

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

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ
ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

«Розробка дворівневої системи автоматичного регулювання напруги в електротехнічних системах електроспоживання»

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

« ____ » _____2024 р.

Керівник роботи професор, к.т.н.
_____Петро ПЛЄШКОВ

« ____ » _____2024 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електротехнічні системи електроспоживання»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

_____Петро ПЛЄШКОВ

«_____» _____ 20__ р.

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

_____Нижник Іван Олександрович

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) **Розробка дворівневої системи автоматичного регулювання напруги в електротехнічних системах електроспоживання**
Development of a two-level system for automatic voltage control in electrical power consumption systems

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

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 12.12.2024 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) _____
Вступ; Методи автоматичного регулювання напруги в розподільних електричних мережах; Комп'ютерне моделювання дворівневої системи автоматичного регулювання напруги; Практичне представлення системи автоматичного регулювання напруги в розподільних електричних мережах; Техніко-економічна ефективність застосування системи автоматичного керування режимами напруги; Висновки; Охорона праці.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	<i>07.10.24</i>	
2	<i>Методи автоматичного регулювання напруги в розподільних електричних мережах</i>	<i>15.10.24</i>	
3	<i>Комп'ютерне моделювання дворівневої системи автоматичного регулювання напруги</i>	<i>22.10.24</i>	
4	<i>Практичне представлення системи автоматичного регулювання напруги в розподільних електричних мережах</i>	<i>04.11.24</i>	
5	<i>Техніко-економічна ефективність застосування системи автоматичного керування режимами напруги</i>	<i>12.11.24</i>	
6	<i>Висновки</i>	<i>18.11.24</i>	
7	<i>Охорона праці</i>	<i>24.11.24</i>	
8	<i>Оформлення пояснювальної записки ВКР</i>	<i>02.12.24</i>	
9	<i>Оформлення презентаційної частини ВКР</i>	<i>10.12.24</i>	

Дата видачі завдання
Підпис керівника _____

«____» _____ 2024 р.
Петро ПЛЄШКОВ

Завдання прийнято до виконання
Підпис здобувача _____

«____» _____ 2024 р.
Іван НИЖНИК

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 105 с.; 41 рис.; 7 табл.; 21 джерело.

Нижник І.О. Розробка дворівневої системи автоматичного регулювання напруги в електротехнічних системах електроспоживання. – Рукопис.

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

У магістерській роботі були виконані дослідження, спрямовані на розробку автоматизації управління дворівневою системою регулювання напруги в розподільних електричних мережах.

Мета дослідження полягала у підвищенні надійності роботи мережі за рахунок зниження кількості перемикачів механічного регулятора напруги (РПН) силового трансформатора, водночас забезпечуючи стабільну якість напруги.

Запропонований підхід до регулювання напруги для трансформатора верхнього рівня передбачає, що перемикач здійснюється лише тоді, коли задана кількість регуляторів нижнього рівня не може підтримувати напругу в допустимих межах. Це дозволяє значно скоротити кількість перемикачів механічного пристрою РПН на підстанції верхнього рівня, що, своєю чергою, підвищує надійність функціонування електричних мереж.

У рамках роботи було спроектовано структуру мікропроцесорного регулятора напруги для трансформаторів із безконтактним пристроєм РПН, а також розроблено блок прийняття рішень, заснований на мікропроцесорі. Цей блок під час роботи дворівневої системи виконує обчислення вагового коефіцієнта згідно з розробленим нечітким алгоритмом.

Техніко-економічний аналіз порівняння існуючої системи та розробленої дворівневої системи автоматичного регулювання напруги продемонстрував, що новий підхід є економічно доцільним.

Ключові слова: регулювання напруги, дворівнева система, розподільні електромережі, мікропроцесорне регулювання, силовий трансформатор, надійність електропостачання.

ABSTRACT

Qualification work: 105 p.; 41 fig.; 7 tables; 21 sources.

Nyzhnyk I.O. Development of a two-level automatic voltage regulation system in electrical power consumption systems. – Manuscript.

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

The master's thesis carried out research aimed at developing automation of control of a two-level voltage regulation system in distribution electrical networks.

The purpose of the study was to increase the reliability of the network by reducing the number of switching operations of the mechanical voltage regulator (VR) of the power transformer, while ensuring stable voltage quality.

The proposed approach to voltage regulation for the upper-level transformer assumes that switching is carried out only when a given number of lower-level regulators cannot maintain the voltage within the permissible limits. This allows to significantly reduce the number of switching operations of the mechanical tap-changer device at the upper-level substation, which, in turn, increases the reliability of the operation of electrical networks.

As part of the work, the structure of a microprocessor voltage regulator for transformers with a non-contact tap-changer device was designed, and a decision-making unit based on a microprocessor was also developed. This unit calculates the weight coefficient during the operation of the two-level system according to the developed fuzzy algorithm.

A feasibility analysis of the comparison of the existing system and the developed two-level automatic voltage regulation system demonstrated that the new approach is economically feasible.

Keywords: voltage regulation, two-level system, distribution networks, microprocessor regulation, power transformer, reliability of power supply.

ЗМІСТ

	ВСТУП.....	6
1	МЕТОДИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ.....	8
1.1.	Аналіз підходів автоматичного регулювання напруги в РЕМ...	8
1.2.	Алгоритми автоматичного регулювання напруги в РЕМ.....	12
1.2.1.	Автоматичне регулювання напруги для підстанції вищого рівня.	12
1.2.2.	Автоматичне керування для дворівневої системи регулювання напруги в РЕМ.....	18
1.3.	Вибір математичного апарату, придатного для вирішення задачі автоматизації процесу керування режимом напруги в РЕМ.....	20
1.4.	Алгоритм роботи блоку визначення вагового коефіцієнту підстанції нижнього рівня.	21
2	КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДВОРІВНЕВОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ	34
2.1.	Математична модель дворівневої системи автоматичного регулювання напруги в РЕМ.....	34
2.2.	Комп'ютерна імітаційна модель дворівневої системи автоматичного регулювання напруги в РЕМ.	42
2.3.	Ефект застосування розробленої системи керування режимами напруги в РЕМ за допомогою ком'ютерного моделювання.....	56
3	ПРАКТИЧНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ.....	64

3.1.	Мікропроцесорна система регулювання напруги нижнього рівня.	64
3.2.	Система блоку прийняття рішення на базі мікропроцесора.....	68
3.3.	Аналіз похибок вимірювальних каналів.	71
3.3.1.	Похибки вимірювального трансформатора струму.....	72
3.3.2.	Похибка перетворювачів напруги.	73
3.3.3.	Визначення похибки аналого-цифрового перетворювача.	77
4	ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ НАПРУГИ.....	81
4.1.	Розрахунок капітальних витрат розробленої системи автоматичного керування.	81
4.2.	Обчислення річних експлуатаційних витрат.	83
4.3.	Обчислення економічної ефективності впровадження.	86
	ВИСНОВКИ.....	89
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	91
	Додаток А. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	94

ВСТУП

Аналіз наявних пристроїв для регулювання напруги силових трансформаторів з РПН виявив, що жоден з них не вирішує одночасно всі ключові завдання управління напругою. Зазвичай вони або спрямовані на покращення якості електропостачання для споживачів, що супроводжується зростанням частоти перемикань РПН, або забезпечують вищу надійність енергопостачання, але з компромісом у вигляді погіршення якості напруги. Особливо критичними є ситуації, коли відхилення напруги від номінального значення стають суттєвими, адже це призводить до тривалого постачання електроенергії низької якості. Така проблема негативно впливає на стабільність роботи споживачів і може викликати передчасний вихід з ладу обладнання.

Тиристорні пристрої РПН розглядаються як перспективне рішення для вдосконалення систем регулювання напруги завдяки їх здатності забезпечувати плавне та швидке перемикання ступенів трансформатора. Однак, їхнє використання нині обмежене лише мережами середньої та низької напруги, що пов'язано з відсутністю напівпровідникових ключів, здатних працювати за умов великих напруг і струмів. Подолання цього технічного бар'єру дозволить значно розширити область застосування тиристорних пристроїв, зробивши їх ефективними навіть у високовольтних мережах.

Для розв'язання задачі створення високоефективних автоматизованих систем регулювання напруги силових трансформаторів з РПН пропонується комплексний підхід, що базується на системному аналізі. Першим кроком є формулювання нового закону регулювання напруги, який би враховував виявлені недоліки існуючих методів і забезпечував значно вищу якість управління. Такий закон має бути здатним адаптуватися до різноманітних умов роботи мережі, знижуючи ризик суттєвих відхилень напруги.

Наступним етапом є розробка дворівневого підходу до регулювання напруги, який включає управління як на районних, так і на кінцевих підстанціях. Така схема дозволить вирішити дві основні задачі: підвищення якості напруги для споживачів та забезпечення стабільності енергопостачання. Для реалізації цього підходу необхідно створити закон регулювання, який враховуватиме особливості взаємодії між рівнями управління і забезпечить їхню скоординовану роботу.

Ще одним важливим кроком є розробка методології синтезу систем управління, що дозволить ефективно впроваджувати розроблені закони регулювання в реальні мережі. Такі системи мають забезпечувати високу швидкодію, надійність та адаптивність до змінних умов роботи електричних мереж. Крім того, їх впровадження повинно супроводжуватись мінімізацією витрат на технічне обслуговування і модернізацію.

Після розробки основних компонентів систем управління необхідно провести детальне дослідження їхньої ефективності. Це включає оцінку якості регулювання напруги, аналіз впливу на надійність роботи мережі та споживачів, а також перевірку відповідності розроблених рішень сучасним стандартам. Результати дослідження дозволять виявити сильні сторони запропонованих підходів і визначити аспекти, які потребують додаткового вдосконалення.

Заключним етапом є визначення шляхів подальшого розвитку і вдосконалення методів та засобів регулювання напруги в електричних мережах. Це може включати розробку нових технічних рішень, інтеграцію сучасних цифрових технологій та підвищення енергоефективності систем управління. Такі перспективи забезпечать довгостроковий розвиток електроенергетичних мереж і підвищать їхню здатність відповідати зростаючим вимогам споживачів.

Реалізація запропонованих етапів алгоритму є основою подальших розділів магістерської роботи, що покликана вирішити поставлену задачу.

1 МЕТОДИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

1.1. Аналіз підходів автоматичного регулювання напруги в РЕМ

Як зазначено в попередньому розділі, одна з основних причин зниження надійності роботи розподільчих електричних мереж (РЕМ) полягає у виході із ладу пристрою РПН (регулювання під навантаженням) силового трансформатора. Часті перемикання РПН створюють додаткове навантаження на компоненти трансформатора, що призводить до їхнього прискореного зношення та підвищує ризик відмови. Для мінімізації частоти перемикань РПН трансформатора районної підстанції запропоновано інтегрувати регулятори напруги кінцевих підстанцій із регулятором напруги районної підстанції в єдину дворівневу систему управління.

Запропонована система працює за таким принципом: перемикання РПН дозволяється лише у тому випадку, коли регулятори напруги на певній кількості кінцевих підстанцій досягають меж свого діапазону регулювання. Це дозволяє зменшити число перемикань на трансформаторі районної підстанції, водночас зберігаючи належну якість електропостачання для споживачів. Такий підхід сприяє найбільш раціональному використанню ресурсу пристроїв РПН і підвищує загальну надійність енергопостачання.

Функціональна схема дворівневої системи регулювання представлена на рисунку 1.1. Вона наочно демонструє взаємодію між регуляторами напруги різних рівнів, а також алгоритм передачі сигналів про досягнення меж регулювання. Це забезпечує синхронізовану роботу всієї системи і дозволяє оперативно реагувати на зміну різних параметрів електричної мережі.

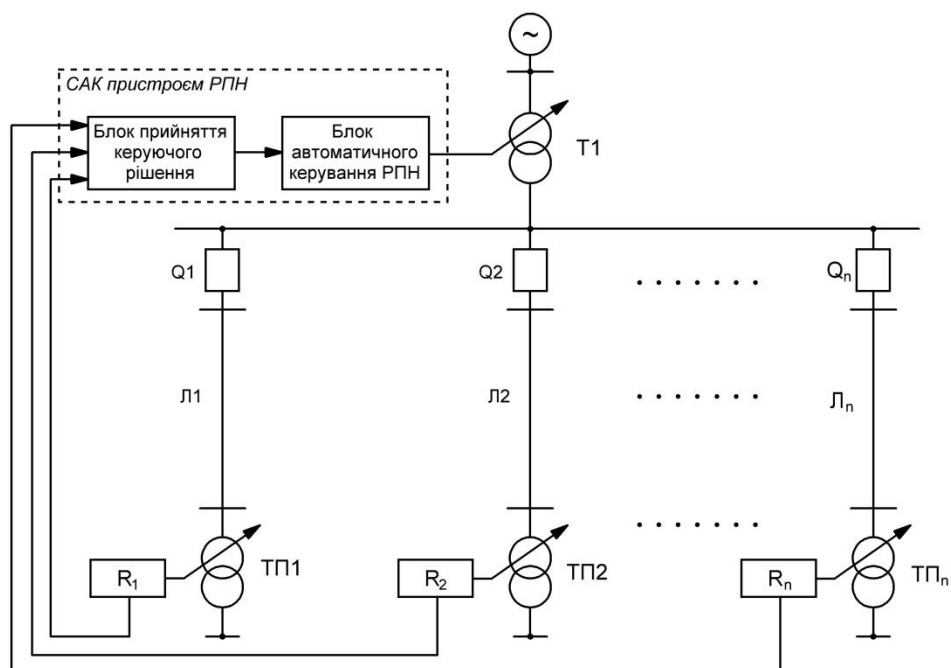


Рисунок 1.1 - Функціональна схема регулювання напруги за допомогою дворівневої системи.

На рисунку 1.1 представлено функціональну схему регулювання напруги за допомогою дворівневої системи. Основними елементами цієї схеми є:

- Тр — силовий трансформатор районної підстанції, який обладнаний пристроєм РПН, що забезпечує регулювання напруги на верхньому рівні системи.
- Т1 – Тn — трансформатори нижнього рівня, розташовані на кінцевих підстанціях, що оснащені тиристорними пристроями РПН для забезпечення локального регулювання напруги.
- Q1 – Qn — вимикачі, що використовуються для підключення або відключення трансформаторів кінцевих підстанцій до електричної мережі відповідно режиму роботи системи.
- R1 – Rn — регулятори напруги нижнього рівня, які виконують функцію локального управління напругою на кінцевих підстанціях. Вони забезпечують стабільність напруги в інтервалах свого діапазону і передають

сигнали до верхнього рівня системи у випадку виходу за межі допустимого інтервалу.

Ця схема забезпечує скоординовану роботу регуляторів напруги на обох рівнях: на районній підстанції (верхній рівень) і на кінцевих підстанціях (нижній рівень). Якщо регулятори напруги нижнього рівня ($R1 - Rn$) вичерпують свій діапазон регулювання, сигнал про це передається до регулятора напруги трансформатора Tr , який виконує перемикання пристроєм РПН. Такий підхід дозволяє мінімізувати число перемикачів РПН на трансформаторі районної підстанції, зберігаючи якість напруги для споживачів.

На кінцевих підстанціях, таких як підстанції класу напруги 10/0,4 кВ, зазвичай встановлюються силові трансформатори, обладнані пристроями перемикання без збудження (ПБЗ). Особливістю цих трансформаторів є те, що регулювання відгалужень можливе лише після відключення їх від електричної мережі. Через це перемикання виконується дуже рідко — зазвичай кілька разів на рік, переважно під час планових робіт або зміни режимів.

У сучасних умовах, завдяки прогресу у сфері силової напівпровідникової техніки, стали доступними напівпровідникові ключі, здатні працювати з великими напругами і струмами. У порівнянні з механічними пристроями РПН, напівпровідникові аналоги демонструють суттєві переваги: підвищену надійність, довший експлуатаційний ресурс, швидшу реакцію на зміни напруги та спрощене технічне обслуговування. Це відкриває перспективи для модернізації трансформаторів з ПБЗ шляхом впровадження пристроїв РПН на базі напівпровідникових технологій.

Такі пристрої здатні забезпечувати швидке та плавне регулювання напруги, водночас знижуючи ризики, пов'язані з відмовами електрообладнання. Крім того, вони є економічно ефективним рішенням завдяки відносно низькій вартості виготовлення та монтажу. Це дозволяє

значно підвищити якість постачання електроенергії навіть у розподільчих мережах нижчого рівня напруги.

На рисунку 1.2 представлено структурну функціональну схему системи регулювання напруги за допомогою трансформатора з ПБЗ, обладнаного напівпровідниковим пристроєм РПН. Схема ілюструє процес інтеграції новітніх пристроїв у існуючі системи регулювання напруги, демонструючи їх взаємодію з іншими елементами системи, такими як регулятори напруги та вимикачі. Це рішення дозволяє досягти оптимального балансу між якістю напруги для споживачів та ресурсозберігаючою експлуатацією трансформаторного обладнання.

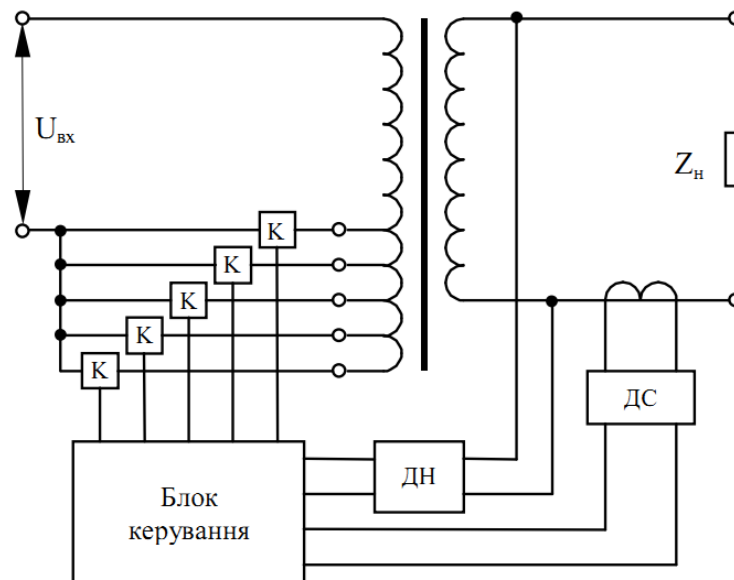


Рисунок 1.2 - Функціональна схема регулювання напруги трансформатора з ПБЗ з безконтактним пристроєм РПН

Таким чином, для досягнення основної мети дослідження було сформульовано загальне завдання, яке полягає у визначенні ефективного алгоритму роботи системи автоматичного керування. Цей алгоритм повинен, на основі заданих параметрів регулювання (діапазону та кроку пристрою РПН) на підстанціях різних рівнів, а також на основі вимірних значень

струмів і напруг на стороні низької напруги кожної підстанції, забезпечувати оптимальну роботу енергосистеми.

Ключовою вимогою до алгоритму є здатність у режимі реального часу визначати управляючі впливи, які мінімізують усталене відхилення напруги від номінального значення. При цьому важливо також забезпечити мінімально можливе число спрацювань механічного пристрою РПН, щоб збільшити ресурс обладнання та підвищити надійність роботи енергосистеми. Розробка такого алгоритму дозволить знайти баланс між якістю електропостачання та ресурсозберігаючою експлуатацією електрообладнання, що є важливим аспектом сучасного управління електричними електромережами.

Отриманий алгоритм стане основою для реалізації автоматизованих систем керування напругою, здатних адаптуватися до динамічних змін у мережі, забезпечуючи високу ефективність і стабільність роботи як на підстанціях високого рівня, так і на кінцевих підстанціях.

1.2. Алгоритми автоматичного регулювання напруги в РЕМ.

Для виконання поставленого завдання насамперед потрібно здійснити розробку алгоритмів автоматичного управління пристроєм РПН для підстанції високого рівня, а також для дворівневої системи регулювання напруги в цілому. Цей процес передбачає створення ефективних моделей керування напругою, які забезпечують стабільність напруги в електричних мережах та адаптацію системи до змінних умов експлуатації.

1.2. 1. Автоматичне регулювання напруги для підстанції вищого рівня. На вузлових підстанціях електричної мережі застосовується принцип зустрічного регулювання напруги, який передбачає підтримку номінального рівня напруги $U_{ном}$ на шинах підстанції при низьких значеннях навантаження. У міру зростання навантаження напруга поступово підвищується, що дозволяє компенсувати втрати в елементах мережі, досягаючи значення 1,05

$U_{ном}$. Для забезпечення цього процесу в пристроях РПН використовується ступінчастий метод регулювання напруги, який можна математично описати у вигляді відповідної формули. Цей підхід забезпечує ефективну роботу мережі, зводячи до мінімуму енергетичні втрати та стабілізуючи параметри електропостачання:

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

$$K_m = \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{i-1}}, & \text{if } u(t) \leq u_{i,K}; \\ \frac{U_i}{U_{i-1}}, & \text{if } u_{i,K} < u(t) < u_{i+1,K}; \\ \frac{U_{i+1}}{U_{i-1}}, & \text{if } u(t) \geq u_{i+1,K}; \end{cases} \quad (1.1)$$

де K_m – коефіцієнт трансформації трансформатора, обладнаного пристроєм РПН, який визначає співвідношення між напругою на первинній та вторинній обмотках;

$u(t)$ – приведена напруга на шинах вузлової підстанції, скоригована з урахуванням струмової компенсації, що забезпечує адаптацію до зміни навантаження;

$u_{н.з.}$, $u_{в.з.}$ – межі нечутливості регулятора, які встановлюються для забезпечення надійної та стабільної роботи системи; нижня і верхня межі зони нечутливості визначають діапазон, у якому регулятор не реагує на зміни напруги.;

U_y – уставка регулятора, що відповідає номінальному значенню напруги $U_{ном}$ на шинах підстанції; це цільове значення напруги, яке підтримується системою.;

$U(t)$ – поточне значення напруги на шинах підстанції, яке вимірюється у реальному часі для оцінки відхилення від уставки;

$I_{\min}$ – мінімальний струм, що відбирається від шин підстанції в умовах найменшого навантаження; використовується для аналізу режимів роботи системи;

$I(t)$ – поточне значення струму, який споживається від шин підстанції; дозволяє оцінювати динаміку навантаження у мережі;

$U_{н.н}$ – значення напруги на шинах низької напруги трансформатора, яке залежить від навантаження та режиму роботи трансформатора;

U_i – напруга, що генерується в обмотці високої напруги трансформатора, коли до неї підключено відгалуження i ; залежить від вибраного положення пристрою РПН;

K_1 – коефіцієнт, що визначає чутливість регулятора; характеризує, наскільки швидко регулятор реагує на зміни параметрів системи;

K_2 – коефіцієнт, який задає нахил характеристики зустрічного регулювання; впливає на величину зміни напруги залежно від навантаження:

$$K_2 = \frac{0,05U_{ном}}{I_{max} - I_{min}}; \quad (1.2)$$

I_{max} – струм навантаження максимального режиму.

