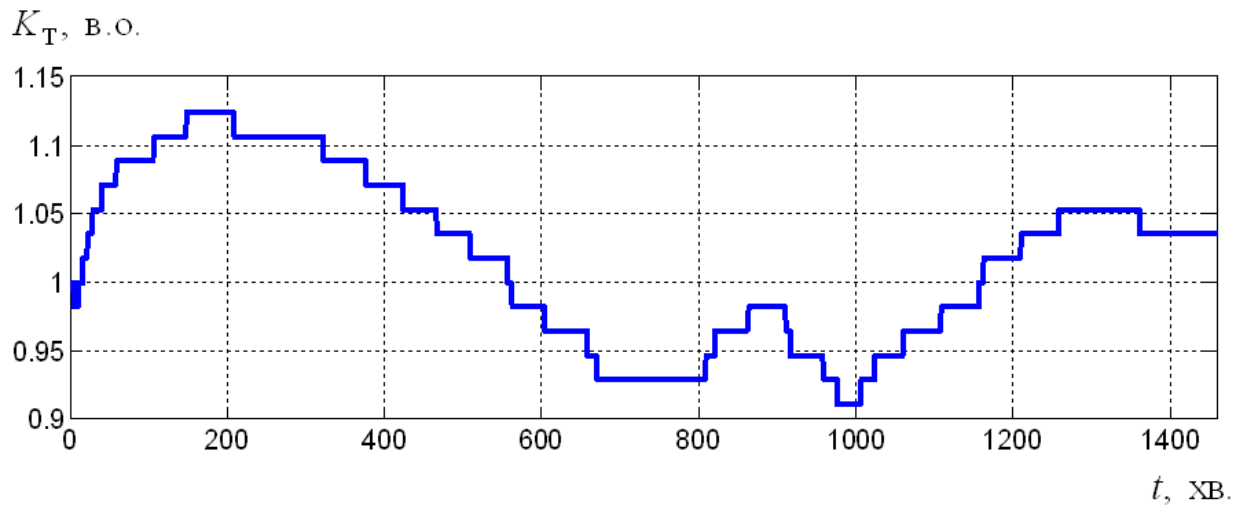


Рис. 3.8. Часова залежність зміни коефіцієнту трансформації трансформатора для базової САК

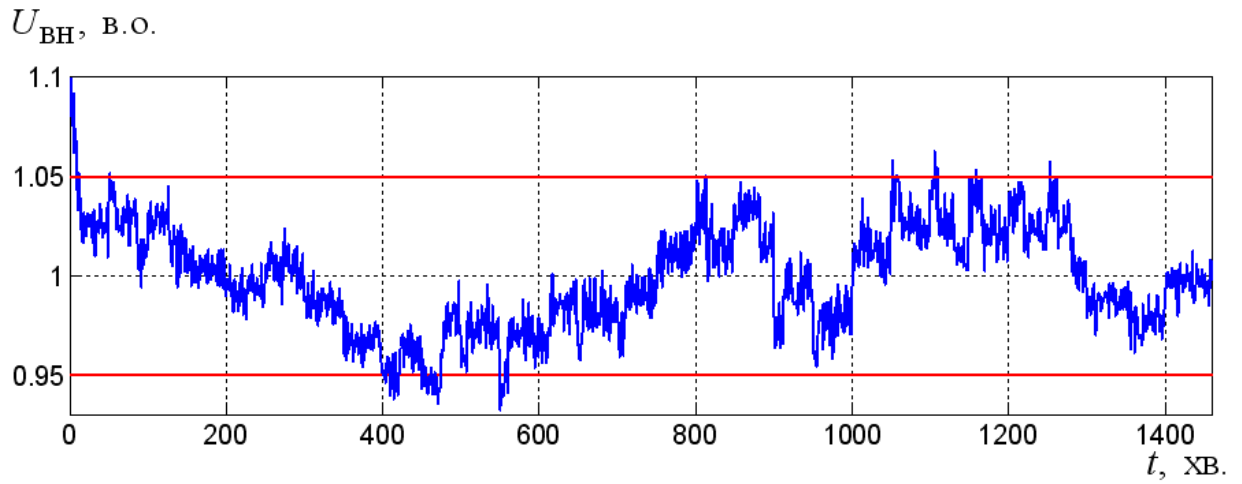


Рис. 3.9. Часова залежність діючого значення напруги (в.о.) на стороні НН силового трансформатора для базової САК