В умовах реальної експлуатації електричних мереж основною метою є зменшення числа перемикачів відгалужень трансформатора, оскільки часте перемикачання може скорочувати ресурс обладнання. Задля цього свідомо припускається незначне зниження якості регулювання, яке компенсується підвищенням надійності роботи системи.

Щоб досягти такого балансу, закон регулювання адаптують, зробивши його менш чутливим до короточасних змін напруги. Це дозволяє зосередити роботу регулятора на компенсації тільки стійких відхилень напруги. Для цього у формулу (1.1) вводять часову затримку τ_z , яка запобігає реакції на

швидкоплинні коливання, та логічну умову, яка забезпечує регулювання лише при тривалих змінах параметрів.

Модифіковане рівняння набуває вигляду, який враховує затримку τ_3 та встановлені умови реагування, сприяючи зменшенню кількості перемикань та підвищенню стабільності роботи трансформаторів із пристроями РПН:

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

$$K_m = \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{н.н}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \leq u_{н.з}; \\ u(t - \tau_3) \leq u_{н.з}; \end{cases} \\ \frac{U_i}{U_{н.н}}, \text{ при } u_{н.з} < u(t) < u_{в.з}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{н.н}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \geq u_{в.з}; \\ u(t - \tau_3) \geq u_{в.з}; \end{cases} \end{cases} \quad (1.3)$$

де τ_3 – це час затримки сигналу, який вводиться до системи регулювання для зменшення чутливості до короточасних коливань напруги.

Закон регулювання напруги (1.3), що застосовується в автоматичних системах керування (САК) із використанням безконтактних пристроїв РПН на підстанціях нижчого рівня (наприклад, трансформаторних підстанціях 10/0,4 кВ), був адаптований для підвищення стабільності роботи.

Для цього до закону (1.3) додали додаткову логічну умову, яка враховує знак похідної огинаючої $U_{ог}$ регульованої напруги $U(t)$. Ця умова дозволяє уникати зайвих перемикань відгалужень трансформатора, якщо регульований параметр знаходиться поза межами зони нечутливості регулятора, але має тенденцію самостійно повертатися в допустимі межі під впливом зовнішніх чинників.

Модифікований закон регулювання, що враховує цю логіку, може бути записаний у вигляді:

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

$$K_m = \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{н.н}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \leq u_{н.з}; \\ u(t - \tau_3) \leq u_{н.з}; \\ \frac{dU_{ор}}{dt} \leq 0; \end{cases} \\ \frac{U_i}{U_{н.н}}, \text{ при } u_{н.з} < u(t) < u_{в.з}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{н.н}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \geq u_{в.з}; \\ u(t - \tau_3) \geq u_{в.з}; \\ \frac{dU_{ор}}{dt} \geq 0, \end{cases} \end{cases} \quad (1.4)$$

де $\frac{dU_{ор}}{dt}$ — це похідна від огибаючої контрольованої напруги, яка відображає швидкість зміни значення $U(t)$ у часі.

Зазначений закон регулювання має недолік, пов'язаний із затримкою сигналу керування на час τ_3 , що призводить до несвоєчасної реакції регулятора на значні відхилення контрольованої напруги. Як наслідок, напруга на навантаженні може тривалий час залишатися поза нормативними межами. Це негативно впливає на роботу споживачів, спричиняючи зміни режимів функціонування обладнання, зниження обсягів випуску продукції, погіршення її якості, а в окремих випадках навіть виникнення браку у виробництві.

З метою усунення цих недоліків до закону регулювання (1.4) доцільно додати умову, яка дозволяє виконувати перемикання пристрою РПН без урахування затримки τ_3 , якщо контрольована напруга значно відхиляється від номінального значення $U_{ном}$.

Доповнений закон регулювання можна записати у наступному вигляді:

$$\begin{aligned}
u(t) &= K_1((U(t) - U_y) - K_2(I(t) - I_{\min})); \\
K_m &= \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{н.н}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \leq u_{н.з}; \\ u(t - \tau_s) \leq u_{н.з}; \\ \frac{dU_{ог}}{dt} \leq 0; \end{cases} \\ \frac{U_i}{U_{н.н}}, \text{ при } u_{н.з} < u(t) < u_{в.з}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{н.н}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \geq u_{в.з}; \\ u(t - \tau_s) \geq u_{в.з}; \\ \frac{dU_{ог}}{dt} \geq 0; \end{cases} \end{cases} \\
U(t) \xrightarrow{t_{\text{рег}} \rightarrow \min} U_{\text{ном}} \pm \Delta U, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) < u_{н.} \\ u(t) > u_{в.} \end{cases}
\end{aligned} \tag{1.5}$$

де $\Delta U = U_{в.з} - U_{ном} = U_{ном} - U_{н.з}$;

$U_{в.з}$, $U_{н.з}$ – напруги електричної мережі, які визначають верхню та нижню межі зони нечутливості регулятора. Ці значення встановлюються на основі вимог до надійності системи і забезпечують стабільність її роботи, мінімізуючи кількість перемикачів;

$u_{в.з1}$, $u_{н.з1}$ – верхня та нижня межі зони нечутливості, що визначаються вимогами до якості регулювання напруги. Ці параметри орієнтовані на забезпечення належної точності підтримки напруги в межах, прийнятних для споживачів;

$t_{\text{рег}}$ – час регулювання, протягом якого значення напруги повертається в межі зони нечутливості, визначеної умовами надійності системи. Цей параметр є ключовим для оцінки динамічних властивостей регулятора та забезпечення ефективного реагування на зміни в мережі.

1.2.2. Автоматичне керування для дворівневої системи регулювання напруги в РЕМ.

Закон автоматичного керування дворівневої системи регулювання напруги в РЕМ можна записати у вигляді:

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

$$K_m = \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{\text{нн}}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \leq u_{\text{н.з}}; \\ u(t - \tau_3) \leq u_{\text{н.з}}; \\ \frac{dU_{\text{ор}}}{dt} \leq 0; \\ \sum_{j=1}^n K_j m_{\text{н}j} > K_{\text{п}}; \end{cases} \\ \frac{U_i}{U_{\text{нн}}}, \text{ при } u_{\text{н.з}} < u(t) < u_{\text{в.з}}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{\text{нн}}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \geq u_{\text{в.з}}; \\ u(t - \tau_3) \geq u_{\text{в.з}}; \\ \frac{dU_{\text{ор}}}{dt} \geq 0; \\ \sum_{j=1}^n K_j m_{\text{в}j} > K_{\text{п}}; \end{cases} \end{cases} \quad (1.6)$$

де K_j – ваговий коефіцієнт j -го трансформатора нижнього рівня, цей коефіцієнт характеризує значення впливу конкретного трансформатора на загальний процес регулювання напруги в системі.;

n – число трансформаторів нижнього рівня;

$K_{\text{п}}$ – пороговий коефіцієнт, який визначає мінімальну кількість (або суму вагових коефіцієнтів) трансформаторів, при запиті від яких дозволяється виконати перемикання;

$m_{\text{н}j}, m_{\text{в}j}$ – коефіцієнти, що визначають вичерпання меж регулювання j -м трансформатором нижнього рівня при регулюванні напруги.

$$\begin{aligned}
m_H &= \begin{cases} 0, & \text{якщо } u_{II}(t) > u_{IIH3}; \\ 1, & \text{якщо } \begin{cases} u_{II}(t) \leq u_{IIH3}; \\ u_{II}(t - \tau_{II3}) \leq u_{IIH3}; \end{cases} \end{cases} \\
m_B &= \begin{cases} 0, & \text{якщо } u_{II}(t) < u_{IIB3}; \\ 1, & \text{якщо } \begin{cases} u_{II}(t) \geq u_{IIB3}; \\ u_{II}(t - \tau_{II3}) \geq u_{IIB3}; \end{cases} \end{cases}
\end{aligned} \tag{1.7}$$

де $u_{II}(t)$ – це поточне значення напруги на вихідних шинах трансформатора нижчого рівня, яка подається на навантаження або в подальші частини електричної мережі;

u_{IIH3}, u_{IIB3} – це напруги, що визначають нижню та верхню межі зони нечутливості для трансформатора нижнього рівня. В межах цієї зони регулятор не реагує на зміни напруги, вважаючи їх нормальними і не потребуючими коригувань;

τ_{II3} – час затримки сигналу регулятора нижнього рівня. Цей параметр дає змогу регулятору оцінювати зміни напруги за певний період, зменшуючи ефект миттєвих коливань.

Сума вагових коефіцієнтів усіх трансформаторів нижнього рівня повинна дорівнювати одиниці. Це означає, що пороговий коефіцієнт K_p може змінюватися в межах від 0 до 1.

Варто зазначити, що визначення коефіцієнта впливу K_j для кожного конкретного трансформатора нижнього рівня є складним завданням, оскільки на цей коефіцієнт впливає багато різних факторів. Це можуть бути параметри самого трансформатора (наприклад, потужність, стан, ефективність), умови навантаження, особливості роботи системи в різних режимах тощо. Тому для точної оцінки коефіцієнта впливу необхідно враховувати всі ці фактори, що дозволить підвищити точність визначення коефіцієнта та, в свою чергу, покращити прийняття рішень щодо перемикання відгалуження

трансформатора районної підстанції. Це сприятиме більш стабільному та ефективному регулюванню напруги в електричній мережі.

1.3. Вибір математичного апарату, придатного для вирішення задачі автоматизації процесу керування режимом напруги в РЕМ

Існує велика кількість методів синтезу, які можна використовувати для реалізації систем автоматичного керування (САК), де основою є закони керування (1.3) та (1.6). До таких методів можна віднести метод стандартних коефіцієнтів або стандартних передаточних функцій, метод кореневого годографу, метод розширених частотних характеристик та інші. Враховуючи, що закони керування будуть реалізовані з використанням мікропроцесорної техніки, системи автоматичного керування повинні бути дискретними. Детальні структурні схеми та математичні моделі таких САК розглядаються в третьому розділі цієї роботи. Це дозволяє врахувати можливості мікропроцесорних систем, забезпечуючи надійність і ефективність в обробці керувальних сигналів.

Однією з більш складних задач є розробка математичної моделі для визначення вагового коефіцієнта K_j , що є основою блоку прийняття рішень. Як було зазначено раніше, на величину цього коефіцієнта впливає безліч факторів. З нашої точки зору, найбільш важливими серед них є потужність трансформатора, його рівень завантаження та стратегічне значення в мережі. Через складний і часто нелінійний характер взаємозв'язку між цими факторами і значенням коефіцієнта K_j , створення традиційної математичної моделі, яка б точно відображала цей зв'язок, є надзвичайно складним завданням. Тому найбільш доцільним підходом для вирішення цієї проблеми є використання математичних методів нечіткої логіки, що дозволяють врахувати різноманітні фактори та їхню взаємодію. Це дає змогу створити

більш гнучку та адаптивну модель, яка зможе точно оцінювати необхідний ваговий коефіцієнт в реальних умовах експлуатації.

Застосування нечіткої логіки дозволяє ефективно описати не лише визначені, але й невизначені чи нечіткі дані, що є особливо важливим при обробці реальних операційних параметрів трансформаторів. Врахування нечітких критеріїв дає можливість створити більш адаптовані алгоритми для прийняття рішень, що в кінцевому підсумку підвищує точність регулювання і надійність роботи системи автоматичного керування. Розглянемо основні теоретичні принципи, на яких базується цей математичний апарат.

1.4. Алгоритм роботи блоку визначення вагового коефіцієнту підстанції нижнього рівня.

Як було зазначено в попередньому параграфі, визначення коефіцієнта впливу K_j для j -го трансформатора кінцевої підстанції в контексті закону керування (1.6) є досить складним завданням. На цей коефіцієнт впливає велика кількість різноманітних факторів, що ускладнює точність його розрахунку. Тому виникає потреба у врахуванні цих факторів для точнішого визначення коефіцієнта, що, у свою чергу, дозволить покращити процес прийняття рішень стосовно перемикання відгалужень трансформатора на районній підстанції.

Метою цього підрозділу є розробка математичної моделі, яка дозволить ефективно визначати ваговий коефіцієнт впливу трансформатора кінцевої підстанції в рамках дворівневої системи регулювання напруги. Для цього ми повинні врахувати фактори, які найбільше впливають на точність розрахунку коефіцієнта, такі як потужність трансформатора, його рівень завантаження та стратегічне значення в мережі. Це дозволить побудувати модель, яка буде адаптована до конкретних умов роботи трансформатора в різних режимах навантаження.

Припустимо, що основними параметрами, що впливають на точність визначення коефіцієнта впливу трансформатора кінцевої підстанції, є потужність трансформатора, його завантаження та важливість. Всі ці фактори мають різну вагу в контексті загальної роботи системи, тому їх слід враховувати в процесі розрахунку. Враховуючи складність взаємозв'язків між цими параметрами, найбільш доцільним підходом для побудови моделі є застосування методів нечіткої логіки. Цей підхід дозволяє ефективно опрацьовувати нечіткі та неповні дані, що часто зустрічаються у реальних умовах роботи системи.

На першому етапі побудови моделі потрібно визначити можливий діапазон значень контрольованих параметрів, таких як потужність трансформатора, його завантаження і важливість для мережі. Для цього необхідно провести аналіз цих параметрів, щоб розуміти їх можливі варіації та вплив на визначення вагового коефіцієнта. Вихідним показником цієї моделі стане значення вагового коефіцієнта K_j , яке буде використовуватись для прийняття рішень про необхідність перемикання відгалужень трансформаторів на підстанціях.

З урахуванням вищезазначених зауважень, для побудови математичної моделі визначення вагового коефіцієнта впливу трансформатора кінцевої підстанції необхідно ввести ряд вхідних параметрів, кожен з яких має бути оцінений з використанням лінгвістичних змінних. Це дозволить точно моделювати реальні умови та враховувати всі фактори, що впливають на розрахунок коефіцієнта.

Вхідні параметри моделі можуть включати, наприклад, потужність трансформатора, рівень його завантаження, стратегічну важливість в мережі, а також інші характеристики, які впливають на точність регулювання та ефективність роботи системи. Для кожного з цих параметрів буде визначена лінгвістична оцінка, що дозволить виразити їх значення в термінах нечіткої логіки.

Таблиця 1.1 містить перелік усіх вхідних параметрів та їх відповідні лінгвістичні оцінки, які будуть використані в подальших розрахунках. Кожна лінгвістична оцінка відображатиме конкретне значення параметра в межах допустимого діапазону та сприятиме більш точному і гнучкому визначенню вагового коефіцієнта K_j . Цей підхід дозволяє адаптувати модель до різних варіантів роботи мережі, що важливо для досягнення стабільного і ефективного регулювання напруги.

Таблиця 1.1 - Вхідні та вихідні параметри моделі

№ з/п	Параметр	Назва	Межі зміни	Терми
<i>Вхідні параметри моделі</i>				
1	Snom	Потужність Тр-ра	0- 2500 кВА	L - низька, М - середня, Н - висока
2	Kz	Коефіцієнт завантаження тр-ра	0-1	VL - дуже низький, L - низький, М - середній, Н - високий, VN - дуже високий
3	IMP	Важливість	0-1	L - низька, М - середня, Н - висока
<i>Вихідний параметр моделі</i>				
1	Kj	Ваговий коефіцієнт впливу	0-K _p	VN - дуже високий, Н - високий, МН - вище середнього, М - середній LM - нижче середнього, L - низький, VL -дуже низький

Задача визначення коефіцієнта K_j полягає в тому, щоб для кожного можливого сполучення значень вхідних параметрів, таких як потужність трансформатора, рівень завантаження та важливість, знайти відповідне значення коефіцієнта впливу. Це дозволяє адаптувати регулювання напруги для кожної конкретної ситуації в мережі.

Для цього необхідно встановити верхню границю діапазону значень вагового коефіцієнта впливу. Верхня границя визначається з урахуванням того, що коефіцієнт повинен відображати максимальний можливий вплив трансформатора в мережі. Вираз для визначення цієї верхньої границі може виглядати наступним чином:

$$K_p = \frac{1}{n_t} \quad (1.8)$$

де n_t – число трансформаторів підстанцій (кінцевих).

Структурна схема нечіткого блоку визначення вагового коефіцієнта K_j відображає процес обробки вхідних параметрів (таких як потужність трансформатора, рівень завантаження і важливість) за допомогою нечіткої логіки для визначення відповідного коефіцієнта впливу. Така схема зазвичай складається з кількох основних етапів, кожен з яких відповідає за певну функцію в обробці та трансформації даних:

1. Вхідні параметри – на цей етап подаються значення параметрів трансформатора: потужність, завантаження, важливість і інші фактори, які впливають на ваговий коефіцієнт.

2. Нечітке подання – вхідні значення переводяться в нечітку форму за допомогою лінгвістичних змінних. Наприклад, параметри можуть бути оцінені як "низький", "середній", "високий" тощо, що дозволяє зменшити вплив невизначеності даних.

3. Нечітке керування (фазу апроксимації) – здійснюється обчислення нечітких правил, які визначають взаємозв'язки між вхідними параметрами. Тут відбувається інтеграція і обробка лінгвістичних оцінок для визначення відповідного значення коефіцієнта.

4. Дефазифікація – на цьому етапі результат нечіткого керування перетворюється на чітке значення коефіцієнта впливу K_j . Це значення потім

використовується для подальших розрахунків або прийняття рішень в системі.

5. Вихід – результат обробки, яким є визначення коефіцієнта K_j , що використовується для адаптації регулювання напруги на трансформаторі кінцевої підстанції.

На рис. 1.3 представлена відповідна структурна схема, яка чітко показує всі етапи обробки вхідних даних і визначення вагового коефіцієнта. Цей блок дозволяє динамічно адаптувати регулювання в залежності від змінних умов експлуатації трансформатора.

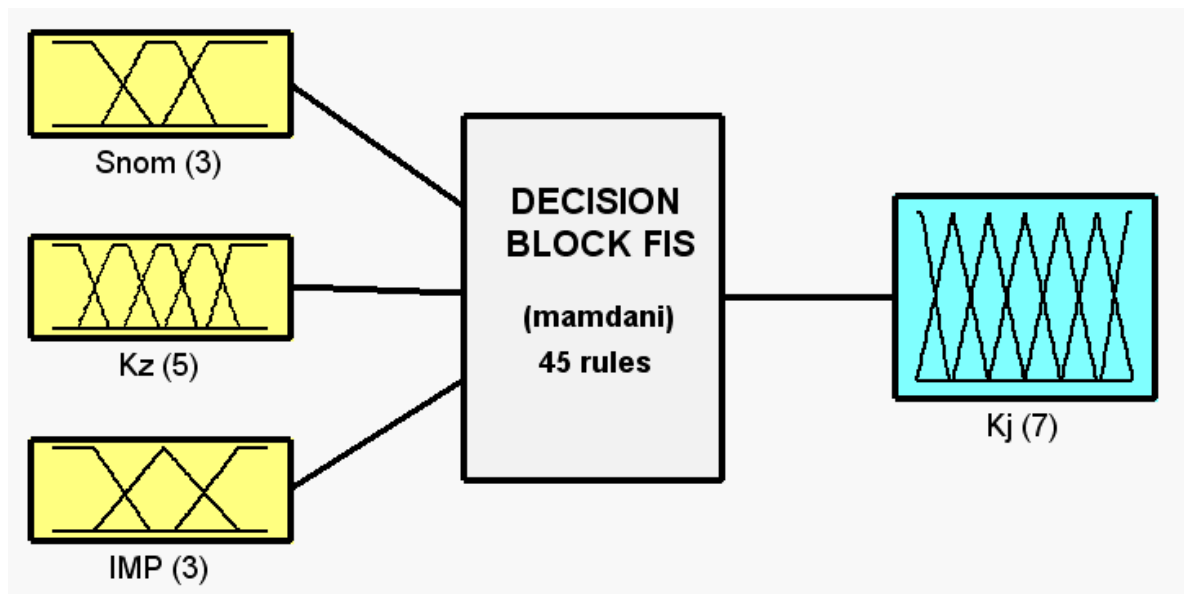


Рисунок 1.3 - Структурна схема нечіткого блоку обчислення вагового коефіцієнту K_j

Для вирішення поставленої в роботі задачі керування в якості нечіткого алгоритму був обраний алгоритм Мамдані. Такий вибір обумовлено тим, що даний алгоритм є найбільш простим для програмування, а також володіє простотою і наочністю всіх його складових.

При розробці нечіткої моделі блоку прийняття рішення було використано функції приналежності чотирьох видів: трикутні, трапецієподібні, S- і Z- подібні. Дані функції описуються наступними формулами:

S-подібна функція приналежності описується за допомогою логарифмічної функції або сигмоїдальної кривої:

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + e^{-k(x-c)}}$$

де k — коефіцієнт нахилу, а c — точка, в якій функція перетворюється з низької до високої приналежності.

Z-подібна функція приналежності має форму, що є оберненою до S-подібної:

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + e^{k(x-c)}}$$

де параметри аналогічні до тих, що використовуються в S-подібній функції.

Трикутна функція приналежності описується наступною формулою:

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

де a , b , і c — це параметри, які визначають межі трикутника

Трапецієподібна функція приналежності має таку форму:

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

де a, b, c , і d — параметри трапецієподібної функції

Ці функції приналежності забезпечують гнучкість у моделюванні нечітких систем і дозволяють точно врахувати всі фактори, що впливають на прийняття рішення щодо вагового коефіцієнта впливу K_j . За допомогою таких функцій можна коректно обчислювати та коригувати параметри системи в процесі її роботи.

Графічне відображення функцій приналежності, а також їх числові характеристики наведено на рис. 1.4 – 1.7.

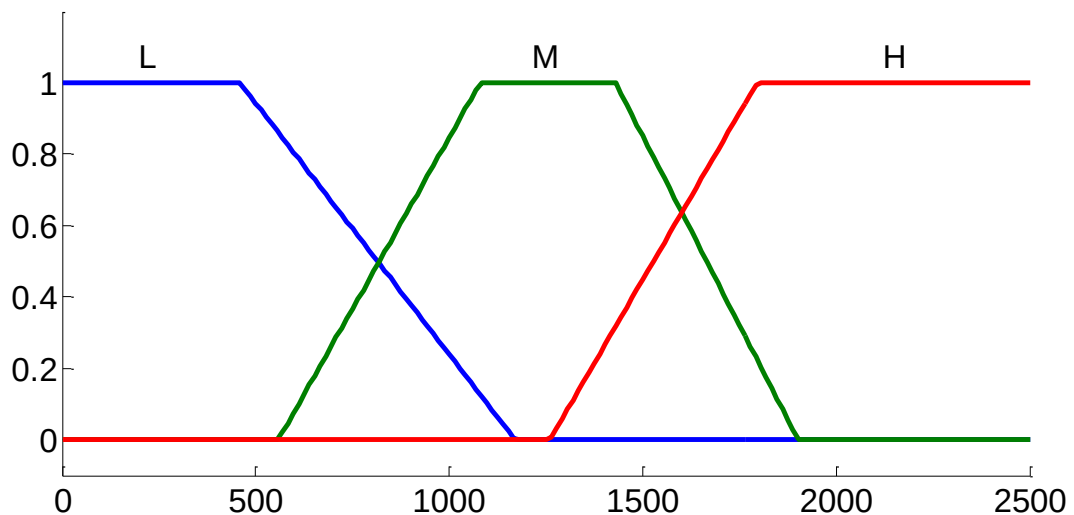


Рисунок 1.4 - Графік нечітких значень «Snom»

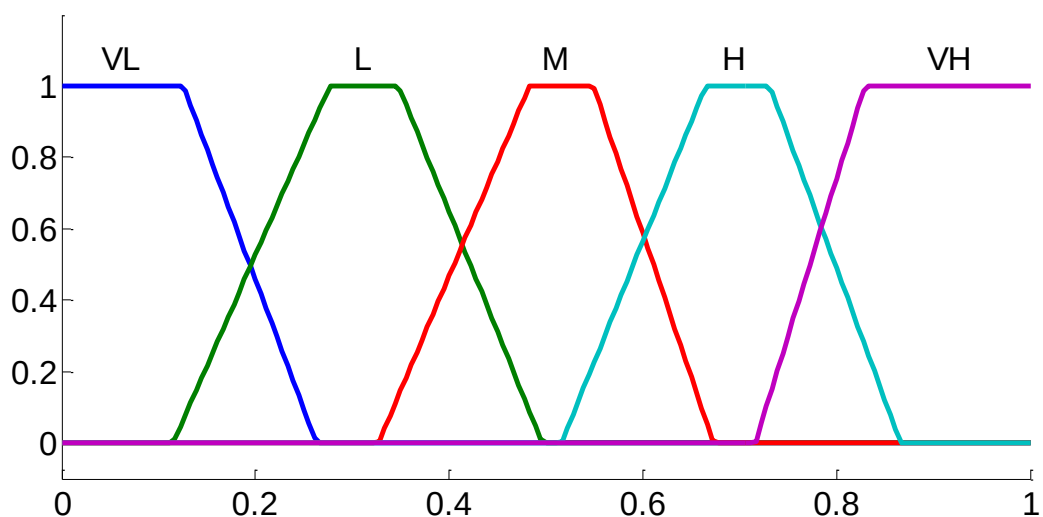


Рисунок 1.5 - Графік нечітких значень «Kz»

Відображає лінійне збільшення приналежності до максимального значення, після якого вона залишається сталою, а потім знову зменшується.

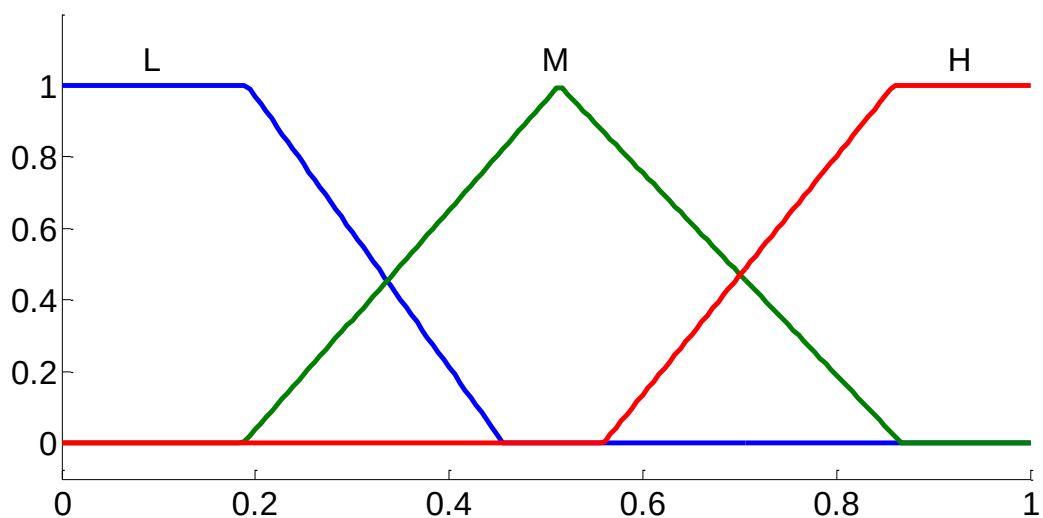


Рисунок 1.6 - Графік нечітких значень «IMP»

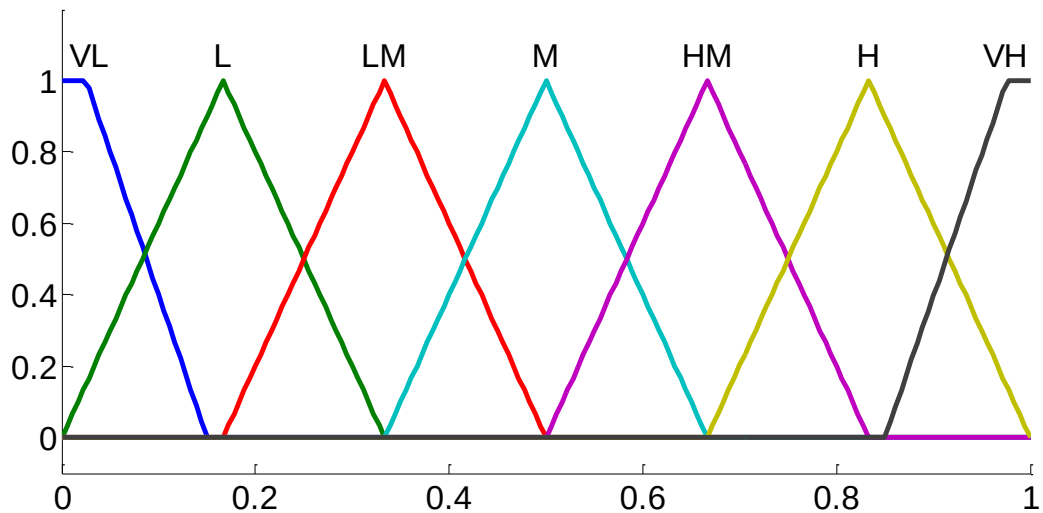


Рисунок 1.7 - Графік нечітких значень «ІМР»

Графічні залежності у вигляді тривимірних поверхонь відгуку є важливим інструментом для наочного уявлення, як вихідний параметр системи змінюється в залежності від кількох вхідних змінних одночасно. Такі поверхні дозволяють візуалізувати складні взаємозв'язки між параметрами і допомагають краще зрозуміти поведінку системи в різних умовах.

На рис. 1. 8 – 1.10 представлені тривимірні поверхні, що відображають залежність вихідного параметра від двох або більше вхідних змінних. Це дозволяє ефективно проаналізувати, як варіюються результати при зміні значень вхідних параметрів та зрозуміти, як система реагує на зміни в умовах її роботи.

1. Рис. 1.8 – тривимірна поверхня відгуку для першої комбінації вхідних параметрів. Поверхня може показувати, як вихід змінюється, коли один з параметрів збільшується або зменшується при фіксованих значеннях інших параметрів.

2. Рис. 1.9 – тривимірна поверхня для другого набору вхідних змінних. Цей графік дає уявлення про те, як зміна двох параметрів одночасно впливає на результат. Важливою характеристикою таких поверхонь є їхня

форма та нахил, що визначає чутливість системи до змін у кожному параметрі.

3. Рис. 1.10 – тривимірна поверхня, яка дозволяє візуалізувати взаємодію між трьома або більше параметрами. Це може допомогти в розумінні більш складних впливів, таких як комбіновані зміни кількох факторів одночасно, що дає змогу більш точно налаштовувати систему.

Ці графічні залежності є корисними для подальшої оптимізації алгоритмів управління, адже вони дозволяють виявити, які зміни в параметрах мають найбільший вплив на вихідну величину та у яких діапазонах зміни система працює найбільш ефективно.

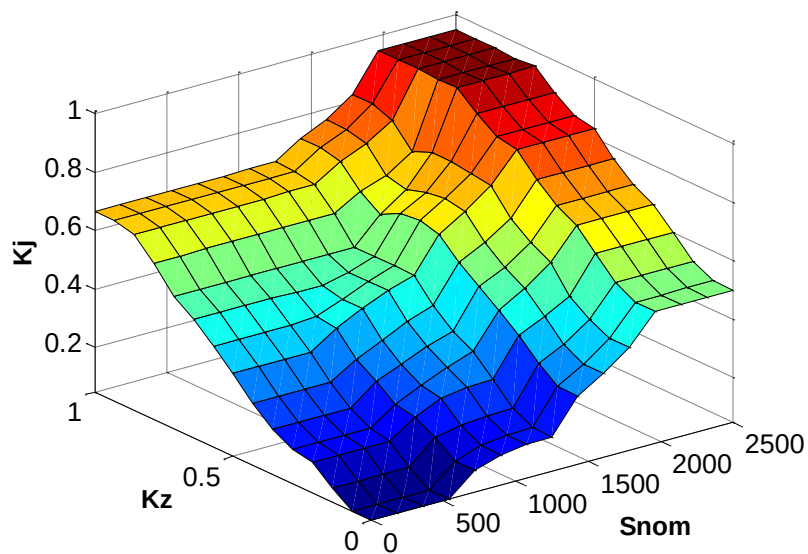


Рисунок 1.8 - Графік тривимірної поверхні $K_j = f(S_{nom}, K_z)$

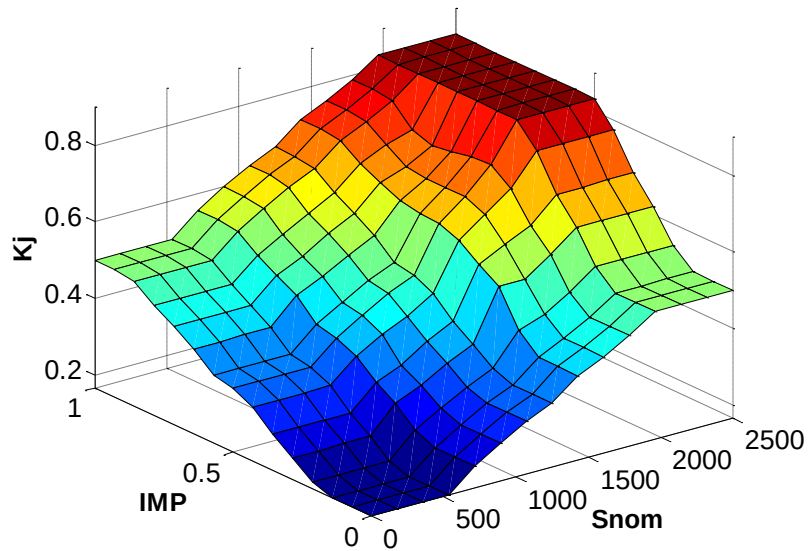


Рисунок 1.9 - Графік тривимірної поверхні $K_j = f(Snom, IMP)$

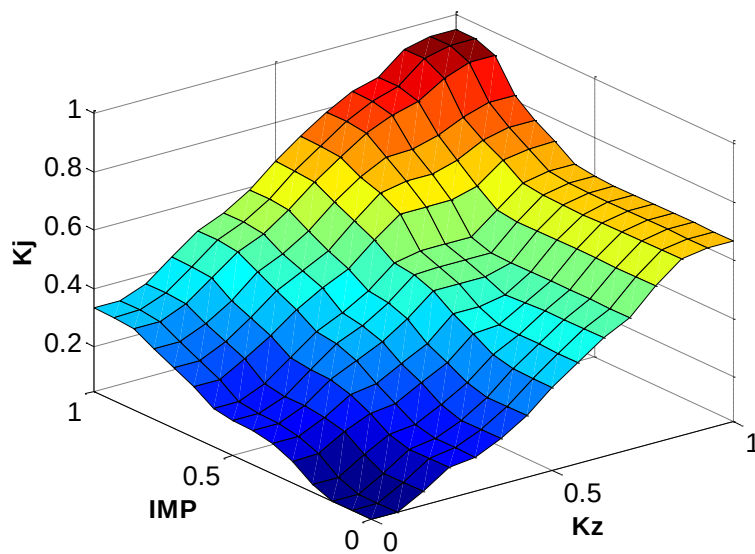


Рисунок 1.10 - Графік тривимірної поверхні $K_j = f(Kz, IMP)$

Як показують графіки на рис. 1.8 – 1.10, тривимірні поверхні мають плавний характер зміни вихідної величини, що свідчить про відсутність різких коливань значень виходу при незначних змінах будь-якої з вхідних величин. Така плавність змін вказує на низьку чутливість вихідного параметру, що є важливою перевагою, оскільки це забезпечує стабільність

роботи системи автоматичного керування (САК). Низька чутливість вихідного параметру блоку визначення вагового коефіцієнта K_j дозволяє зменшити ризик різких коливань у системі, що позитивно впливає на загальну стійкість САК, роблячи його більш надійним і передбачуваним.

Результати моделювання підтверджують, що для перетворення нечітких значень коефіцієнта K_j у чіткі значення (процес дефазифікації) найбільш підходящим є використання методу визначення центру ваги (центроїдний метод). Цей метод є досить ефективним, оскільки дозволяє отримати більш точні та стабільні результати, гарантуючи, що дефазифікація нечітких значень буде здійснена коректно та без втрати інформації.

Для подальшої перевірки ефективності розробленої САК і для оцінки її впливу на режими напруги в електричній мережі (РЕМ), а також для оцінки практичної застосовності моделі, доцільно провести комп'ютерне імітаційне моделювання. Імітаційне моделювання дозволить точно оцінити, як нова система керування працює в реальних умовах, надаючи можливість протестувати різні сценарії без необхідності вживати дорогі чи часозатратні експериментальні методи. Такі моделі дозволяють швидко і ефективно виявляти недоліки системи та оптимізувати її параметри до досягнення бажаних результатів.

В результаті проведеного аналізу існуючих САК режимами напруги РЕМ було встановлено, що для зменшення кількості перемикачів механічного пристрою РПН трансформатора районної підстанції найдоцільніше обладнати трансформатори з ПБВ на кінцевих підстанціях регуляторами напруги з тиристорними пристроями РПН та об'єднати дані регулятори з регулятором напруги на районній підстанції в єдину дворівневу систему регулювання, яка дає дозвіл на перемикач пристрою РПН лише тоді, коли певна кількість регуляторів кінцевих підстанцій вичерпали свій діапазон регулювання.

Запропоновано закон регулювання напруги трансформатора верхнього рівня, згідно якого перемикання не проводяться, доки визначена пороговим коефіцієнтом кількість регуляторів нижнього рівня забезпечує підтримання напруги на споживачах в заданих межах, чим досягається зменшення кількості перемикань механічного пристрою РПН підстанції верхнього рівня.

В результаті проведеного дослідження з вибору математичного апарату, найбільш придатного для вирішення поставленої в роботі задачі автоматичного керування, встановлено, що для визначення вагового коефіцієнту підстанції нижнього рівня найдоцільніше застосувати математичний апарат нечіткої логіки. Даний математичний апарат дозволяє створення математичних моделей, які з достатньою точністю описують взаємозв'язки між вхідними та вихідними параметрами без чіткого уявлення про внутрішню структуру (фізичну суть) таких взаємозв'язків.

На основі математичного апарату нечіткої логіки було розроблено математичну модель та алгоритм роботи блоку визначення вагового коефіцієнту підстанції нижнього рівня. При цьому в якості алгоритму нечіткого виводу найдоцільніше застосувати алгоритм Мамдані. Такий вибір обумовлено тим, що даний алгоритм є найбільш простим для програмування, а також володіє простотою і наочністю всіх його складових.

2 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДВОРІВНЕВОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ

Для оцінки працездатності розробленої системи автоматичного керування для режимів напруги розподільчих електричних мереж, а також для визначення ефективності її впровадження, самим кращим рішенням є використання комп'ютерного імітаційного моделювання. Такий підхід забезпечує точність розрахунків і дозволяє ефективно аналізувати результати.

Спочатку необхідно розробити математичну модель дворівневої системи автоматичного регулювання напруги в електромережах. На основі цієї моделі потрібно створити комп'ютерні імітаційні аналоги, які включають підстанції верхнього і нижчого рівнів, а також блок для визначення вагового коефіцієнта K_j . Після цього розроблені імітаційні моделі використовують для аналізу ефективності роботи системи в різних режимах напруги.

2.1. Математична модель дворівневої системи автоматичного регулювання напруги в РЕМ.

Дослідження системи автоматичного регулювання значно спрощується, якщо для опису головних процесів, що відбуваються в системі, використовувати диференційні рівняння. Це дозволяє створити математичну модель, яка точно б відображала фізичну суть явищ і водночас залишалася простою у використанні. У деяких випадках зручніше замінити диференційні рівняння передаточними функціями. Вони формуються шляхом перетворення рівнянь методом Лапласа, завдяки чому функціональна схема, яка відображає реальні енергопроцеси, трансформується в структурну схему, де кожна ланка зображена своєю передаточною функцією.

Під час розробки математичної моделі системи автоматичного регулювання враховуються лише ті елементи схеми, які безпосередньо беруть участь у перетворенні вхідного сигналу на вихідний сигнал. Такий підхід дозволяє уникнути зайвих ускладнень і зосередитися на ключових процесах, що впливають на роботу електросистеми.

На рис. 2.1 представлено принципову схему розподільчої електричної мережі, яка була використана як приклад для оцінки ефективності розробленої системи автоматичного регулювання режимів напруги. Ця схема дозволяє проаналізувати взаємозв'язки між елементами системи та визначити, наскільки ефективно система виконує свої функції.

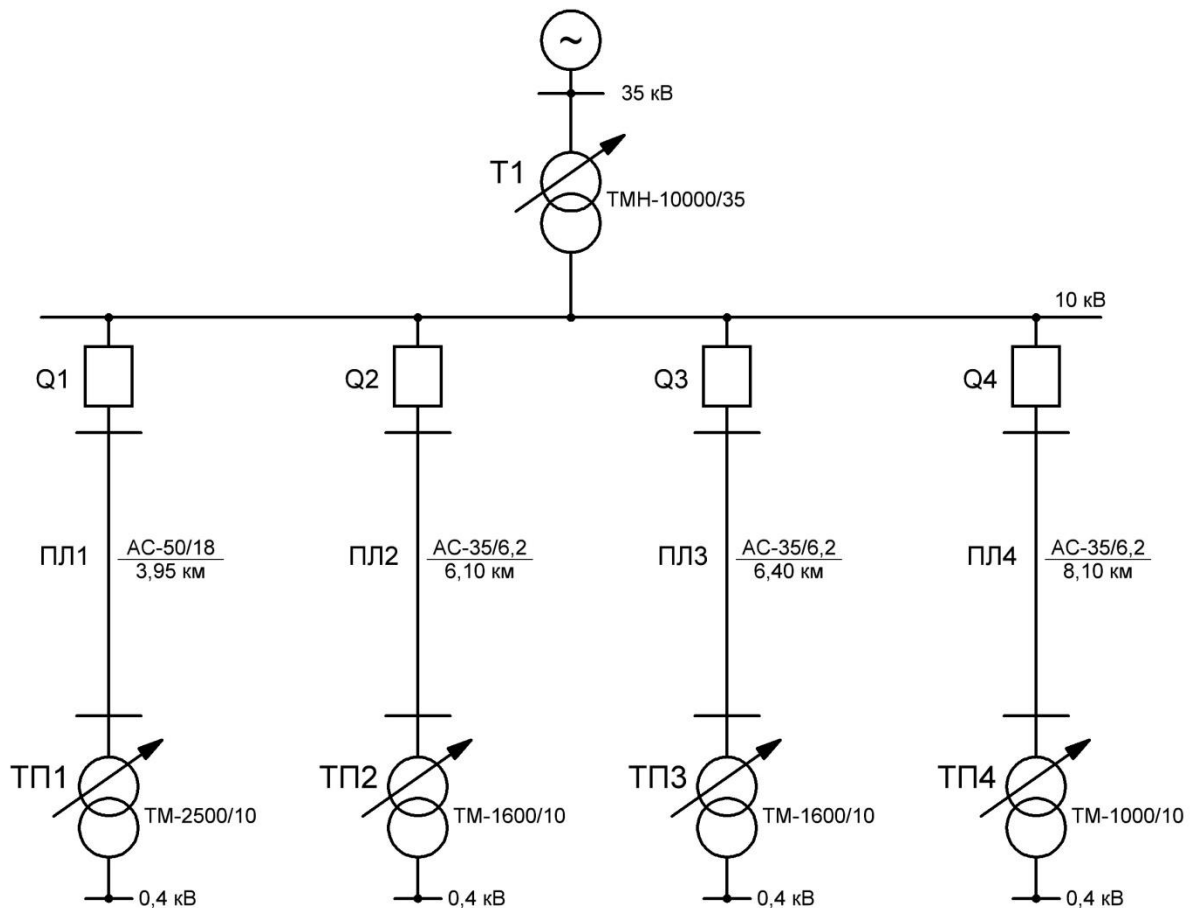


Рисунок 2.1 - Принципова схема РЕМ

Як видно з рис. 2.1, розподільна електрична мережа складається з районної підстанції, обладнаної трансформатором ТМН-10000/35, що має механічний пристрій регулювання під навантаженням (РПН), та чотирьох відхідних повітряних ліній, кожна з яких оснащена трансформаторами типу ТМ-1000/10, ТМ-1600/10 і ТМ-2500/10. Ці трансформатори укомплектовані безконтактними пристроями регулювання під навантаженням, що забезпечує більш точне та безперервне регулювання напруги.