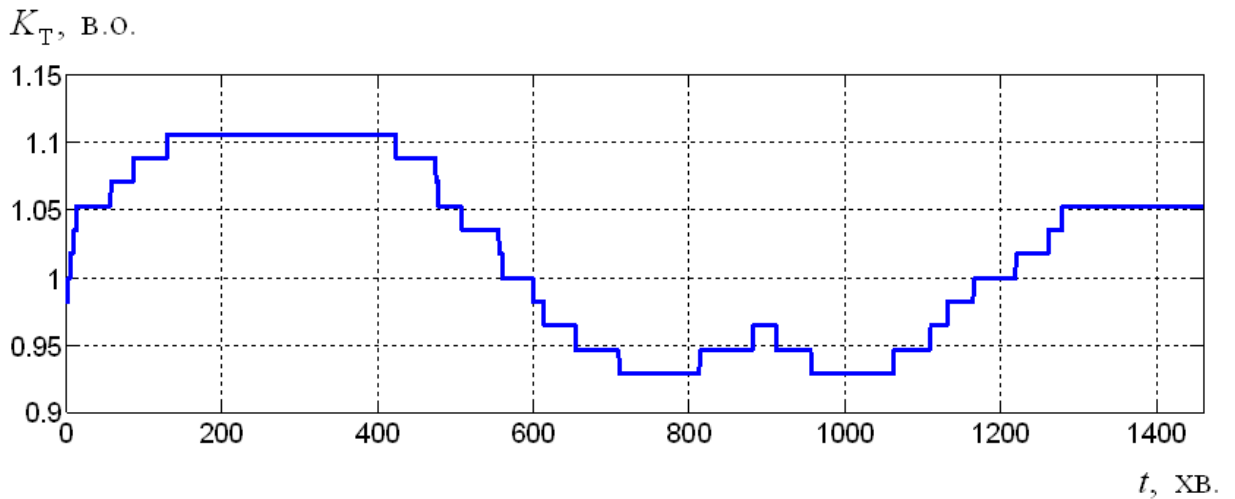


Рис. 3.10. Часова залежність зміни коефіцієнту трансформації трансформатора для базової САК

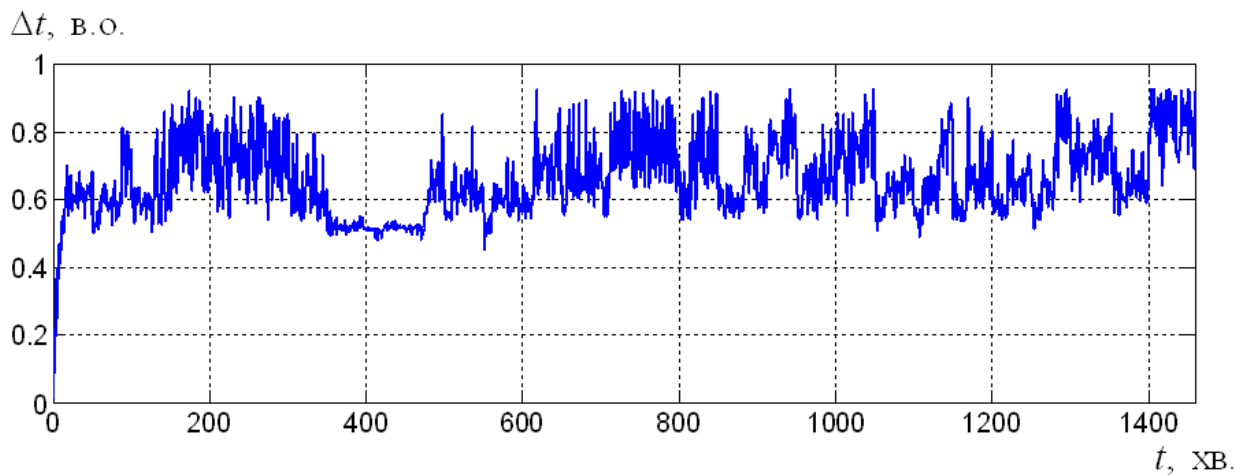


Рис. 3.11. Часова залежність зміни затримки часу спрацювання РПН для розробленої САК