Для побудови математичної моделі системи автоматичного регулювання напруги силового трансформатора використовуватимемо її функціональну схему, зображену на рис. 2.2. Ця схема дає змогу формалізувати основні процеси регулювання, враховуючи взаємодію компонентів системи та характеристики обладнання. Вона стане основою для подальшого аналізу й моделювання роботи системи в різних режимах експлуатації.

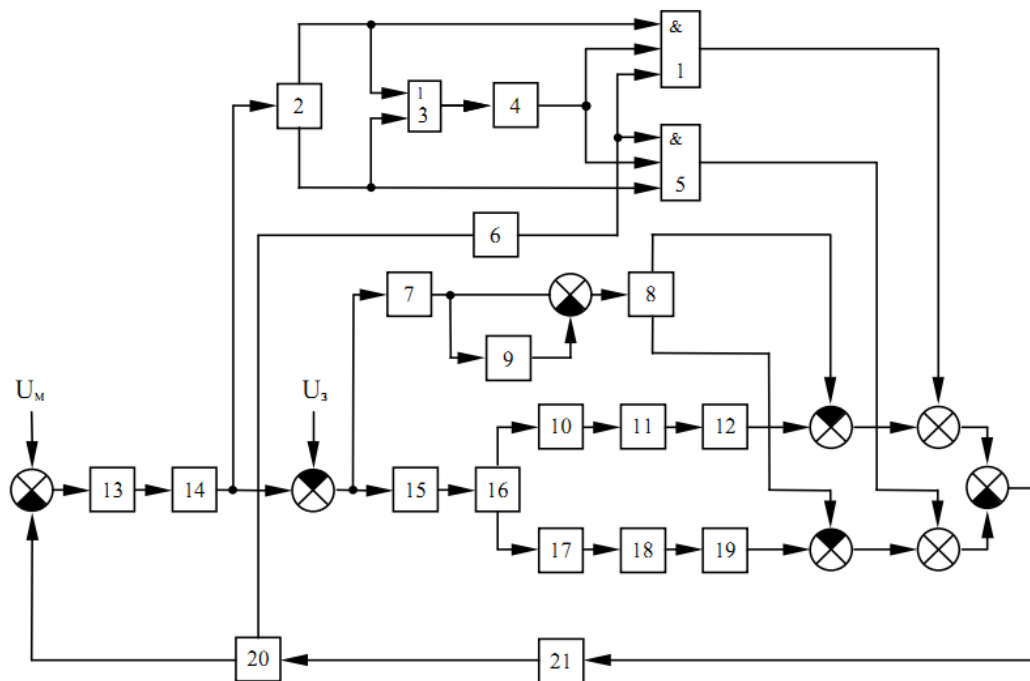


Рисунок 2.2 - Функціональна схема системи автоматичного регулювання напруги силового трансформатора

На рис. 2.2 показано склад функціональної схеми системи автоматичного регулювання напруги, де кожен елемент має своє функціональне призначення:

1 і 5 — логічні елементи "І", які виконують операцію логічного множення сигналів;

2 і 15 — порогові блоки, що реагують на перевищення певного порогу вхідного сигналу;

3 — логічний елемент "АБО", який забезпечує проходження сигналу при наявності хоча б одного вхідного сигналу;

4, 6, 9, 12, 19 — блоки часової затримки, які затримують передачу сигналу на заданий інтервал часу τ ;

7, 10, 17 — імпульсні елементи, що генерують імпульси певної форми;

8 і 16 — блоки вибору, які визначають пріоритетний сигнал серед вхідних;

11 і 18 — перетворювачі імпульсного сигналу в потенційний;

13 — електрична мережа;

14 — вимірювальний трансформатор напруги, який контролює параметри напруги;

20 — перемикаючий пристрій;

21 — електропривод, що здійснює механічну дію.

Для аналізу функціонування системи записуються передаточні функції кожного блоку.

Блоки часової затримки (4, 6, 9, 12, 19) виконують відтворення вхідного сигналу на виході через визначений проміжок часу τ без зміни його форми і амплітуди. Такі елементи описуються передаточною функцією виду:

$$X_{\text{вих}}(t) = X_{\text{вх}}(t - \tau), \quad (2.1)$$

при цьому $t > \tau$.

Передаточна функція блоку часової затримки має вигляд:

$$W(p) = e^{-p\tau}, \quad (2.2)$$

де τ – час затримки;

p - комплексна змінна у просторі Лапласа

Передаточна функція привода, враховуючи його час перемикавання контактів у межах від 3 до 12 секунд залежно від типу, може бути описана як аперіодична ланка першого порядку. Вона має вигляд:

$$W(p) = e^{-pT_d}, \quad (2.3)$$

де T_d – постійна часу електропривода, яка характеризує швидкість його реакції і знаходиться в межах, що відповідають часу перемикавання (3–12 с).

Пристрій регулювання під навантаженням (РПН) характеризується суттєво нелінійною залежністю між вхідним і вихідним сигналами, що враховує специфіку процесів перемикавання обмоток трансформатора. Зазвичай для опису такого пристрою застосовують апроксимацію, яка відображає основні нелінійні властивості.

Залежність пристрою РПН може бути записана у вигляді:

$$u_{ст} = \begin{cases} u_0, & \text{якщо } x < 0, \\ -u_0, & \text{якщо } x > 0, \\ 0, & \text{якщо } x = 0, \end{cases} \quad (2.4)$$

де u_0 – напруга для ступеня перемикавання.

Елементи 7, 10, 17 виконують амплітудо-імпульсну модуляцію, і описуються передаточною функцією, що враховує процес формування вихідного імпульсного сигналу на основі амплітуди вхідного сигналу. Передаточна функція таких елементів має вигляд:

$$W_{ie}(p) = \frac{1 - e^{-p\tau}}{p}. \quad (2.5)$$

Порогові блоки 2 і 15, які відображають першу та другу зони нечутливості системи, описуються залежністю, що враховує діапазони нечутливості до змін вхідного сигналу. Ця залежність має вигляд:

$$y = \begin{cases} 0, & \text{якщо } -\Delta \leq u_{\text{в}} \leq \Delta, \\ k(u_{\text{в}} + \Delta), & \text{якщо } u_{\text{в}} < -\Delta, \\ k(u_{\text{в}} - \Delta), & \text{якщо } u_{\text{в}} > \Delta, \end{cases} \quad (2.6)$$

де Δ – значення зони нечутливості (поріг, нижче якого сигнал не передається);

k – тангенс кута нахилу характеристики порогового блоку (коефіцієнт посилення для сигналів, що виходять за межі зони нечутливості).

Опір електричної мережі з активно-реактивним характером навантаження спричиняє появу перехідних процесів при перемиканні відгалужень пристрою РПН. Для моделювання такої мережі використовують Г-подібну схему заміщення, що описує взаємодію активних та реактивних елементів мережі.

Передаюча функція електричної мережі в даній схемі зазвичай має вигляд ланки другого порядку, що відображає як активні, так і реактивні властивості електромережі. Передаюча функція для даної мережі може бути записана як:

$$W_{\text{ем}}(p) = \frac{1}{LCp^2 + RCp + 1}, \quad (2.7)$$

де: L — індуктивність лінії електропередачі, що визначає реактивний опір змінному струму;

C — ємність лінії електропередачі, що визначає здатність до накопичення енергії в електричному полі;

R — активний опір лінії, що визначає реальний енергетичний втрат в мережі

Відповідно співвідношенням значень опорів L , C і R мережі перехідні процеси можуть бути аперіодичні, так і коливальні.

Логічний елемент "І" (AND) є базовим елементом цифрової логіки, який дає на виході одиничний сигнал тільки тоді, коли всі його входи також рівні одиниці. В імітаційних моделях і системах автоматичного регулювання, де входи можуть бути представленням напруги або сигналів, можна розглядати передаточну функцію логічного елемента "І":

$$W_{\text{"І"}} = \begin{cases} y > 0, & \text{якщо } \begin{cases} x_1 > 0, \\ x_2 > 0, \\ x_3 > 0, \end{cases} \\ y \leq 0, & \text{якщо } x_1 \leq 0, \\ y \leq 0, & \text{якщо } x_2 \leq 0, \\ y \leq 0, & \text{якщо } x_3 \leq 0, \end{cases} \quad (2.8)$$

де x_1, x_2, x_3 – значення вхідних сигналів;

y – значення вихідного сигналу.

Логічний елемент "АБО" (OR) також є базовим елементом цифрової логіки, який дає на виході одиничний сигнал, якщо хоча б один з його входів дорівнює одиниці. В аналізі систем автоматичного регулювання та імітаційних моделях для лінійних систем передаточна функція логічного елемента "АБО" може бути представлена аналогічно логічному елементу "І", але з урахуванням принципу роботи цього елемента.

У дискретних системах для логічного елемента "АБО", якщо вхідні сигнали представлені як дискретні значення (0 або 1), то його передаточна функція може бути описана таким чином:

$$W_{\text{"АБО"}} = \begin{cases} y \leq 0, & \text{якщо } \begin{cases} x_1 \leq 0, \\ x_2 \leq 0, \end{cases} \\ y > 0, & \text{якщо } x_1 > 0, \\ y > 0, & \text{якщо } x_2 > 0, \end{cases} \quad (2.9)$$

Перетворювачі імпульсного сигналу 11 і 18 в потенційний сигнал являють собою інтегратори і їх передаточні функції зображуються у вигляді:

$$W_{\pi}(p) = \frac{1}{p} \quad (2.10)$$

Вимірювальний трансформатор напруги (ВТН) використовує перетворення напруги для забезпечення вимірювальних сигналів, що відповідають вхідній напрузі, але мають знижене значення для безпечного та точного вимірювання. Передаточну функцію вимірювального трансформатора напруги можна описати як статичну лінійну передаточну функцію, що виражає співвідношення між вхідною та вихідною напругою.

Передаточна функція ВТН, зазвичай, має вигляд:

$$W_{\text{ВТН}}(p) = \frac{k_T(T_1 p + 1)}{(T_2 p + 1)} \quad (2.11)$$

де k_T – коефіцієнт трансформації трансформатора,

T_1, T_2 – значення постійних часу вимірювального трансформатора.

Таким чином, отримані вирази передаточних функцій елементів системи автоматичного регулювання режимами напруги в РЕМ, що наведені у формулах (2.1) – (2.11), представляють собою математичну модель об'єкта керування напругою. Ця модель відображає взаємодію складових системи, включаючи трансформатори, електричні мережі, порогові та імпульсні елементи, а також інші компоненти, що мають вплив на процес регулювання.

Завдяки таким математичним виразам можна створити комп'ютерні імітаційні моделі, які дозволяють детально вивчити режими системи в різних умовах. Імітаційне моделювання дає змогу оцінити ефективність роботи САК при різних варіантах налаштувань та характеристиках системи, а також передбачити її реакцію на зміни вхідних параметрів, як напруга чи навантаження. Це є важливим етапом у розробці і оптимізації систем автоматичного регулювання напруги для забезпечення стабільної та ефективної роботи електричних мереж.

2.2. Комп'ютерна імітаційна модель дворівневої системи автоматичного регулювання напруги в РЕМ.

Як було зазначено раніше, основними компонентами комп'ютерної імітаційної моделі дворівневої системи регулювання напруги в РЕМ є моделі підстанцій вищого та нижчого рівнів, а також модель блоку визначення вагового коефіцієнту K_j . Для розробки кожної із цих моделей у середовищі Matlab/Simulink важливо точно описати роботу системи, що регулюється, з урахуванням її фізичних характеристик і взаємодії із іншими елементами.

На рис. 2.3 зображена узагальнена комп'ютерна імітаційна модель дворівневої системи автоматичного регулювання напруги в РЕМ. У моделі представлені основні складові, зокрема:

- Т1 — модель силового трансформатора підстанції вищого рівня (ТМН-10000/35). Ця модель враховує перетворення напруги в мережі високої напруги (35 кВ) на мережу середньої напруги (10 кВ), що є основним етапом для забезпечення стабільного регулювання напруги в мережі.

- ТП1 — ТП4 — моделі трансформаторних підстанцій нижчого рівня, які знижують напругу з 10 кВ до 0,4 кВ для живлення споживачів. Ці моделі дозволяють точно імітувати процес регулювання напруги в межах конкретних підстанцій, що знаходяться в різних частинах мережі.

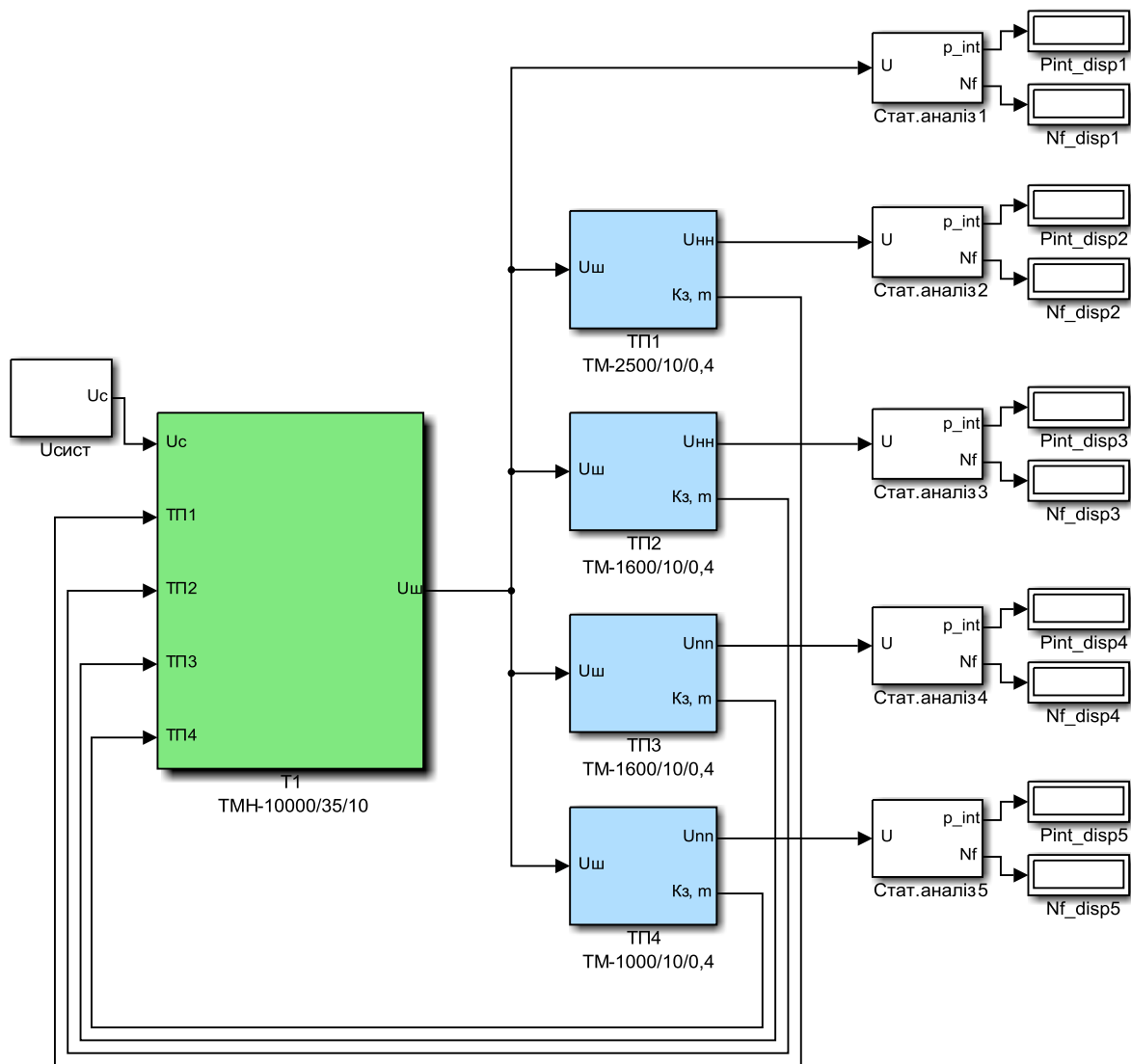


Рисунок 2.3 - Узагальнена комп'ютерна імітаційна модель автоматичного регулювання напруги в РЕМ з застосуванням дворівневої системи

- Усист — модель живлячої мережі, яка забезпечує енергопостачання системи та взаємодіє з іншими елементами, такими як трансформатори та пристрої РПН, забезпечуючи стійкість системи до коливань напруги.
- Стат. аналіз1 — Стат. аналіз5 — блоки для розрахунку статистичних показників ПЯЕ (показників якості електричної енергії), які аналізують відхилення напруги від нормативних значень, забезпечуючи перевірку стабільності та надійності регулювання в різних умовах роботи системи.

- Pint_disp1 — Pint_disp5 — блоки відображення значень інтегральної ймовірності потрапляння усталеного відхилення напруги в нормально допустимі межі відповідно до ГОСТ 13109-97. Ці блоки показують, наскільки система здатна підтримувати напругу в межах допустимих значень на протязі тривалого часу.

- Nf_disp1 — Nf_disp5 — блоки для відображення кількості випадків, коли значення усталеного відхилення напруги не потрапляє в нормально допустимі межі, що дає змогу оцінити ефективність роботи системи у реальних умовах.

Розробка комп'ютерної моделі в середовищі Matlab/Simulink дозволяє наочно проаналізувати динаміку роботи системи, здійснити настройку параметрів та оцінити вплив різних факторів на стабільність і ефективність регулювання напруги в РЕМ.

На рис. 2.4 зображена комп'ютерна імітаційна модель підстанції вищого рівня з трансформатором ТМН-10000/35/10, що реалізована в блоці Т1 (див. рис. 2.3). Ця модель є важливою складовою частиною дворівневої системи автоматичного регулювання напруги в РЕМ, оскільки вона змодельовує процес перетворення високої напруги (35 кВ) на середню напругу (10 кВ), що є необхідним для живлення наступних рівнів трансформаторних підстанцій.

Модель трансформатора ТМН-10000/35/10 враховує всі необхідні фізичні характеристики і параметри, зокрема:

1. Вхідну та вихідну напругу — враховується змінний характер напруги на вході та на виході трансформатора, а також перетворення цих значень з урахуванням характеристик трансформатора.

2. Реактивні та активні компоненти — параметри трансформатора, що відповідають за реактивну та активну потужність, які впливають на ефективність перетворення.

3. Регулювання напруги — передбачається можливість регулювання вихідної напруги за допомогою пристрою РПН (регулятора віддачі напруги), що забезпечує підтримку стабільного рівня напруги в мережі.

Імітаційна модель підстанції вищого рівня також включає всі необхідні елементи для взаємодії з іншими частинами системи, зокрема з підстанціями нижчого рівня та мережею живлення, забезпечуючи точне відображення динаміки роботи системи в різних умовах. Моделювання таких складових є важливим етапом для оцінки ефективності регулювання напруги в реальних умовах експлуатації РЕМ.

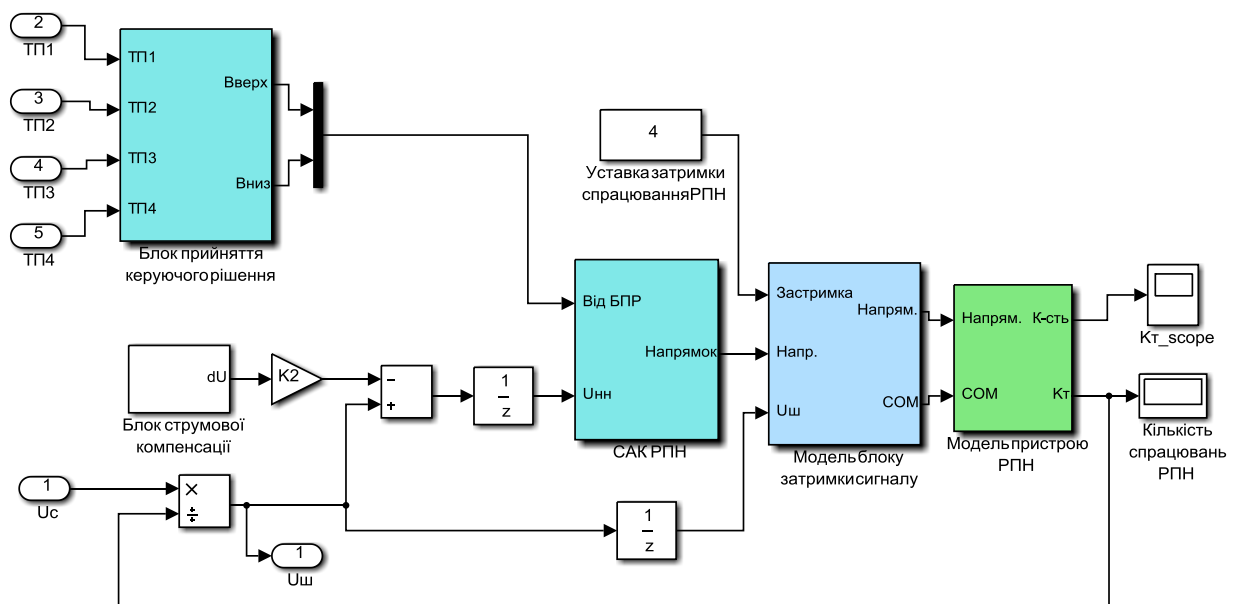


Рисунок 2.4 - Комп'ютерна імітаційна модель підстанції вищого рівня з трансформатором ТМН-10000/35/10

Основними елементами комп'ютерної моделі підстанції вищого рівня є кілька ключових блоків, які взаємодіють для реалізації автоматичного регулювання напруги. Зокрема:

– «САК РПН» — цей блок реалізує закон автоматичного регулювання підстанції вищого рівня (відповідно до рівняння (2.5)). Він забезпечує

безперервне відстеження та коригування напруги в мережі, застосовуючи алгоритми, які адаптуються до змін навантаження або інших зовнішніх факторів.

- «Модель блоку затримки сигналу» — цей блок моделює затримку сигналу, що виникає при спрацьовуванні механічного пристрою РПН. Затримка сигналу визначається за допомогою рівняння (2.5), яке описує час, необхідний для переходу від одного режиму роботи до іншого після спрацьовування регулятора.

- «Модель пристрою РПН» — цей блок відображає механічний пристрій РПН силового трансформатора. Він моделює фізичну поведінку пристрою РПН, включаючи характеристики його перемикання, часу реакції та взаємодії з іншими компонентами системи.