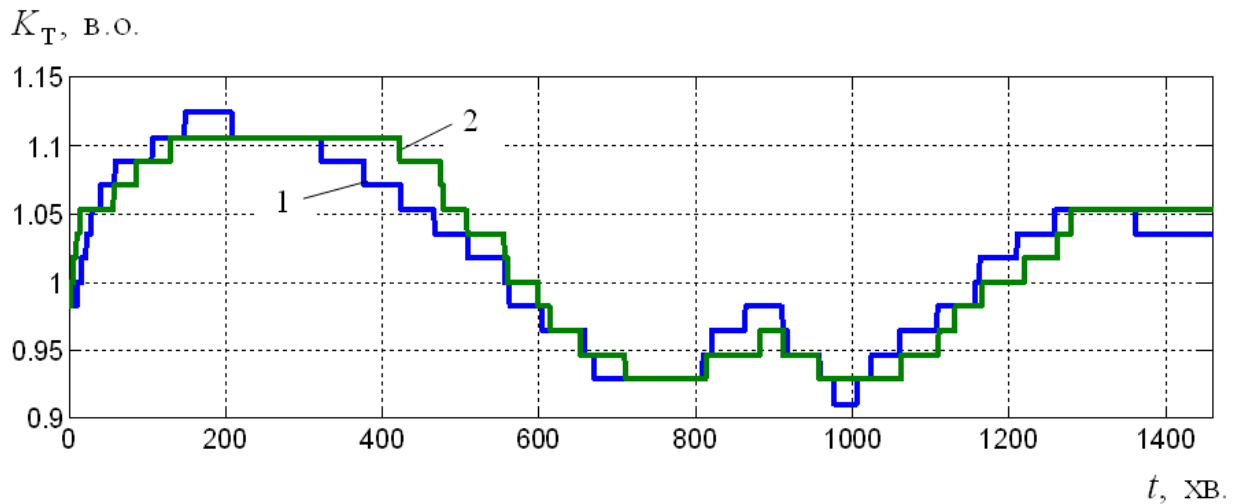


Рис. 3.12. Часові залежності зміни коефіцієнтів трансформації для базової (1) та розробленої (2) САК

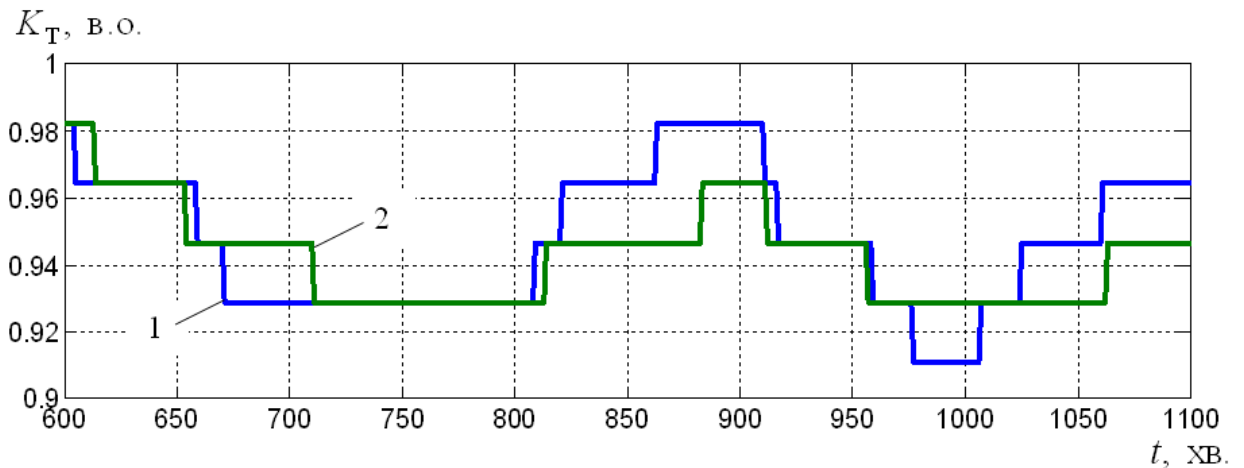


Рис. 3.12. Часові залежності зміни коефіцієнтів трансформації для базової (1) та розробленої (2) САК (збільшено)

Для отримання об'єктивної картини ефективності роботи досліджуваних алгоритмів було проведено збір та обробку статистичних даних за весь період моделювання (добовий цикл). Узагальнені показники якості регулювання та інтенсивності роботи обладнання зведено в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1. Статистична обробка результатів комп'ютерного моделювання

№ з/п	Варіант моделі САК	Інтегральна ймовірність перебування напруги в нормі (P), в.о.	Кількість виходів за межі нормально допустимих значень ($N_{н.д.}$)	Кількість комутацій приводу РПН ($N_{РПН}$)
1.	Вихідні дані (без регулювання, сторона ВН)	0,43	833	-
2.	Базова САК	0,98	25	36
3.	Розроблена САК (нечіткий контролер)	0,96	54	29

Детальне вивчення числових значень, наведених у таблиці, дозволяє зробити наступні висновки щодо роботи системи в різних режимах:

Аналіз першого рядка таблиці ("Вихідні дані") демонструє критичну необхідність регулювання. Інтегральна ймовірність відповідності нормі становить лише 0,43. Це означає, що без використання РПН напруга у споживача знаходилася б у межах норми менше половини часу доби. Величезна кількість відхилень ($N_{н.д.} = 833$) свідчить про високу волатильність напруги в живлячій мережі 110 кВ, що робить роботу чутливого обладнання неможливою без засобів стабілізації.

Обидві системи керування продемонстрували високу ефективність.

- базова модель забезпечила ймовірність утримання норми на рівні 0,98, що є дуже високим показником.
- нечіткий контролер показав результат 0,96.

Хоча формально показник базової моделі вищий, варто зазначити, що згідно зі стандартами (в тому числі ДСТУ EN 50160), допустимим вважається перебування напруги в межах норми протягом 95% часу інтервалу

спостереження. Оскільки $0,96 > 0,95$, розроблена нечітка система повністю задовольняє вимоги стандарту якості.

Найважливіший результат спостерігається в останній колонці таблиці.

- базова модель для досягнення своєї "ідеальної" точності виконала 36 перемикачів.
- нечітка модель, завдяки адаптивній фільтрації дрібних коливань, обмежилася 29 перемикачними.

Таким чином, зменшення кількості спрацювань становить:

$$\Delta N = \frac{36 - 29}{36} \cdot 100\% \approx 19,4\%$$

Це підтверджує головну гіпотезу роботи: нечіткий контролер дозволяє знайти оптимальний компроміс – він дещо "послаблює" реакцію на незначні відхилення (знижуючи P з 0,98 до 0,96, що все ще є нормою), але натомість забезпечує суттєву економію механічного ресурсу дороговартісного обладнання.

Досягнутий ефект економії ресурсу (без погіршення якості напруги) забезпечується насамперед інтелектуальним алгоритмом вибору часової затримки (τ_{delay}).

Якщо класична система реагує на будь-яке відхилення через фіксований час (ігноруючи природу збурення), то нечіткий регулятор «фільтрує» короткочасні коливання, збільшуючи затримку в стабільних режимах, і миттєво реагує лише на глибокі просадки.

Варто окремо відзначити особливості імплементації алгоритму в середовищі Simulink. Блок змінної затримки часу не є стандартним елементом бібліотеки, тому його логіка була запрограмована вручну за допомогою блоку «MATLAB Function». Це дозволило гнучко описати нелінійну залежність часу спрацювання від вихідного сигналу

дефазифікатора, забезпечуючи плавну зміну параметра τ в режимі реального часу.

Висновки до розділу

1. З метою верифікації теоретичних розробок та отримання кількісних оцінок ефективності, у середовищі візуального програмування MATLAB/Simulink (з використанням бібліотек SimPowerSystems) було синтезовано повнофункціональну імітаційну модель розподільчої мережі. Ключовим елементом моделі стала програмна реалізація запропонованого нечіткого контролера на базі алгоритму Мамдані, інтегрованого в контур керування електроприводом РПН силового трансформатора.