- «Блок прийняття керуючого рішення» — це модель блоку, який розраховує значення вагових коефіцієнтів K_j для кожної з підстанцій. Кожен коефіцієнт визначає важливість або вплив конкретної підстанції на загальну систему. Після цього ці значення порівнюються з пороговим коефіцієнтом K_p , і, в залежності від результату, приймається рішення про необхідність спрацювання механічного пристрою РПН. Це дає можливість коригувати напругу в системі в разі потреби.

На рис. 2.5 зображена комп'ютерна модель САК механічного РПН, яка включає зазначені блоки, що взаємодіють між собою для забезпечення стабільного регулювання напруги в мережі. Така модель дозволяє точно відобразити динаміку роботи механічного пристрою РПН і всіх складових системи автоматичного регулювання.

Ця модель реалізує закон керування (2.5) підстанції вищого рівня, що визначає алгоритм регулювання напруги в електромережі. Однак важливо звернути увагу на те, що величина огинаючої графіка діючих значень напруги, яка використовується в цій моделі, розраховується за допомогою стандартного блоку "Discrete Derivative".

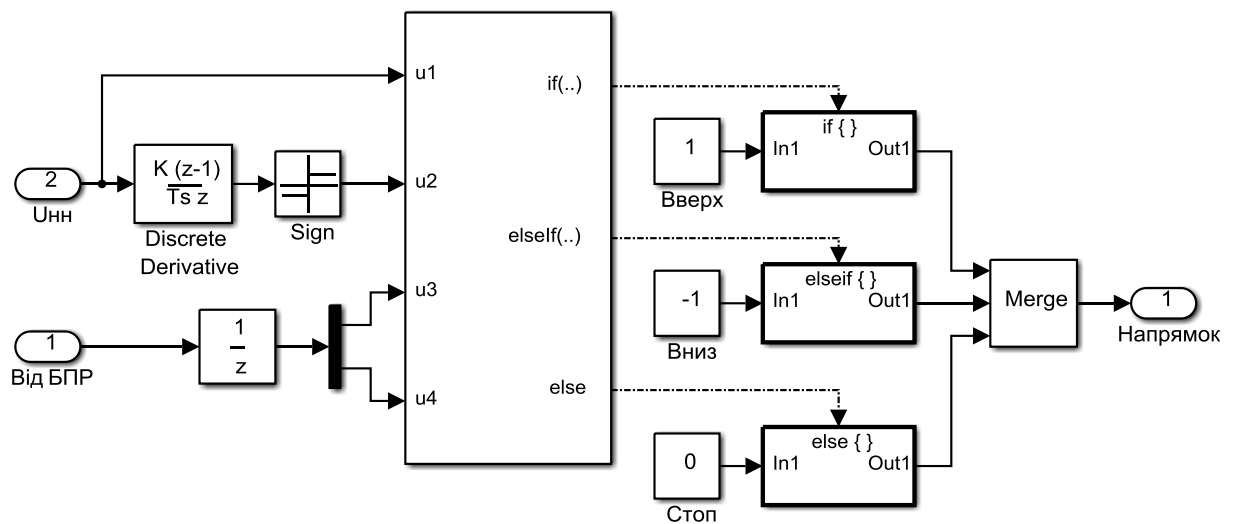


Рисунок 2.5 - Комп'ютерна модель системи керування механічного РПН

Блок "Discrete Derivative" дозволяє здійснювати диференціювання сигналу в дискретному часі, що являється важливим для аналізу змін напруги в реальному часі. Оскільки напруга може коливатися, цей блок обчислює швидкість зміни напруги (її похідну), що дозволяє оцінити, наскільки скоро система реагує на зміни входних параметрів. Це важливо для ефективного регулювання, оскільки швидкість зміни напруги впливає на прийняття рішення про необхідність коригування режиму роботи трансформаторів та пристроїв РПН.

Завдяки використанню даного блоку можна точно визначити, коли напруга в мережі виходить за допустимий діапазон, що дає змогу своєчасно здійснювати корекцію і забезпечувати стабільність роботи системи в умовах різних навантажень і змін зовнішніх умов.

На рис. 2.6 зображена модель блоку затримки сигналу спрацювання механічного пристрою РПН. Цей блок відображає часову затримку, яка виникає при перемиканні механічного пристрою РПН. Затримка сигналу є важливою частиною в системі регулювання, оскільки механічні компоненти пристрою мають певний час відгуку, протягом якого сигнал не змінюється, навіть якщо до нього вже надійшло керуюче значення.

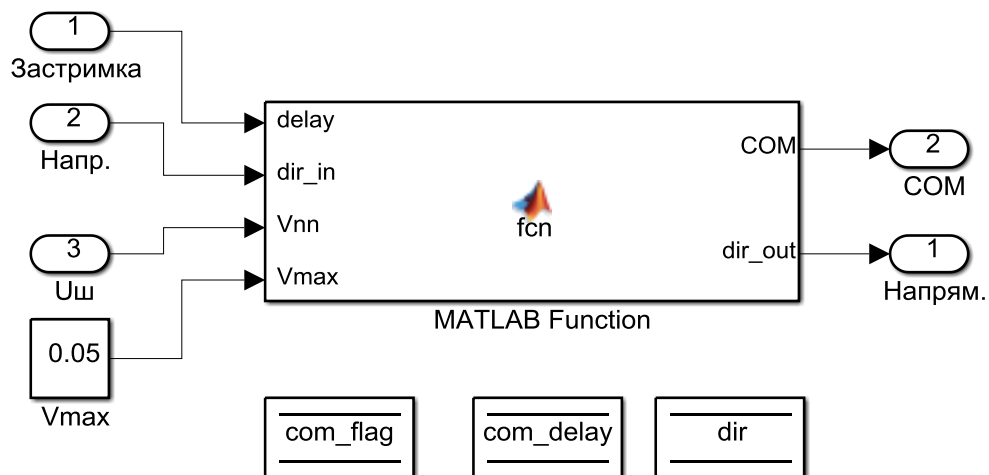


Рисунок 2.6 - Модель блоку затримки сигналу спрацювання механічного пристрою РПН

Алгоритм роботи блоку затримки сигналу спрацювання механічного пристрою РПН реалізовано програмно за допомогою мови програмування MATLAB і стандартного блоку "Matlab Function". Цей блок дає можливість реалізувати складні алгоритми обробки сигналів, а саме модель затримки сигналу механічного пристрою РПН, яка враховує час відгуку механічного елемента.

На рис. 2.7 представлена комп'ютерна імітаційна модель механічного пристрою РПН. Ця модель є важливою частиною системи, оскільки вона відображає фізичну роботу пристрою РПН, який відповідає за перемикання трансформаторних обмоток в залежності від змін напруги в мережі. Модель враховує не тільки сам механізм перемикавання, але й параметри, пов'язані з його часом реагування, зносом його компонентів, а також з інерційними властивостями, які можуть впливати на точність та швидкість регулювання напруги в системі.

Використання цієї моделі в імітаційних симуляціях дозволяє точно відображати процеси, що відбуваються в реальному механічному пристрої РПН, та дає можливість аналізувати ефективність і стабільність системи автоматичного регулювання в різних сценаріях роботи.

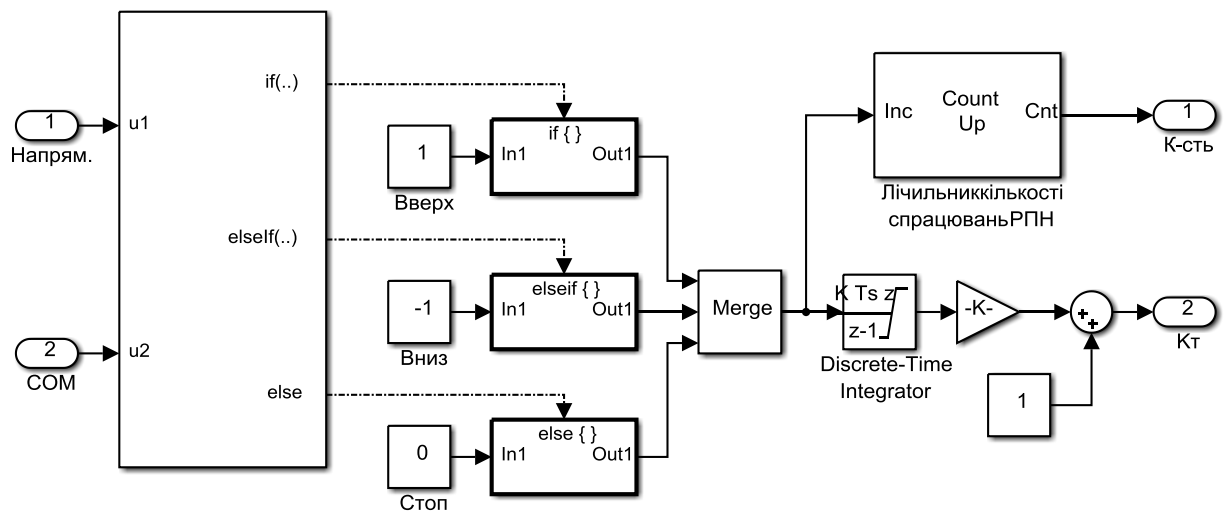


Рисунок 2.7 - Комп'ютерна імітаційна модель механічного пристрою РПН

Вхідними сигналами блоку механічного пристрою РПН є два ключових параметри:

- «Напрям.» — цей сигнал визначає напрямок перемикання пристрою РПН. Він надходить від системи автоматичного керування і вказує, в якому напрямку повинна бути виконана зміна обмоток трансформатора (наприклад, підвищення чи пониження напруги).
- «СОМ» — це сигнал дозволу на перемикання, який надходить від блоку затримки пристрою РПН. Він підтверджує, що система готова виконати перемикання вказаному напрямку, враховуючи часову затримку та інші умови для коректного перемикання.

Вихідним сигналом блоку моделі механічного пристрою РПН є значення коефіцієнту трансформації трансформатора. Цей коефіцієнт визначає, на скільки змінюється напруга після перемикання обмотки трансформатора. Зміна коефіцієнту трансформації важлива для коректного регулювання напруги в мережі та для забезпечення стабільності роботи всієї енергосистеми.

На рис. 2.8 представлена модель блоку прийняття керуючого рішення.

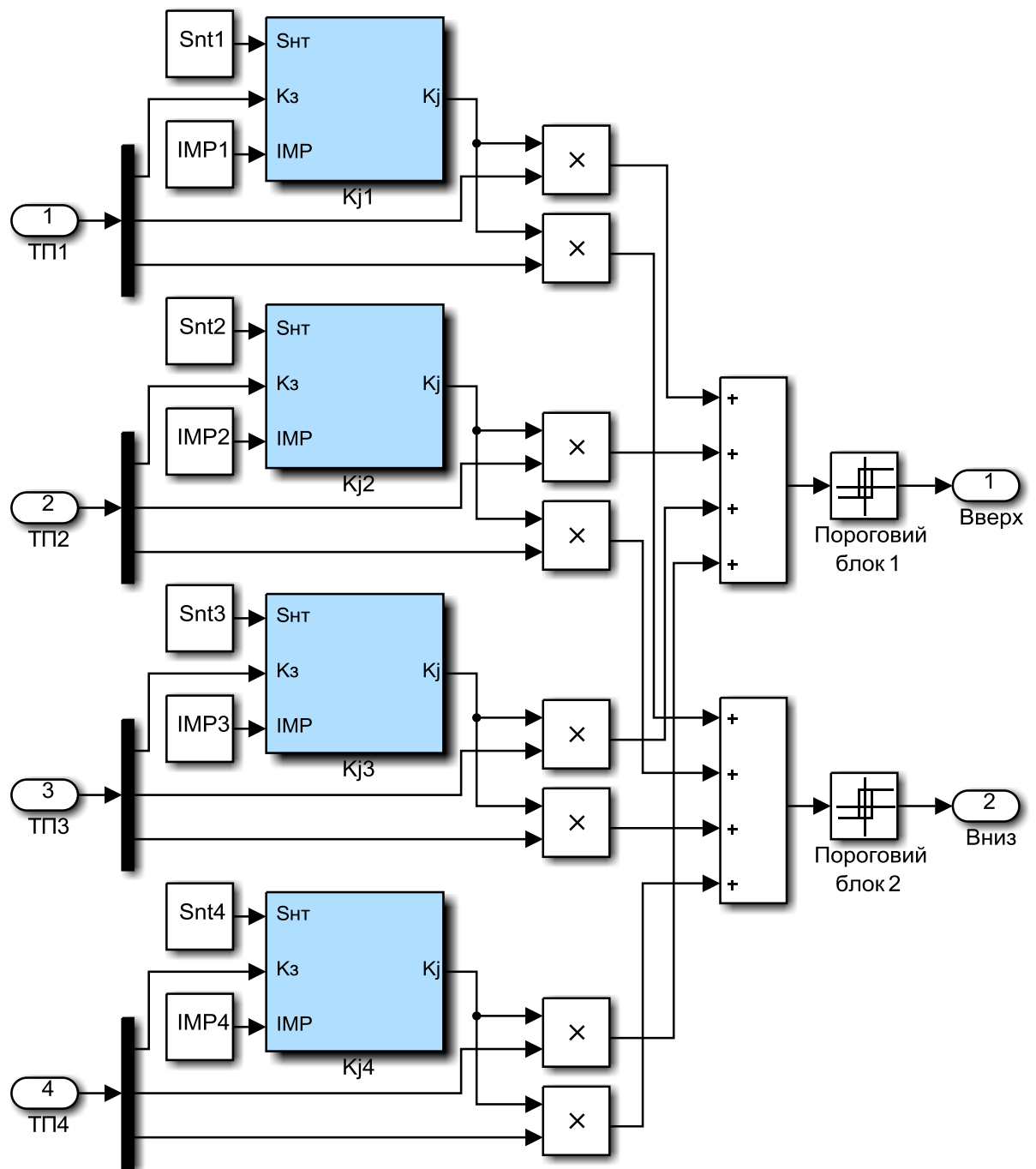


Рисунок 2.8 - Модель блока принятия керуючих рішень.

Цей блок є важливою частиною системи автоматичного регулювання, оскільки він здійснює розрахунок значень вагових коефіцієнтів K_j для кожної підстанції і приймає рішення на основі цих коефіцієнтів. В моделі блоку відбувається порівняння сум цих коефіцієнтів з пороговим значенням K_p .

Якщо сума перевищує порогове значення, то до блоку РПН надсилається сигнал для здійснення перемикання. Це рішення дозволяє регулювати режим роботи трансформатора та, відповідно, стабілізувати напругу в мережі.

Цей блок грає важливу роль в підтримці оптимальних умов роботи мережі, оскільки він забезпечує точне та своєчасне реагування на зміни в параметрах напруги, що є критичним для запобігання аварійним ситуаціям та підтримки стабільного енергопостачання.

Як видно з рис. 2.8, дана модель блоку прийняття керуючого рішення складається із чотирьох аналогічних каналів керування, в кожному з яких визначаються значення вагових коефіцієнтів K_j для кожної з підстанцій ТП1 – ТП4. У цих каналах виконується розрахунок вагових коефіцієнтів, які відображають важливість або пріоритет конкретної підстанції в плані регулювання напруги в мережі.

Після того, як значення вагових коефіцієнтів для кожної підстанції будуть знайдені, вони додаються в блоках суматорів. Ці результати порівнюються з пороговими значеннями коефіцієнта K_p — це дозволяє визначити, чи потрібно здійснити перемикання в системі і, в разі необхідності, які саме дії мають бути виконані.

Виходами даного блоку є логічні сигнали, які вказують на необхідність і напрям спрацювання механічного пристрою РПН. Відповідно до значень сумованих коефіцієнтів і порогового значення, система приймає рішення про активацію пристрою РПН для коригування напруги в електромережі. Ці сигнали можуть вказувати, чи потрібно підвищити чи знизити напругу, а також ініціювати відповідні коригуючі дії.

На рис. 2.9 зображена модель блоку визначення вагового коефіцієнту підстанції нижнього рівня. Цей блок відповідає за обчислення вагових коефіцієнтів для підстанцій нижчого рівня (наприклад, ТП1 – ТП4), що

дозволяє інтегрувати ці значення в загальну стратегію регулювання. Модель цього блоку дозволяє точно визначити, яким чином кожна підстанція повинна реагувати на зміни в параметрах мережі, виходячи з поточних умов і вимог до стабільності напруги.

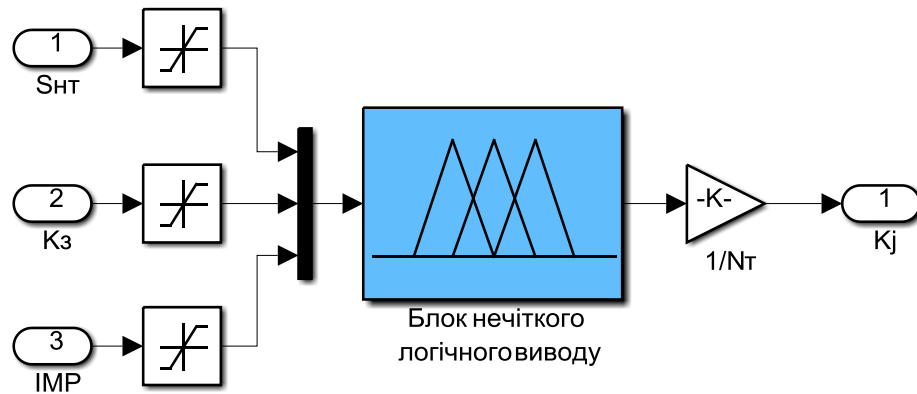


Рисунок 2.9 - Модель блоку визначення вагового коефіцієнту для підстанції нижнього рівня

Як видно з рис. 2.9, входними сигналами блоку визначення вагового коефіцієнту підстанції нижнього рівня є декілька важливих параметрів:

1. Номінальна потужність трансформатора — цей параметр характеризує здатність трансформатора передавати електричну потужність без особливих перевантажень.
2. Коефіцієнт завантаження — він вказує на рівень навантаження трансформатора, що є важливим в плані визначення його поточної роботи.
3. Коефіцієнт важливості — цей коефіцієнт враховує стратегічну роль кожної підстанції в загальній мережі, що дає змогу визначити вплив на стабільність роботи системи.

Ці входні сигнали надходять до блоку нечіткого логічного виводу через блоки обмеження. Блок нечіткого логічного виводу обробляє дані для подальшого прийняття рішень, що стосується вагових коефіцієнтів підстанції, що є важливим для регулювання напруги. Алгоритм роботи цього

блоку детально описаний у попередньому розділі, де розглядається, як на основі нечіткої логіки обчислюються оптимальні значення для кожної підстанції в електросистемі.

На рис. 2.10 представлена модель підстанції нижнього рівня з силовими трансформаторами номінальною напругою 10/0,4 кВ, оснащеними безконтактними пристроями РПН. Ця модель відображає фізичну структуру підстанції нижчого рівня, де трансформатори з безконтактними пристроями РПН проводять регулювання напруги для підтримки стабільності в мережі. Ці трансформатори виконують важливу роль у забезпеченні точності регулювання та підтримки належного рівня напруги у всій електричній мережі.

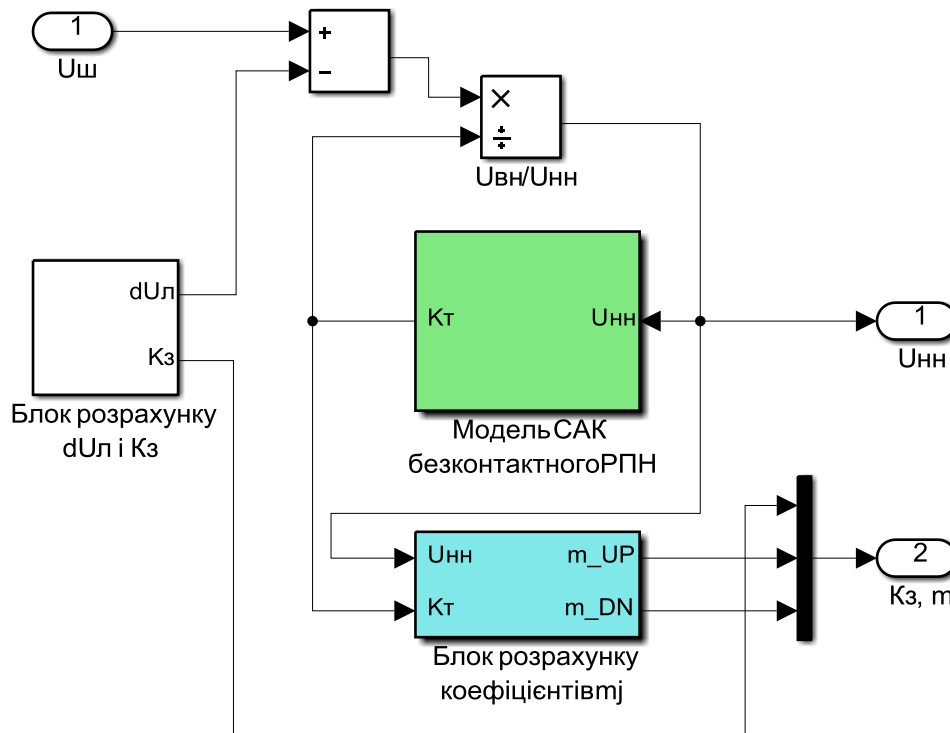


Рисунок 2.10 - Модель підстанції нижнього рівня з трансформаторами 10/0,4 кВ

Як видно з рис. 2.10, основними елементами моделі підстанції нижнього рівня є декілька важливих блоків, які забезпечують належну роботу системи автоматичного регулювання напруги. Ось їх короткий опис:

– «Модель САК безконтактного РПН» — це блок, який реалізує закон автоматичного керування підстанцією нижнього рівня (відповідно до рівняння (2.3)). Цей блок відповідає за автоматичне регулювання напруги в межах підстанції, використовуючи принципи керування безконтактним регулюванням підвищення або зниження напруги.

– «Блок розрахунку коефіцієнтів m_j » — цей блок займається обчисленням коефіцієнтів m_j , які визначаються відповідно до виразів (2.7). Ці коефіцієнти мають важливе значення для коректної роботи системи регулювання, тому що вони враховують характеристики підстанції та її вплив на загальну стабільність системи.

– «Блок розрахунку ΔU_L та K_z » — цей блок моделює розрахунок спаду напруги в лінії ΔU_L та коефіцієнта завантаження трансформатора K_z підстанції нижнього рівня. Він враховує зміну напруги, яка виникає через навантаження та інші фактори, а також проводить обчислення коефіцієнта завантаження для кращої оптимізації роботи трансформатора. Цей блок також виконує функцію струмової компенсації, що дозволяє змінювати роботу трансформаторів з урахуванням змінних навантажень і параметрів мережі.

Внутрішню структуру кожного з цих блоків показано на рис. 2.11 – рис. 2.12. Ці схеми детально показують, як елементи взаємодіють один з одним і як здійснюється передача сигналів та обчислення в межах моделі, що дозволяє реалізувати точне регулювання напруги на підстанціях нижчого рівня.

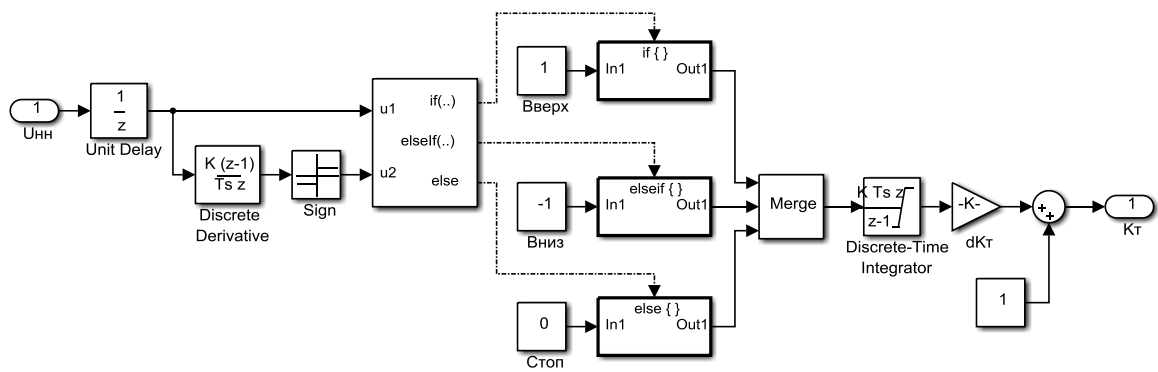


Рисунок 2.11 - Модель блоку системи керування безконтактного пристрою РПН

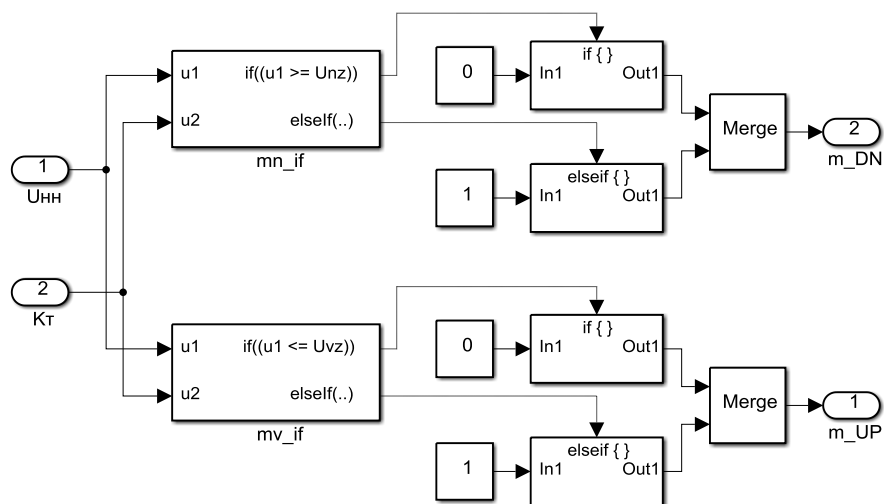


Рисунок 2.12 - Модель блоку визначення коефіцієнтів m_j

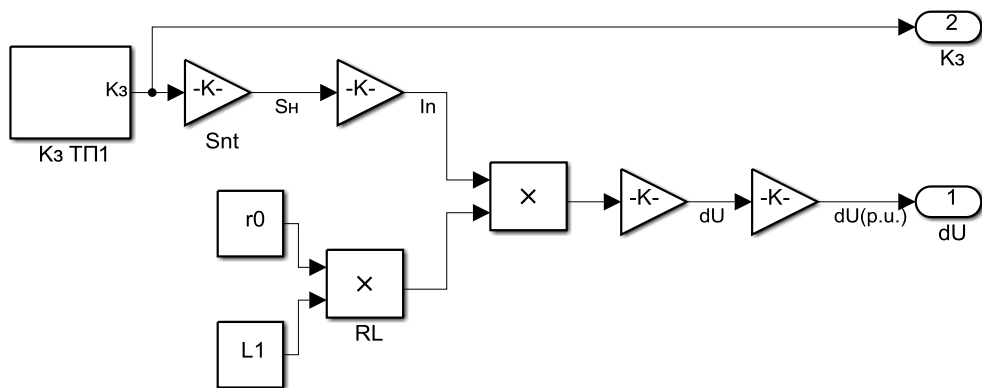


Рисунок 2.13 - Блок розрахунку $\Delta U_{\text{л}}$ і K_3

Модель блоку визначення статистичних показників сталого відхилення трифазної напруги $V, \%$ представлена на рис. 2.14.

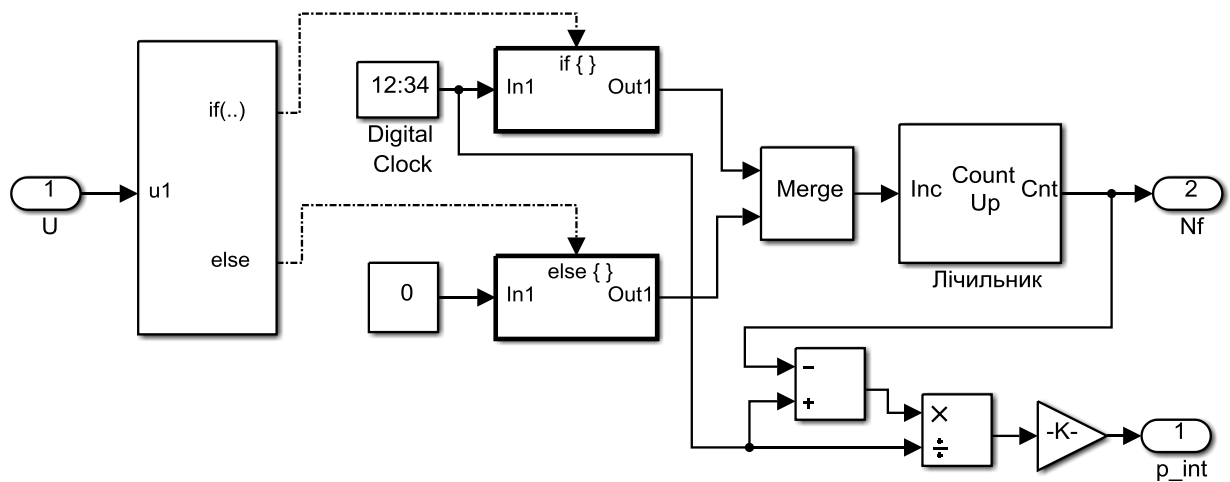


Рисунок 2.14 - Модель блоку визначення статистичних показників сталого відхилення трифазної напруги $V, \%$

2.3. Ефект застосування розробленої системи керування режимами напруги в РЕМ за допомогою ком'ютерного моделювання.

Для проведення аналізу ефекту від застосування розробленої САК режимами напруги РЕМ доцільно було використати метод комп'ютерного імітаційного моделювання. Це дозволило в реальному часі спостерігати поведінку системи, вивчаючи реакцію на різні умови та параметри, що є важливим для оцінки ефективності запропонованої моделі.

У якості базової моделі для порівняння була обрана стандартна САК режимами напруги РЕМ, яка складається з незалежних регуляторів для пристроїв РПН на підстанціях вищого та нижчого рівня. Ця модель має на меті стабілізацію напруги, але не включає додаткові блоки для адаптивного керування, як у розробленій системі.

Узагальнена структурна схема базової САК, що використовується для порівняння, представлена на рис. 2.15. Ця схема має основні елементи,

потрібні для забезпечення регулювання напруги, але без інтегрованої системи аналізу та корекції вагових коефіцієнтів або прийняття складних керуючих рішень, що є показовим для розробленої САК.

Структурна схема моделі регулятора підстанції вищого рівня для випадку базової САК представлена на рис. 2.16. Тут відображено, як здійснюється контроль і коригування напруги на підстанціях вищого рівня без використання складних елементів прийняття рішень.

Основною відмінністю базової САК від розробленої є відсутність блоку прийняття керуючого рішення та блоку визначення коефіцієнтів m_j , які являються важливими для забезпечення більш точного і адаптивного регулювання. Ці додаткові елементи в розробленій системі дозволяють враховувати більше факторів, які впливають на напругу, та оптимізувати процес регулювання, забезпечуючи більш ефективну роботу електромережі.

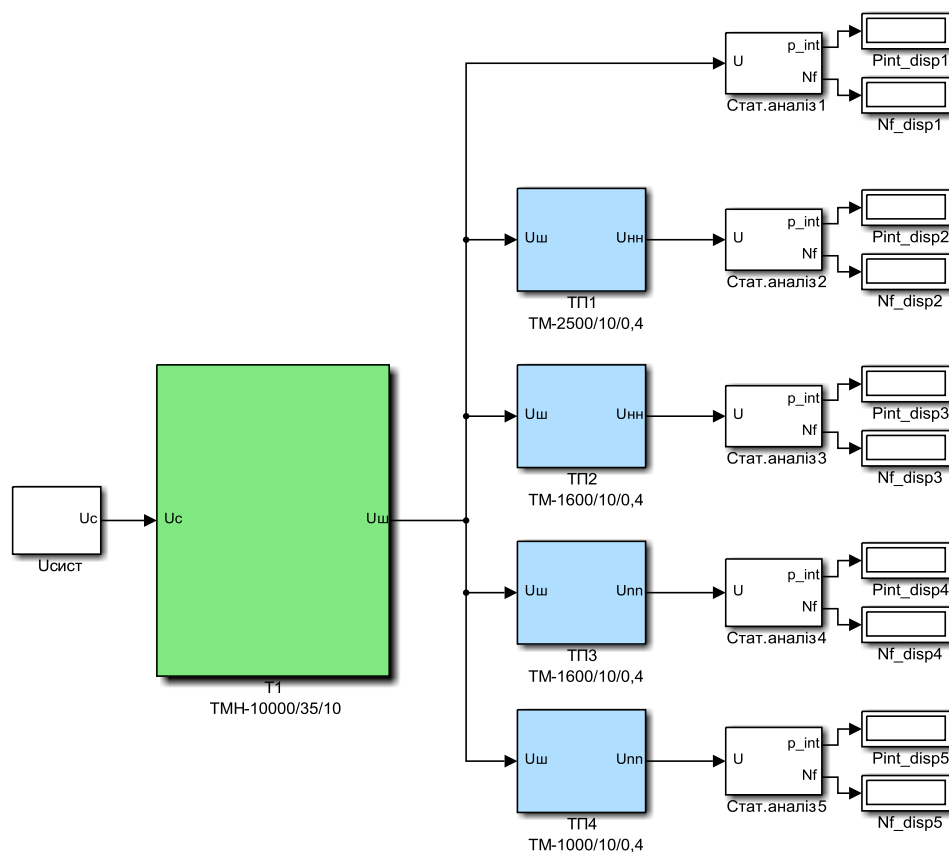
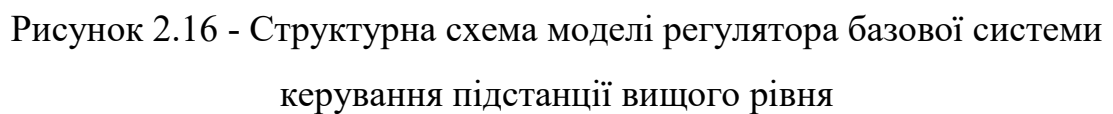


Рисунок 2.15 - Узагальнена структурна схема моделі базової системи керування



Таблиця 2.1. Початкові дані до моделювання

№ ТП	Потужність тр-ра, $S_{\text{НОМ}}$, кВА	Тип ПЛ	Довжина лінії, км	Коефіцієнт ваги, IMP
ТП1	2500,0	АС-50/18	3,96	0,9
ТП2	1600,0	АС-35/6,2	6,11	0,8
ТП3	1600,0	АС-35/6,2	6,41	0,7
ТП4	1000,0	АС-35/6,2	8,12	0,3

58

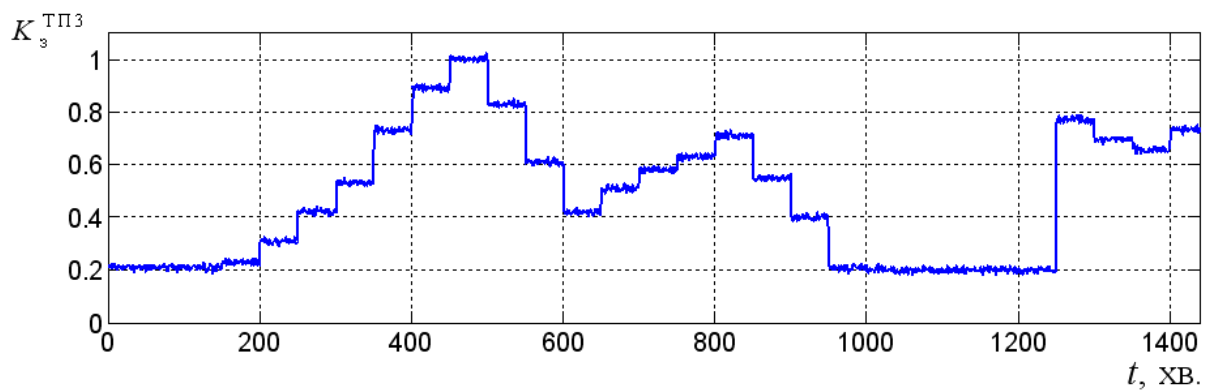


Рисунок 2.17 - Графік коефіцієнта завантаження трансформатора для підстанції ТП2.

На рисунках 2.18–2.25 та в таблиці 2.2 представлені результати комп'ютерного моделювання режимів роботи РЕМ для розробленої та базової систем автоматичного керування (САК).

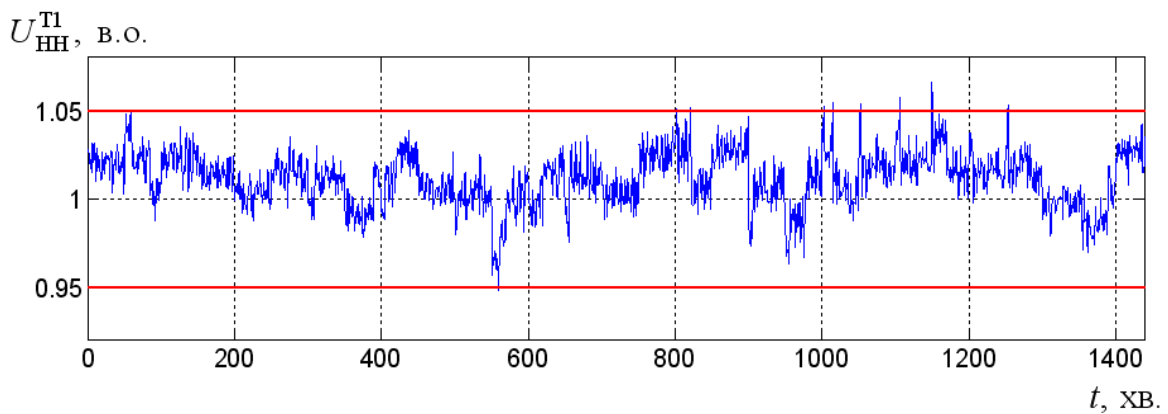


Рисунок 2.18 - Графік напруги на низькій стороні трансформатора ТМН-10000/35 для базової системи керування

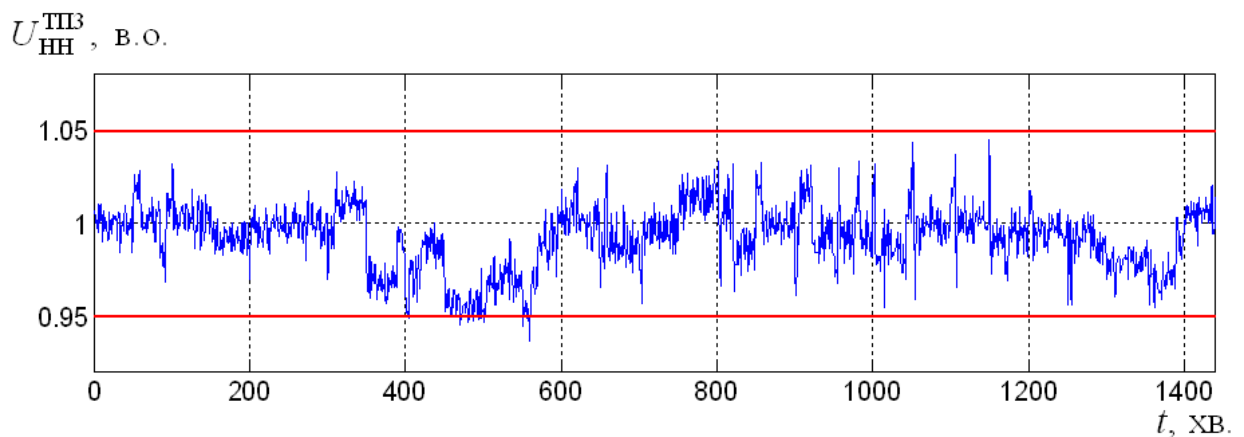


Рисунок 2.19 - Графік напруги на низькій стороні трансформатора ТПЗ для базової системи керування

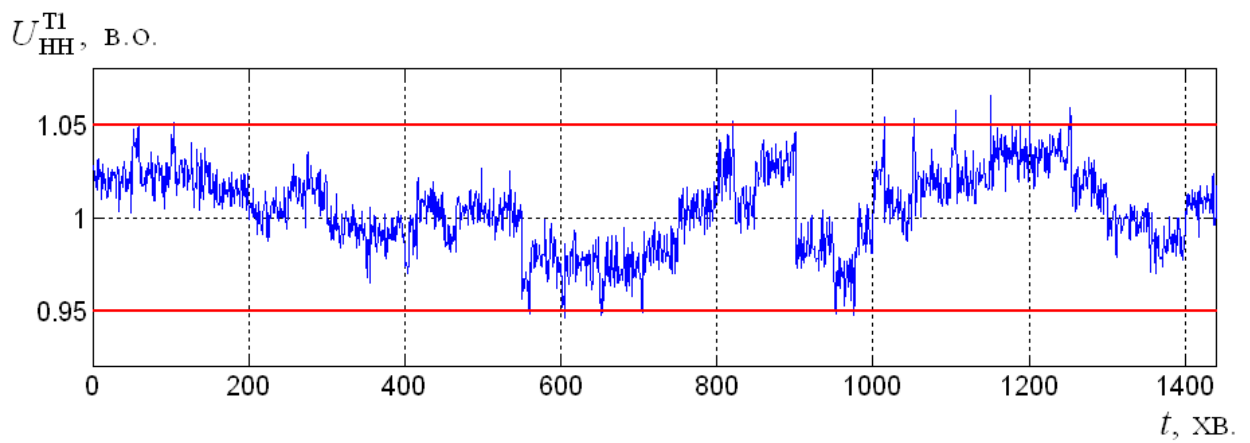


Рисунок 2.20 - Графік напруги на низькій стороні трансформатора ТМН-10000/35 для випадку розробленої системи керування

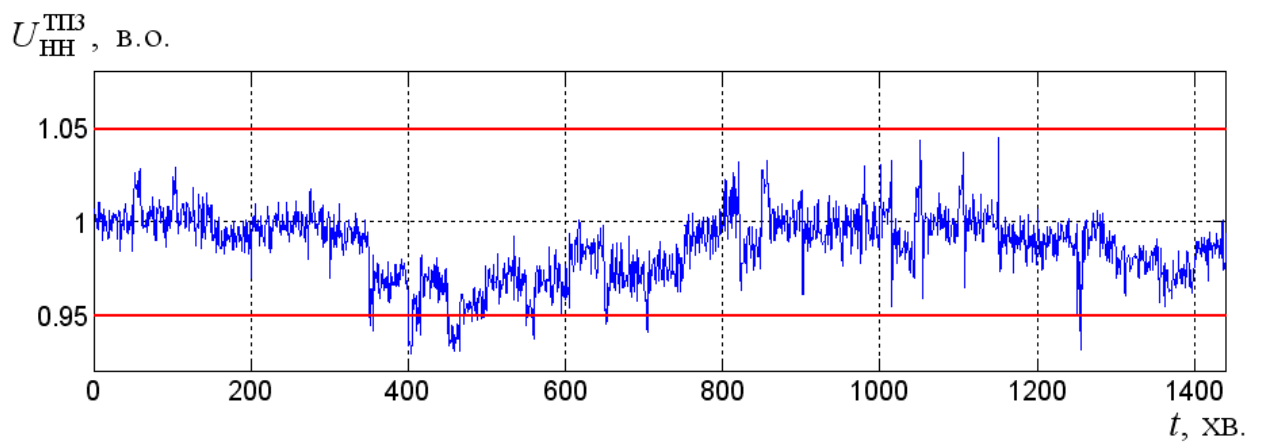


Рисунок 2.21 - Графік напруги на низькій стороні трансформатора ТПЗ для розробленої системи керування

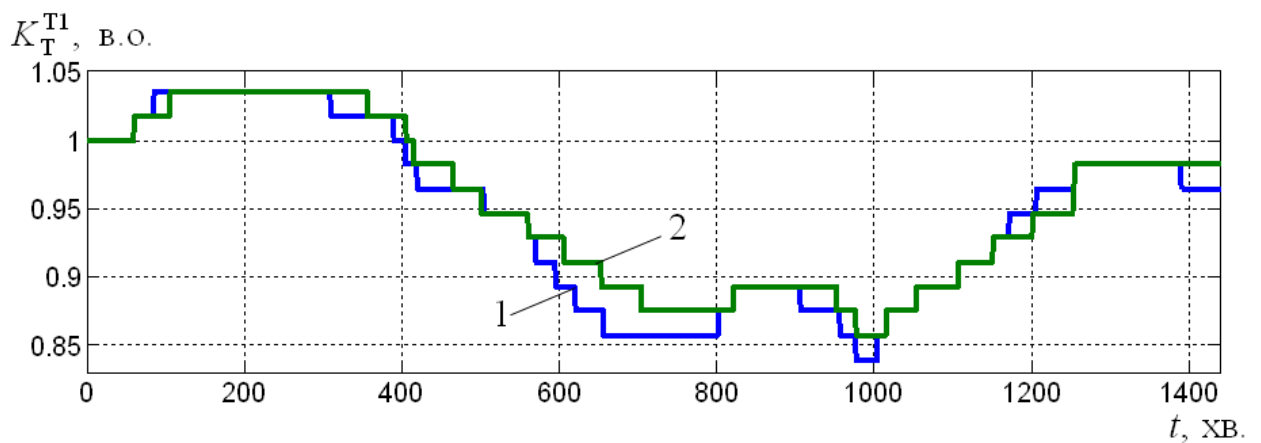


Рисунок 2.22 - Графік коефіцієнтів трансформації трансформатора ТМН-10000/35 для базової (1) та розробленої (2) систем керування