2. Статистична обробка масивів даних, отриманих в ході серії чисельних експериментів, підтвердила функціональну спроможність розробленої системи. Встановлено, що як базова (пропорційна), так і запропонована (нечітка) системи автоматичного керування успішно виконують головну задачу: утримання усталеного відхилення напруги у споживача в межах, регламентованих державним стандартом ДСТУ EN 50160:2023. Це свідчить про те, що впровадження інтелектуальних алгоритмів не призводить до погіршення точності стабілізації режиму.

3. Порівняльний аналіз динамічних характеристик виявив суттєву експлуатаційну перевагу нечіткого регулятора. За ідентичних умов навантаження кількість комутацій контактної системи РПН зменшилась на 19,4 % порівняно з класичною системою. Такий результат досягнуто завдяки впровадженню блоку адаптивної часової затримки, який ефективно відфільтровує короткочасні збурення. Зменшення частоти перемикачів прямо корелює зі зниженням механічного зносу обладнання, подовженням терміну служби масла та скороченням витрат на технічне обслуговування трансформаторів.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

Специфіка експлуатації об'єктів електроенергетики, зокрема силових трансформаторів із системами РПН, пов'язана з наявністю підвищених ризиків для персоналу. Домінуючим фактором небезпеки в таких умовах виступає ймовірність ураження електричним струмом, що за статистикою травматизму характеризується найвищим відсотком летальних наслідків порівняно з іншими виробничими факторами.

У сучасному розумінні електробезпека – це комплексний термін, що охоплює ієрархічну систему організаційних нормативів та інженерно-технічних рішень. Їхня головна мета – повна мінімізація або ліквідація шкідливого впливу на працівника таких факторів, як протікання струму через організм, термічні опіки електричною дугою, а також вплив електромагнітних полів високої напруженості та розрядів статичної електрики.

Для запобігання електротравматизму на підстанціях реалізується багаторівнева стратегія захисту:

1. Конструктивна недоступність: розміщення струмопровідних частин на безпечній висоті або в закритих комірках, що унеможлиблює випадковий контакт.

2. Безпечні напруги: використання зниженої напруги (12В, 24В, 36В) для живлення ланцюгів керування, автоматики та переносного освітлення.

3. Активний захист: впровадження систем автоматичного відключення живлення (ПЗВ, автоматичні вимикачі) при виникненні витоків або замикань на корпус.

4. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ): обов'язкове застосування діелектричних рукавичок, бот, килимків та інструменту з ізольованими рукоятками при оперативних перемиканнях.

Фундаментальним бар'єром на шляху електричного струму є ізоляція. Вона поділяється на робочу (забезпечує нормальне функціонування установки), додаткову (для захисту при пошкодженні робочої), подвійну та підсилену. Стан ізоляції контролюється шляхом регулярних вимірювань опору мегомметром, оскільки в процесі експлуатації діелектрики старіють під дією нагріву, вологи та механічних вібрацій.

Однак, при пробі ізоляції на корпус (наприклад, замикання обмотки трансформатора на бак), металеві неструмопровідні частини опиняються під фазною напругою. Дотик до такого обладнання стає смертельно небезпечним (еквівалент однополюсного дотику до фази). Для нейтралізації цієї загрози застосовують захисне заземлення.

Захисне заземлення – це навмисне створення електричного контакту між металевими корпусами обладнання та ґрунтом (землею). Його головне завдання – не просто «відвести струм», а знизити потенціал корпусу пошкодженого обладнання до безпечного рівня, а також вирівняти потенціали на робочому майданчику (зниження напруги дотику $U_{\text{дот}}$ та напруги кроку $U_{\text{кроку}}$).

Згідно з вимогами «Правил улаштування електроустановок» (ПУЕ), для електроустановок напругою до 1000 В встановлено жорсткі норми опору розтіканню струму заземлюючого пристрою:

- у загальному випадку опір не повинен перевищувати 4 Ом.
- для джерел живлення малої потужності (трансформатори або генератори до 100 кВА) допускається збільшення опору до 10 Ом.