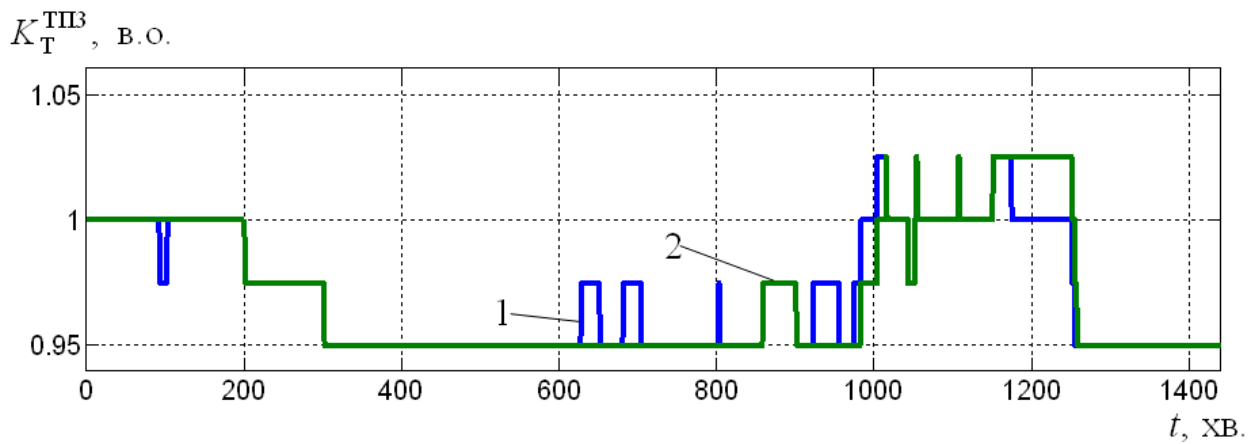


Рисунок 2.23 - Графік коефіцієнтів трансформації трансформатора ТПЗ з безконтактним пристроєм РПН для базової (1) та розробленої (2) систем керування

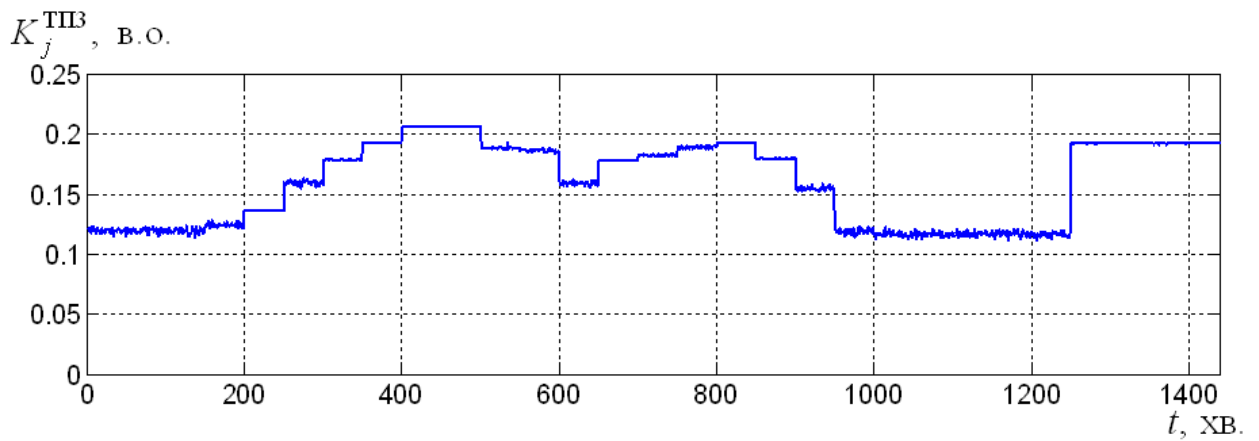


Рисунок 2.24 - Графік вагового коефіцієнту K_j підстанції нижнього рівня ТПЗ

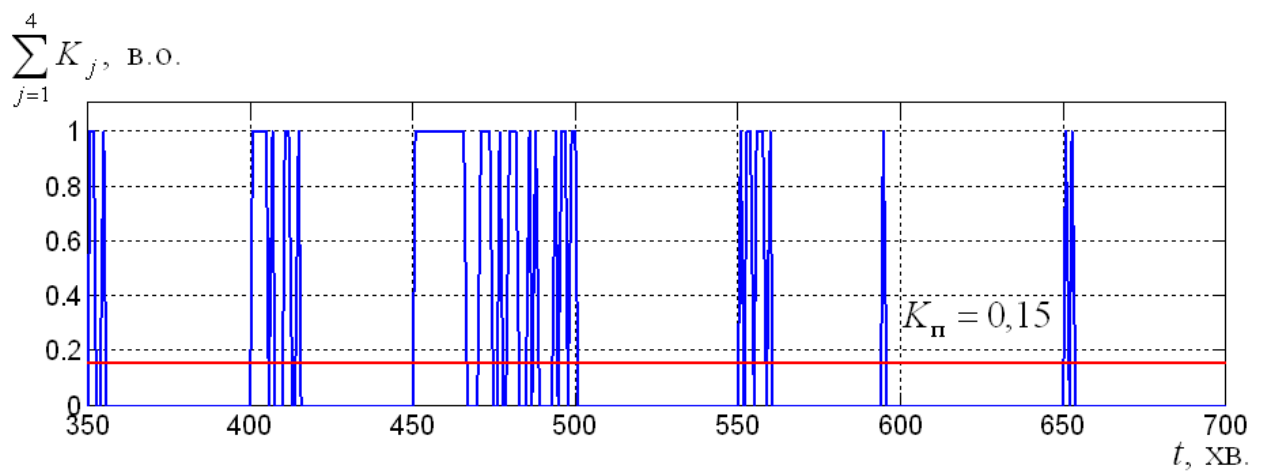


Рисунок 2. 25 - Графік сумарного значення коефіцієнтів ваги ΣK_j

Згідно з результатами комп'ютерного моделювання (рис. 2.18–2.25) та їх статистичної обробки (табл. 2.2), як базова, так і розроблена дворівнева система регулювання напруги в РЕМ забезпечують значення усталеного відхилення напруги, що відповідають вимогам ДЕСТ 13109-97 щодо цього показника якості. Однак, використання розробленої САК дозволило зменшити кількість спрацювань механічного пристрою РПН на 19,1 %, що є вагомою перевагою. Цей результат досягнуто завдяки інтеграції систем автоматичного регулювання напруги підстанцій вищого і нижчого рівнів у єдину систему керування.

Таблиця 2.2 - Обробка результатів моделювання

№	Місце вимірювання напруги	Математичне очікув., $M[U]$, в.о.	СКВ, σ , %	Число непопадань., $N_{н.п.}$, шт.	Інтегральна імовірність, $p(V \leq V_{н.д.})$ в.о.	Число спрацювань РПН, $N_{РПН}$, шт.
Базова система керування						
1	Сторона низької напруги - Т1	1,0118	0,0155	10,0	0,9932	26,0
2	0,4 кВ - ТП1	0,9924	0,0174	18,0	0,9876	30,0
3	0,4 кВ - ТП2	0,9928	0,0171	1,0	0,9904	30,0
4	0,4 кВ - ТП3	0,9913	0,0182	37,0	0,9744	28,0
5	0,4 кВ - ТП4	0,9976	0,0138	1,0	0,9994	27,0
Розроблена система керування						
1	Сторона низької напруги - Т1	1,0052	0,0208	16,0	0,9889	21,0
2	0,4 кВ - ТП1	0,9865	0,0178	43,0	0,9701	20,0
3	0,4 кВ - ТП2	0,9871	0,0176	41,0	0,9717	20,0
4	0,4 кВ - ТП3	0,9849	0,0186	56,0	0,9613	18,0
5	0,4 кВ - ТП4	0,9937	0,0148	9,0	0,9938	22,0

Для створення математичної моделі дворівневої системи регулювання напруги використовували апарат передаточних функцій. Цей метод дозволяє описати динамічні властивості системи та забезпечити високу точність розрахунків. На основі отриманих моделей було побудовано комп'ютерні імітаційні моделі розробленої САК, які враховують особливості взаємодії підсистем різних рівнів регулювання.

Для оцінки ефективності запропонованої дворівневої системи регулювання напруги в РЕМ методом імітаційного моделювання в середовищі «Matlab/Simulink» було розроблено відповідні імітаційні моделі. Ці моделі інтегрують запропоновані в роботі закони автоматичного регулювання та нечіткий алгоритм роботи блоку прийняття керуючих рішень, що забезпечує адаптивність системи до зміни режимів роботи та умов навантаження.

Аналіз статистичних даних моделювання показав, що як базова, так і розроблена дворівнева система забезпечують відповідність значень усталеного відхилення напруги вимогам ДЕСТ 13109-97. Крім того, застосування розробленої САК дозволяє на 19,1 % зменшити кількість спрацювань механічного пристрою РПН, що продовжує термін служби обладнання, знижує витрати на його обслуговування та підвищує загальну надійність роботи системи електропостачання.

3 ПРАКТИЧНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

3.1. Мікропроцесорна система регулювання напруги нижнього рівня.

Використання мікропроцесорної техніки. Все більше мікропроцесорна техніка впроваджується в технологічні процеси. На сьогодні персональний комп'ютер є основою майже кожної системи автоматичного регулювання. Це можуть бути мікроконтролери, промислові комп'ютери чи персональні електронно-обчислювальні машини (ПЕОМ). Такі системи, окрім виконання основного завдання – регулювання параметрів, забезпечують цілу низку додаткових функцій. Вони збирають, зберігають та обробляють інформацію про об'єкт регулювання, передають дані до інших рівнів керування, наприклад, на диспетчерський пульт управління. Крім того, застосування мікропроцесорної техніки дозволяє створювати ієрархічні системи, інтегровані в єдину електричну мережу, що значно розширює можливості автоматизації.

Контроль пристроїв регулювання напруги. В окремих системах для ефективного управління трансформаторами використовують контроль положень перемикаючого пристрою. Такий підхід дозволяє не лише перевіряти виконання команд перемикання, але і своєчасно діагностувати можливі несправності механізму РПН. Це сприяє підвищенню надійності системи та зниженню ризику відмов.

Економічна ефективність сучасних мікропроцесорних систем. Завдяки сучасній елементній базі вартість розробки та виробництва мікропроцесорних пристроїв є достатньо нижчою порівняно з аналогічними за функціоналом аналоговими системами. При цьому продуктивність і ефективність мікропроцесорних рішень значно перевищують їх аналоги, що

робить їх більш вигідними та перспективними для впровадження в автоматизовані системи керування.

Однокристальні мікро-ЕОМ для автоматизації. Для вирішення подібних завдань оптимальним рішенням є використання однокристальних мікро-ЕОМ. В одному корпусі вони поєднують всі необхідні елементи: процесор, пам'ять, порти вводу-виводу, контролери зовнішніх переривань, таймери, а іноді й багатоканальні аналого-цифрові перетворювачі (АЦП). Серед поширених моделей мікроконтролерів варто виділити сімейство 80C51 компанії Intel та AVR від Atmel, які є популярними завдяки їх універсальності, надійності та доступності.

Для технічного виконання регулятора напруги нижнього рівня було обрано мікроконтролер AT90S8535 виробництва Atmel. Цей мікроконтролер обладнаний 8 кБ Flash-пам'яті для зберігання програмного забезпечення, 512 Б оперативної пам'яті та 8-канальним 10-розрядним аналого-цифровим перетворювачем (АЦП). Завдяки RISC-архітектурі мікроконтролер забезпечує високу продуктивність і ефективність роботи, функціонуючи на тактових частотах до 8 МГц.

На рисунку 3.1 представлено функціональну схему регулятора напруги, створеного на основі мікропроцесора AT90S8535. Ця схема відображає основні елементи системи, включаючи компоненти обробки сигналів, вводу-виводу даних, а також вузли, які необхідні для виконання автоматичного регулювання напруги. Завдяки високій інтеграції компонентів мікроконтролера, конструкція являється компактною, надійною та оптимальною для задач управління напругою.

Обраний мікроконтролер дозволяє ефективно виконувати необхідні алгоритми регулювання, а також забезпечує точний і швидкий збір та обробку вхідних сигналів. Це робить його ідеальним рішенням для точного контролю та високої швидкодії.

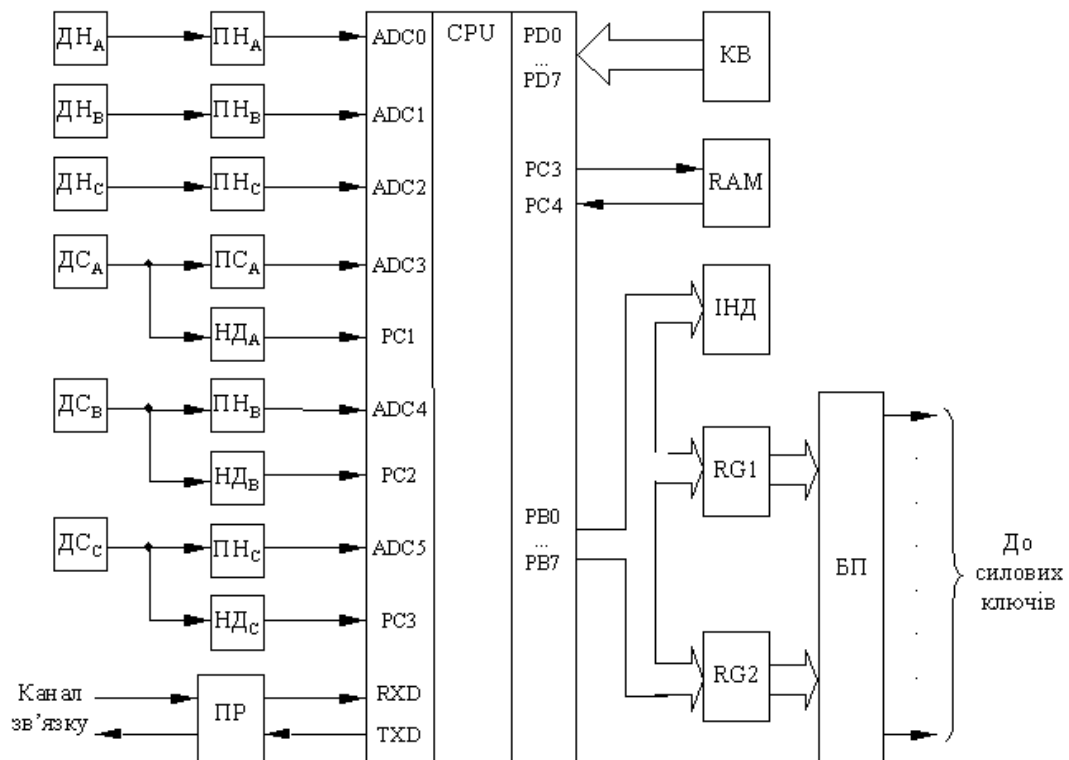


Рисунок 3.1 - Функціональна схема регулятора напруги нижнього рівня на основі мікропроцесора

Функціональна схема регулятора напруги, побудована на базі мікропроцесора CPU, містить компоненти, які забезпечують точний контроль та регулювання параметрів електричної мережі. Основні елементи включають:

- Датчики напруги (ДН_А, ДН_В, ДН_С) для вимірювання фаз А, В і С,
- Датчики струму (ДС_А, ДС_В, ДС_С) для фазного контролю,
- Нуль-датчики струму (НД_А, НД_В, НД_С) для контролю струмів нейтрального проводу,
- Перетворювачі напруги (ПН_А, ПН_В, ПН_С) та струму (ПС_А, ПС_В, ПС_С), які випрямляють і фільтрують сигнали для подальшої обробки,
- Регістри (RG1, RG2) для зберігання проміжних даних,
- Блок підсилювачів (БП) для корекції сигналів,
- Flash-пам'ять (RAM) для зберігання параметрів налаштувань,

- Клавіатуру (КВ) та індикатор (ІНД) для введення й візуалізації даних,
- Перетворювач рівнів сигналів (ПР) для взаємодії з ПЕОМ або іншими зовнішніми пристроями.

Напруги фаз А, В і С вимірюються за допомогою датчиків напруги $ДН_A$, $ДН_B$, $ДН_C$. Вихідні сигнали з цих датчиків подаються на відповідні перетворювачі $ПН_A$, $ПН_B$, $ПН_C$, де вони випрямляються та фільтруються для отримання постійних компонент, які відповідають діючим значенням напруг. Ці постійні напруги передаються на входи $ADC0$ – $ADC2$ через 8-канальний АЦП для подальшої цифрової обробки.

Струми фаз вимірюються трансформаторами струму, які функціонують як датчики $ДС_A$, $ДС_B$, $ДС_C$. Їхні сигнали перетворюються на постійні напруги за допомогою перетворювачів $ПС_A$, $ПС_B$, $ПС_C$, після чого вони подаються на входи $ADC3$ – $ADC5$ АЦП. Завдяки цьому схема забезпечує точне визначення стану напруг і струмів у мережі, що є основним для ефективного регулювання.

Ця архітектура дозволяє регулятору швидко та точно виконувати обчислення, реагувати на зміни параметрів мережі та забезпечувати стабільну роботу системи.

Запобігання короткому замиканню під час перемикання тиристорів.

Для уникнення коротких замикань під час роботи силових ключів, перемикання тиристорів здійснюється в той момент, коли струм у відповідній фазі проходить через нуль. У цей час попередній ключ вимикається, що запобігає виникненню небажаних перехідних процесів. Визначення точного моменту переходу струму через нуль виконується за допомогою нуль-датчиків струму $НД_A$, $НД_B$, $НД_C$, які передають інформацію на мікропроцесор.

Процес регулювання напруги. Мікропроцесор CPU здійснює регулювання напруги відповідно до закладеного закону управління. Для вмикання силових ключів мікропроцесор генерує відповідні сигнали, які

передаються через регістри RG1 та RG2 до блоку підсилювачів БП. Цей блок формує імпульси необхідної потужності, забезпечуючи стабільну та ефективну роботу тиристорів.

Зберігання параметрів і налаштування системи.

Уставки напруги та коефіцієнти закону керування зберігаються у flash-пам'яті RAM із послідовним доступом, що дозволяє швидко завантажувати необхідні налаштування при запуску системи. Для управління регулятором передбачено використання клавіатури, яка дає змогу вводити параметри, а також матричний програмований індикатор для візуального контролю становища пристрою.

Зв'язок з іншими пристроями.

Для забезпечення інтеграції регулятора з іншими системами передбачений послідовний інтерфейс зв'язку, який працює через перетворювач рівнів сигналу ПР. Це дозволяє передавати дані до ПК або інших пристроїв, забезпечуючи гнучкість у використанні.

Алгоритм роботи регулятора.

На рисунку 3.2 наведено алгоритм роботи мікропроцесорного регулятора напруги нижнього рівня. Цей алгоритм визначає послідовність дій, які виконуються регулятором: від зчитування вхідних параметрів до генерації керуючих сигналів. Такий підхід забезпечує точність і стабільність у регулюванні напруги.

3.2. Система блоку прийняття рішення на базі мікропроцесора.

На рисунку 3.3 зображено блок прийняття рішення, який виконує аналіз параметрів мережі та формує керуючі сигнали для регуляторів нижнього рівня. Його технічна реалізація може бути виконана на основі мікроконтролера AT90S8535. Цей мікроконтролер підтримує необхідну

обчислювальну потужність і має достатній обсяг пам'яті для зберігання алгоритмів прийняття рішень та обробки вхідних сигналів.

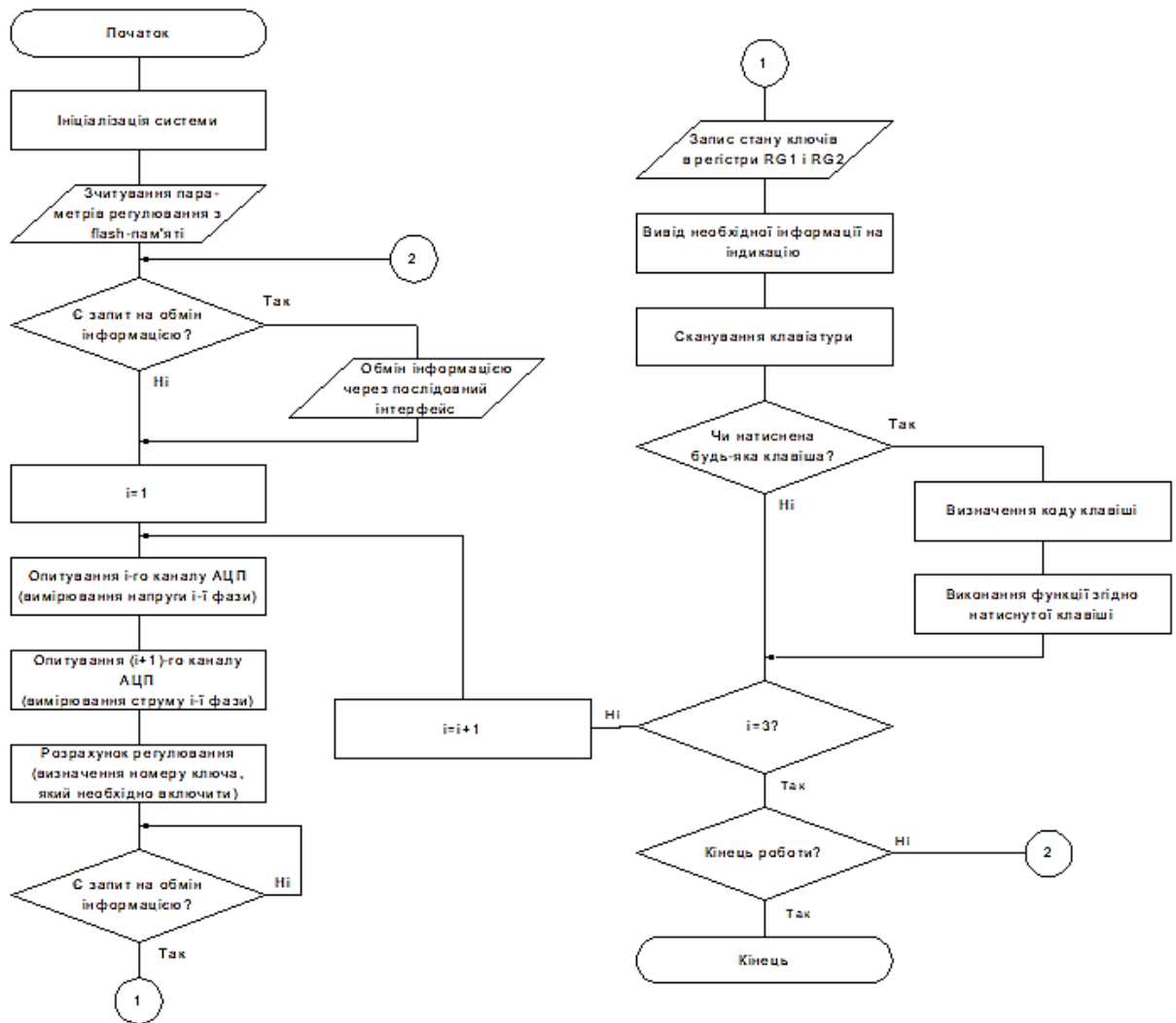


Рисунок 3.2 - Алгоритм роботи регулятора напруги нижнього рівня на основі мікропроцесора

Пристрій отримує інформацію з датчиків напруги та струму, аналізує її та генерує вихідні сигнали для регуляторів напруги. Завдяки вбудованому аналого-цифровому перетворювачу, обробка аналогових сигналів виконується точно та швидко. Алгоритми блоку прийняття рішень можуть базуватися на законах автоматичного регулювання або принципах нечіткої

логіки, що дозволяє ефективно адаптувати систему до змін в параметрах мережі.