Фізика процесу базується на законі розподілу струмів у паралельних гілках. Оскільки опір тіла людини приймається в розрахунках рівним 1000 Ом, а опір якісного заземлення становить одиниці Ом, то при одночасному торканні людини до пошкодженого заземленого корпусу, основна частина струму замикання піде через заземлювач (шлях найменшого опору), забезпечуючи безпеку персоналу.

Система заземлення складається з двох елементів: власне заземлювача (провідника, що контактує з ґрунтом) та заземлюючих провідників (шин), що з'єднують обладнання з заземлювачем.

Класифікація заземлювачів:

1. Природні: Використовують наявні будівельні конструкції, що мають надійний контакт із землею. До них відносять:

- металеві трубопроводи (окрім тих, що транспортують горючі рідини чи газу);
- арматурні каркаси залізобетонних фундаментів;
- свинцеві оболонки підземних кабелів.
- *Важливо:* Використання природних заземлювачів є пріоритетним з точки зору економії ресурсів.

2. Штучні: Спеціально змонтовані конструкції. Найчастіше це вертикальні електроди (сталеві кутники, труби або стрижні діаметром від 10-16 мм), заглиблені в ґрунт на 2,5–3 метри та об'єднані горизонтальною штабою за допомогою зварювання.

За топологією розміщення виділяють:

- контурне заземлення: Електроди розміщуються по периметру об'єкта. Це ефективне рішення, оскільки воно забезпечує вирівнювання потенціалів всередині контуру, знижуючи напругу кроку.
- виносне заземлення: Заземлювач виноситься за межі майданчика в зону з кращою провідністю ґрунту.

У внутрішніх приміщеннях підстанцій організовується магістраль заземлення (транзитна шина), до якої приєднуються всі металеві корпуси (баки трансформаторів, шафи РПН, каркаси щитів). Приєднання виконується виключно паралельно (окремим провідником від кожного апарату до шини), послідовне з'єднання заборонено для збереження цілісності захисту при обриві одного з провідників.

В електричних мережах з глухозаземленою нейтраллю (найпоширеніший тип мереж 380/220 В, системи TN), основним методом захисту від непрямого дотику є занулення.

Це навмисне електричне з'єднання відкритих провідних частин електроустановки (корпусів двигунів, шаф, світильників) з глухозаземленою нейтральною точкою джерела живлення (трансформатора або генератора).

Для реалізації цього заходу провідники поділяють за функціональним призначенням:

1. Нульовий робочий провідник ($0N$): Використовується для передачі електричної енергії до однофазних споживачів та створення симетрії напруг у трифазній системі. По ньому в нормальному режимі протікає робочий струм.

2. Нульовий захисний провідник ($0PE$): Призначений виключно для цілей електробезпеки. У нормальному режимі струм по ньому не протікає.

3. Суміщений провідник ($0PEN$): Виконує функції обох вищезгаданих провідників (система TN-C).

Мета занулення полягає в перетворенні пробною ізоляції на корпус в однофазне коротке замикання (КЗ) між фазовим проводом та захисним провідником. Створений контур «фаза-нуль» має малий опір, що призводить до різкого зростання струму (I_{k}). Цей струм повинен бути достатнім для миттєвого спрацювання апаратів захисту – автоматичних вимикачів (електромагнітний розчіплювач) або плавких запобіжників, які автоматично знеструмлюють аварійну ділянку.

Згідно з вимогами ПУЕ, час автоматичного вимкнення живлення не повинен перевищувати 0,4 с для мереж 220 В та 0,2 с для 380 В (у приміщеннях без підвищеної небезпеки допускаються більші інтервали, але не більше 5 с для розподільчих кіл).

Для організації $0PE$ -провідника дозволяється використовувати спеціально прокладені жили кабелів, сталеві труби електропроводки, алюмінієві оболонки кабелів тощо. Категорично заборонено використовувати

як захисний провідник нульовий робочий провід, що йде до вимикача або запобіжника, оскільки його розрив призведе до появи фазної напруги на корпусі приладу через опір навантаження.

Для мобільного обладнання та ручного електроінструменту (Клас I за електробезпекою) цілісність кола занулення є критичною. Тому підключення таких споживачів здійснюється через спеціальні кабелі, які містять додаткову жилу (третю для однофазної мережі, п'яту для трифазної). Конструкція штепсельних роз'ємів передбачає, що при вмиканні заземлюючий контакт з'єднується першим, а при вимиканні – розривається останнім.

Найбільш досконалим видом захисту є захисне вимкнення (диференційний захист), що реагує не на надструми КЗ, а на струми витоку. Такі пристрої (ПЗВ або диференційні автомати) постійно порівнюють струм, що входить у споживача по фазному проводу, зі струмом, що повертається по нульовому.

У нормальному режимі векторна сума струмів рівна нулю ($\Sigma I = 0$). При виникненні аварійної ситуації (дотик людини до струмопровідної частини, погіршення ізоляції, замикання на землю) баланс порушується ($I_{phase} \neq I_{neutral}$), і виникає диференційний струм.

Принцип дії:

1. Диференційний струм наводить ЕРС у вторинній обмотці вимірювального трансформатора струму (тороїда).
2. Отриманий сигнал активує пусковий орган (поляризоване реле).
3. Механізм вільного розчіплювання розмикає силові контакти під дією пружини.

Сучасні ПЗВ здатні відключити живлення за час менше 0,04 с при струмах витоку від 10 до 30 мА, що гарантує збереження життя людини навіть при прямому дотику до фази, оскільки фібриляція серця не встигає настати.

Специфічним видом небезпеки є статична електрика, що виникає внаслідок тертя діелектричних матеріалів (транспортні стрічки,

перекачування нафтопродуктів, рух газів). Накопичений заряд може досягати потенціалу в десятки кіловольт. Хоча енергія розряду зазвичай мала і викликає лише рефлекторну реакцію (що може призвести до падіння з висоти або потрапляння в механізми), основна небезпека полягає у можливості іскрового розряду, який здатний запалити горючі суміші парів або пилу.

Основним методом боротьби є відведення зарядів у землю. Для цього всі металеві частини технологічного обладнання, трубопроводи та ємності підлягають обов'язковому заземленню не менше ніж у двох точках. Також застосовують антистатичні добавки, зволоження повітря та іонізатори.

Блискавкозахист – це комплекс заходів для захисту будівель та обладнання від прямих ударів блискавки (ПУБ) та вторинних проявів (індукованих перенапруг). Система включає:

- Блискавкоприймачі: Стрижні або троси, що приймають удар на себе.
- Струмівідводи: Провідники для безпечного проходження струму блискавки.
- Заземлювачі: Елементи для розсіювання енергії в ґрунті.

Для захисту чутливої електроніки (зокрема, контролерів РПН) від імпульсних перенапруг додатково встановлюють пристрої захисту від імпульсних перенапруг (ПЗП/SPD) класів I, II та III.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності керування режимами напруги в розподільчих електричних мережах. Шляхом теоретичних досліджень та комп'ютерного моделювання розроблено систему автоматичного керування пристроєм РПН силового трансформатора на базі нечіткої логіки.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Проведений аналіз режимів роботи розподільчих мереж показав, що існуючі методи регулювання напруги (зокрема, на базі класичних реле типу АРТ-1Н) мають суттєві недоліки. Головним з них є фіксована часова затримка та відсутність адаптації до динаміки навантаження, що призводить до надмірної кількості перемикань і прискореного зносу обладнання. Визначено, що для усунення цих недоліків необхідно застосовувати інтелектуальні алгоритми керування.

2. Обґрунтовано доцільність використання математичного апарату нечіткої логіки для синтезу закону керування пристроєм РПН. Доведено, що застосування лінгвістичних змінних дозволяє ефективно формалізувати експертні знання диспетчера та врахувати нелінійні залежності між параметрами режиму, не вимагаючи точної математичної моделі об'єкта. В якості базового алгоритму обрано метод Мамдані, який забезпечує високу інтерпретабельність правил та гнучкість налаштування.

3. Розроблено структуру та алгоритмічне забезпечення нечіткого контролера, вхідними параметрами якого є: відхилення напруги, тренд її зміни (похідна) та добовий ресурс перемикань. Синтезовано базу з 27 продукційних правил, яка реалізує адаптивну стратегію керування: час затримки спрацювання динамічно змінюється залежно від глибини відхилення напруги та стабільності процесу. Це дозволяє системі ігнорувати короткочасні збурення, але миттєво реагувати на глибокі просадки.

4. У середовищі MATLAB/Simulink створено комплексну імітаційну модель ділянки розподільчої мережі 110/10 кВ з трансформатором ТМН-10000/110. Реалізовано програмні модулі нечіткого контролера та блоку змінної затримки часу. Проведено серію порівняльних експериментів з класичним пропорційним регулятором при ідентичних графіках навантаження.

5. Статистична обробка результатів моделювання підтвердила високу ефективність запропонованого рішення: розроблена система забезпечує утримання усталеного відхилення напруги в межах, регламентованих стандартом ДСТУ EN 50160:2023 (інтегральна ймовірність відповідності нормі становить 0,96); кількість комутацій приводу РПН зменшилася на 19,4% (29 перемикачів проти 36 у базовій моделі).

6. Впровадження розробленої системи дозволяє суттєво подовжити міжремонтний ресурс дороговартісних пристроїв РПН, зменшити знос контактної групи та витрати на обслуговування трансформаторного парку без погіршення якості електропостачання споживачів.

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. Electrical Power Systems Quality. Second Edition / R. Dugan, M. McGranaghan, S. Santoso, W. Beaty. – Boston : McGraw-Hill, 2003. – 525 p
7. Гриб О. Г. Ймовірність розподілу відхилення напруги в електричних мережах зовнішнього освітлення / О. Г. Гриб, О. М. Довгалюк, О. В. Саприка // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – 2010. – № 4(63). Частина 1 – С. 94 – 97. – ISSN 1995–0519.

8. Терешкевич Л. Б. Математичні методи керування несиметрією напруг в системах електропостачання / Л. Б. Терешкевич, М. І. Цибульський // Технічна електродинаміка. – 2006. – №2. – С. 65–67. – ISSN 0204–3599.

9. Червінська Т.М. Математичні моделі керування реактивною потужністю та несиметрією напруги в електричній мережі / Терешкевич Л. Б., Червінська Т.М., Кузьменко М.В. // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Выпуск 32. – 2010.

10. Бурбело М.Й. Проектування систем електропостачання. Приклади розрахунків / Бурбело М.Й. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2005. – 148 с.

11. Plieshkov P. H., Zinzura V. V., Plieshkov S. P. (2019) Automatic Control Of Distribution Electrical Network Mode With The Voltages Unbalance *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3(171), 83-91.

12. Плешков П. Г. Задача векторної оптимізації в управлінні безконтактним пристроєм РПН силового трансформатора / П. Г. Плешков, М. В. Кубкін, В. В. Зінзура // Актуальні задачі сучасних технологій: міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів. Тернопіль, 21-22 грудня 2010 р. – Тернопіль, 2010. – С. 115.

13. Зінзура В. В. Методи розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги в електричних мережах / В. В. Зінзура // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація /. – Вип. 25. Ч.1 – Кіровоград: КНТУ, 2012. С. 350-360.

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

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

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

17. Зінзура В. В. Розробка та дослідження роботи системи автоматичного управління пристроєм РПН силового трансформатора / В. В. Зінзура // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. - № 3. – С. 99-109.

18. Зінзура В. В. Система автоматичного управління пристроєм РПН силового трансформатора / В. В. Зінзура // Проблеми енергоефективності та енергозбереження: Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених. Кіровоград, 14-16 листопада 2012 р. – Кіровоград, 2012. – С. 89-93

19. Плешков П. Г. Оптимальне керування режимами напруг низьковольтних розподільних електричних мереж із використанням регулюючих пристроїв силових трансформаторів / П. Г. Плешков, Ю. А. Леванцова, В. В. Зінзура // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія : Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. - 2017. - № 34. - С. 56-61.

20. Тарануха М. С. Оптимальне керування режимами реактивного навантаження за умов несиметрії напруг розподільчих електричних мереж / М. С. Тарануха, Р. В. Телюта, В. В. Зінзура // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія : Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. - 2015. - № 42. - С. 62-66. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vsрудmash_2015_42_16