Застосування цього мікроконтролера забезпечує високу продуктивність пристрою, компактність конструкції і енергоефективність. Блок здатний працювати в реальному часі, забезпечуює надійний зв'язок з іншими компонентами системи автоматичного регулювання.

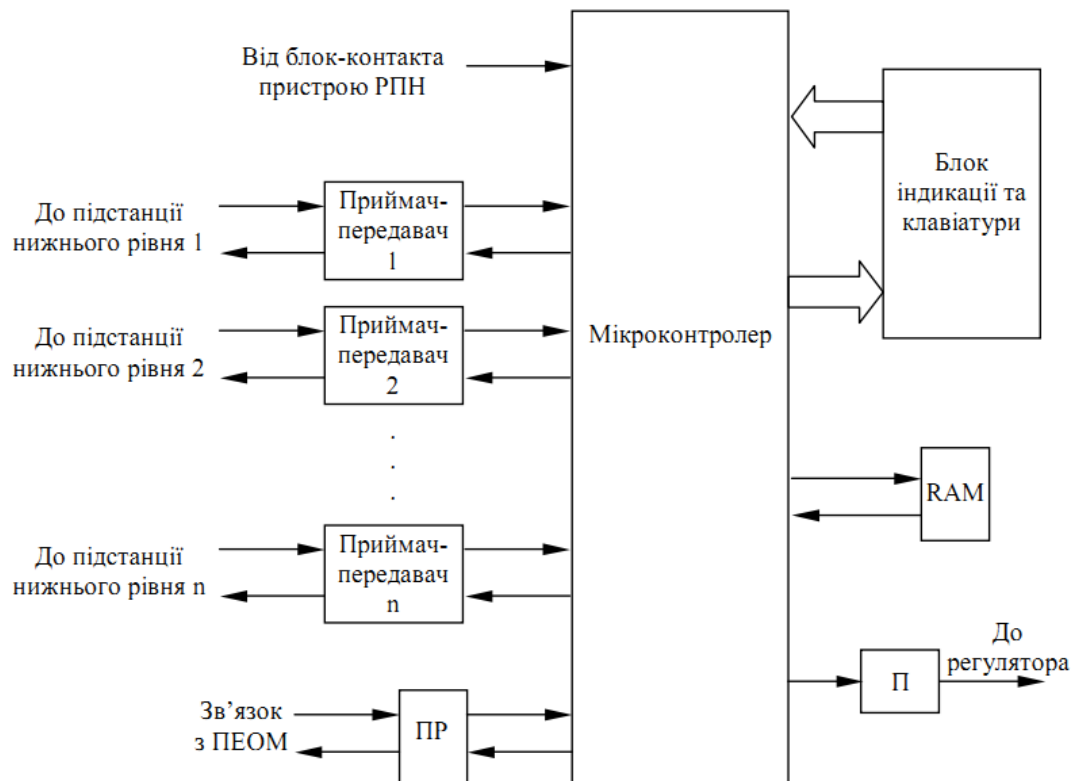


Рисунок 3.3 - Функціональна схема блоку прийняття рішення на основі мікропроцесора

Вагові коефіцієнти для підстанцій нижнього рівня обчислюються на основі нечіткого алгоритму, розробленого в попередньому розділі. Ці коефіцієнти характеризують внесок кожної підстанції у формування управляючого сигналу для системи регулювання напруги. Після обчислення результати передаються через перетворювач інтерфейсів до блоку

автоматичного регулювання напруги, що працює на рівні головної підстанції. Така інтеграція дозволяє ефективно координувати роботу усіх елементів системи та забезпечувати узгоджене регулювання напруги у мережі.

3.3. Аналіз похибок вимірювальних каналів.

У дворівневій системі регулювання напруги реалізовано вимірювання параметрів напруги і струму на двох рівнях. На верхньому рівні для цієї задачі застосовується, регулятор АРКТ-1, який обладнаний власними вимірювальними каналами з наперед визначеними похибками. Тому похибки вимірювання розраховуються лише для каналів регулятора нижнього рівня.

На рисунку 3.4 представлено функціональну схему вимірювальних каналів нижнього рівня. В ній відображено усі елементи, які беруть участь у вимірювальному процесі, а також похибки, які виникають у кожній з ланок цих каналів. Аналіз цих похибок являється важливим етапом, оскільки він дозволяє оцінити точність вимірювань та вплив похибок на загальну ефективність роботи системи регулювання напруги.

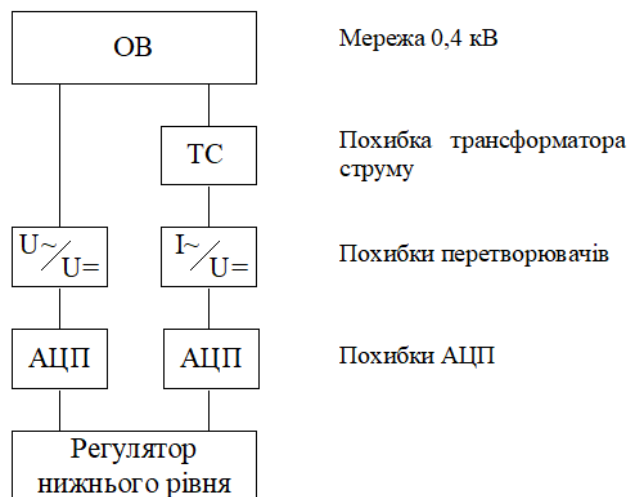


Рисунок 3.4 - Функціональна схема вимірювальних каналів для регулятора нижнього рівня

3.3.1. Похибки вимірювального трансформатора струму.

Похибки трансформаторів струму виникають через струм намагнічування, який впливає на точність вимірювань. Дані похибки поділяються на струмові та кутові, їх величини можуть змінюватися залежно від характеристик трансформатора та умов його експлуатації. Граничні значення цих похибок, визначені відповідно до вимог ДЕСТ 7746-89, наведені в таблиці 3.1. Аналіз цданих показників дозволяє оцінити допустимий рівень похибок для забезпечення надійної роботи системи регулювання напруги.

Таблиця 3.1. Похибки вимірювальних трансформаторів струму

Клас точності тр-ра струму	Первинний струм, %	Максимальна похибка			Вторинне навантаження при cos φ ₂ =0,8, % від номінального,
		струмова %	кутова		
			...'	срад	
0,2	5,0	±0,750	±30,0	±0,90	25,0-100,0
	10,0	±0,50	±20,0	±0,60	
	20,0	±0,350	±15,0	±0,40	
	100,0-200,0	±0,20	±10,0	±0,30	
0,5	5,0	±1,50	±90,0	±2,50	
	10,0	±1,0	±60,0	±1,70	
	20,0,	±0,750	±45,0	±1,35	
	100,0-200,0	±0,50	±30,0	±0,90	
1	5,0	±3,00	±180,0	±5,40	
	20,0	±1,50	±90,0	±2,70	
	100,0-120,0	±1,0	±60,0	±1,80	

У процесі регулювання враховується тільки діюче значення струму, тому аналізу підлягає виключно струмова похибка. Через те, що похибки вимірювальних трансформаторів вважаються чисто мультиплікативними, клас точності трансформаторів безпосередньо відображає значення їх відносної похибки. Це спрощує оцінку точності вимірювань, оскільки абсолютна похибка може бути визначена за формулою, яка враховує відносну похибку та фактичне значення струму. Такий підхід дозволяє

оцінити вплив похибок на роботу системи та внести необхідні корективи для підвищення точності регулювання.

$$\Delta_T = \gamma_T \cdot x \quad (3.1)$$

де x – вимірювана величина;

γ_T – відносна похибка.

3.3.2. Похибка перетворювачів напруги.

Для забезпечення розрахунку регулюючих впливів регулятора нижнього рівня потрібно отримувати точні значення діючої напруги і струму. Оскільки діюче значення синусоїдального сигналу пов'язане із його середнім значенням, у випадках невеликої несинусоїдальності напруги в електричних мережах це співвідношення майже не змінюється, що дозволяє використовувати методи спрощеного вимірювання.

Для зниження амплітуди напруги у низьковольтній мережі застосовуються резистивні подільники, які є простим та ефективним рішенням, тому що потреба у вимірювальних трансформаторах напруги відсутня. Аналогічно, спадання напруги на активному опорі трансформатора струму, пропорційне струму первинної обмотки, також масштабується за допомогою резистивного подільника для узгодження із допустимими рівнями напруги для аналого-цифрового перетворювача. Використання прецизійних термостабільних резисторів зводить до мінімуму похибки подільників, що спричинені відхиленнями опору від номінального значення і температурними коливаннями.

Для перетворення змінних сигналів в постійні сигнали використовується перетворювач змінної напруги в постійну (ПЗНП), які поєднують функції випрямлення та фільтрації. Враховуючи швидкодію регулятора нижнього рівня, час затримки сигналу не більше 0,025 с, що вимагає високої швидкості роботи перетворювачів. Такі характеристики

забезпечуються схемами з операційними підсилювачами, які здатні працювати у широкому діапазоні вхідних сигналів.

ПЗНП зазвичай побудовані на основі детекторів (одно- або двонапівперіодних) і фільтрів нижніх частот, що забезпечують високу точність та стабільність сигналу. На рисунку 3.5 наведена схема ПЗНП, яка поєднує функції фільтра нижніх частот із вихідним каскадом випрямляча, що спрощує конструкцію і покращує її технічні характеристики.

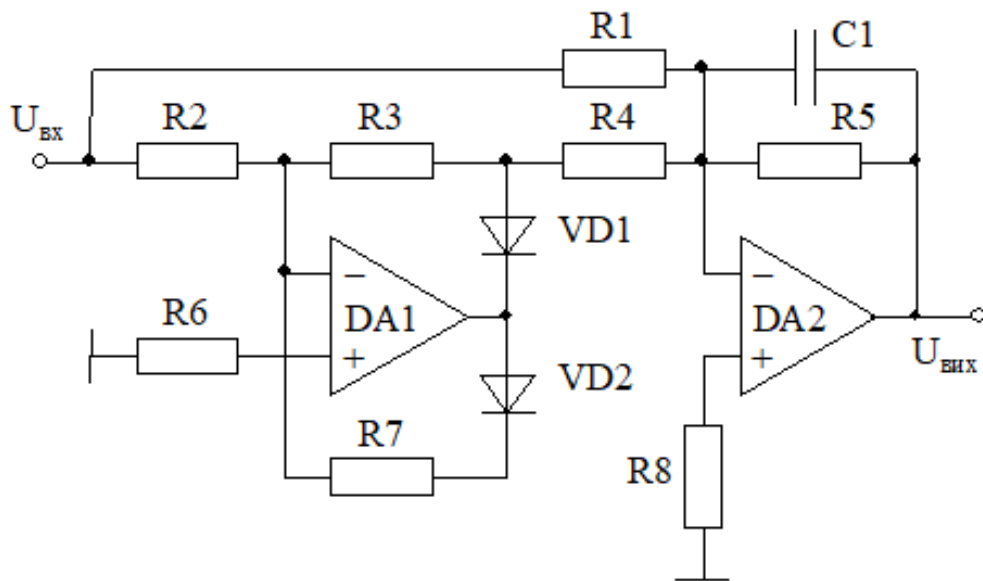


Рисунок 3.5 - Схема перетворювача змінної напруги в постійну

З урахуванням схемного пристрою та умов роботи ПЗНП, вихідна напруга для додатної та від'ємної полярностей вхідного сигналу при відключеному конденсаторі C1 може бути записана у вигляді:

$$\begin{aligned} U_{\text{ВЫХ}}^+ &= -U_{\text{ВХ}}^+ \frac{R_5}{R_1}; \\ U_{\text{ВЫХ}}^- &= -U_{\text{ВХ}}^- \left(\frac{R_5}{R_1} - \frac{R_3 R_5}{R_2 R_4} \right). \end{aligned} \quad (3.2)$$

Якщо

$$2R_4 = \frac{R_3 R_1}{R_2} \quad (3.3)$$

то модуль коефіцієнта передачі для додатної полярності вхідної напруги дорівнює модулю від'ємної полярності.

Якщо $R_2 = R_3$, $R_1 = 2R_4$, то

$$|U_{\text{вих}}| = u_{\text{вх}} \frac{R_5}{R_1}. \quad (3.4)$$

При підключенні конденсатора $C1$ вихідний каскад, побудований на операційному підсилювачі $DA2$, перетворюється на фільтр нижніх частот (ФНЧ) першого порядку. Це перетворення забезпечує зменшення високочастотних перешкод на виході та стабілізацію сигналу.

Для забезпечення високої точності ПЗНП до його опорів пред'являються такі ж вимоги, як і до опорів резистивного подільника. Це стосується використання прецизійних термостабільних резисторів для мінімізації відносної та температурної похибки. Однак, присутня випадкова складова похибки, що виникає в результаті схемотехнічної реалізації ПЗНП. Ця складова обумовлена конструкційними особливостями таких елементів, як операційні підсилювачі, фільтри та випрямлячі, що можуть впливати на точність сигналу на виході.

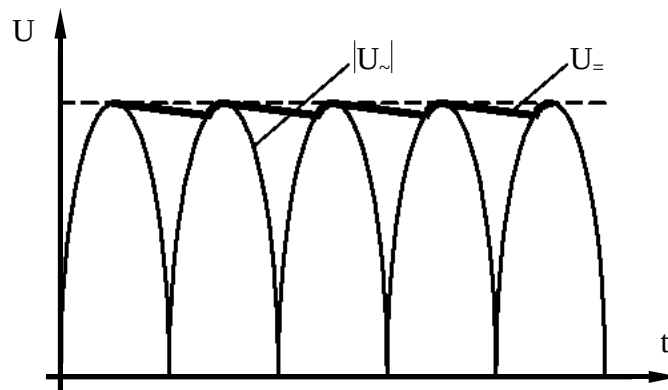


Рисунок 3.6 - Форми сигналів, що ілюструють роботу ПЗНП

На основі аналізу рис. 3.6 видно, що у формі вихідного сигналу перетворювача змінної напруги в постійну спостерігаються невеликі пульсації. Вони виникають із-за фізичних процесів заряду і розряду конденсатора С1, який виконує функцію згладжувального елемента у складі фільтра нижніх частот (ФНЧ).

Випадковість похибки обумовлена тим, що процеси перетворення сигналу у ПЗНП та аналого-цифровому перетворювачі не узгоджені між собою, тобто квантування сигналу в АЦП може відбуватись у будь-який момент. Це приводить до того, що значення вихідного сигналу ПЗНП, визначене в момент квантування, може не відповідати середньому рівню сигналу, що викликає позитивну похибку.

З рис. 3.6 також витікає, що похибка вихідного сигналу є виключно додатною, оскільки значення сигналу ніколи не падає нижче середнього рівня через особливості роботи ПЗНП та зарядно-розрядних характеристик конденсатора.

Встановлено, що похибка вихідного сигналу перетворювача змінної напруги в постійну підпорядковується закону розподілу, подібному до гама-розподілу. Математична формула для густини імовірності гама-розподілу виглядає наступним чином:

$$p(\delta_p) = \begin{cases} 0, & \delta_p \leq 0; \\ C_\lambda \cdot \delta_p^{(\alpha-1)} \cdot e^{-\beta\delta_p}, & \delta_p > 0, \alpha > 0, \beta > 0, \end{cases} \quad (3.5)$$

де δ_p – величина похибки вимірювання напруги, обумовлена пульсаціями вихідного сигналу;

C_λ , α та β – значення коефіцієнтів гамма-розподілу, які задаються для виконання умови $\int_0^\infty p(\delta_p) d\delta_p = 1$ по формулі

$$C_{\gamma} = \frac{\beta^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)}. \quad (3.6)$$

Математичне очікування похибки вимірювання напруги, яка обумовлена пульсацією сигналу на виході визначається за виразом:

$$m(\delta_p) = \frac{\alpha}{\beta}. \quad (3.7)$$

3.3.3. Визначення похибки аналого-цифрового перетворювача.

Похибка квантування аналого-цифрового перетворення складається із двох основних складових: динамічної похибки і похибки квантування АЦП. Динамічна похибка виникає, коли вхідний сигнал змінює своє значення під час процесу перетворення. Для її мінімізації використовують пристрій вибірки-зберігання, який фіксує рівень вхідного сигналу на момент синхронізуючого імпульсу та утримує сигнал стабільним на вході АЦП на протязі усього циклу перетворення. У сучасних мікросхемах АЦП пристрій вибірки-зберігання досить часто інтегровано в одну мікросхему, що значно спрощує технічну реалізацію вимірювальних каналів.

Похибка квантування обумовлена закінченою кількістю рівнів, на які розбивається діапазон вимірюваного сигналу, і включає інструментальну похибку та похибку цифрового представлення. Інструментальна похибка з'являється через шуми в електронних вузлах АЦП, які можуть бути спричинені недосконалістю виробничого процесу чи умовами експлуатації. Проте при умові дотримання схемотехнічних рекомендацій виробника значення цієї похибки настільки мале, що нею можна знехтувати.

Похибка цифрового представлення обумовлюється розрядністю АЦП та шириною діапазону вимірювання. Вона спричинена тим, що реальний сигнал квантується на кінцеве число рівнів, а точність представлення

обмежується кроком квантування h . Ця похибка має рівномірний розподіл у межах $\pm h/2$ та може бути описана прямокутним законом розподілу, де густина імовірності є сталою на всьому інтервалі похибки:

$$h = \frac{U_{D\max}}{2^n}, \quad (3.8)$$

де $U_{D\max}$ – найбільше значення вхідної напруги АЦП;

n – число розрядів АЦП.

Абсолютну похибку квантування розраховує за виразом:

$$\Delta_{DU} = \frac{U_{\max}}{2^{n+1}}, \quad (3.9)$$

де $U_{\max}$ – найбільше значення напруги, яке треба вимірювати.

Значення відносного середньоквадратичного відхилення похибки квантування обчислюється за формулою:

$$\sigma_{DU} = \frac{U_{\max}}{2^{n+1} \sqrt{3} U_U}, \quad (3.10)$$

де U_U – значення напруги на виході датчика напруги.

Закон розподілу похибки квантування при вимірюванні напруги, який має прямокутний розподіл, записується наступним виразом:

$$p(\Delta_{DU}) = \frac{1}{h} = \frac{2^n}{U_{\max}}, \quad \Delta_{DU} \in \left[-\frac{U_{\max}}{2^{n+1}}, \frac{U_{\max}}{2^{n+1}} \right]. \quad (3.11)$$

Абсолютна похибка квантування АЦП при перетворенні струму розраховується аналогічно похибки при вимірюванні напруги і визначається за формулою:

$$\Delta_{DI} = \frac{I_{\max}}{2^{n+1}}, \quad (3.12)$$

де $I_{\max}$ – максимальне значення струму в діапазоні вимірювання.

Середньоквадратичне відхилення похибки вимірювання струму обчислюється за формулою, аналогічною до формули для напруги, враховуючи похибку квантування струму:

$$\sigma_{DI} = \frac{I_{\max}}{2^{n+1} \sqrt{3} U_I}, \quad (3.13)$$

де U_I – значення напруги на виході датчика напруги.

Вираз, що описує закон розподілу похибки квантування при вимірюванні струму, має вигляд:

$$p(\Delta_{DI}) = \frac{1}{h} = \frac{2^n}{I_{\max}}, \quad \Delta_{DI} \in \left[-\frac{I_{\max}}{2^{n+1}}, \frac{I_{\max}}{2^{n+1}} \right]. \quad (3.14)$$

Для визначення абсолютної Δ та відносної ε похибок при використанні 10-розрядного АЦП з діапазоном вимірювання $U_{\max} = 400 \text{ В} + 20\% = 480 \text{ В}$, струму $I_{\max} = 3000 \text{ А}$, обчислимо відповідні значення для напруги та струму:

$$\begin{aligned} \Delta_{DU} &= \frac{480}{2^{11}} = 0,23 \text{ В}, & \varepsilon_{DU} &= \frac{0,23}{480} \cdot 100\% \approx 0,05\%, \\ \Delta_{DI} &= \frac{3000}{2^{11}} = 1,47 \text{ А}, & \varepsilon_{DI} &= \frac{1,47}{3000} \cdot 100\% \approx 0,05\%. \end{aligned}$$

Таким чином, у розділі виконано комплексну розробку структури мікропроцесорного регулятора напруги, призначеного для трансформаторів, обладнаних безконтактним пристроєм регулювання під навантаженням. У структурі враховано особливості дворівневої системи регулювання напруги, де ключовим елементом є блок прийняття рішення, реалізований на базі мікропроцесора. Основною його функцією є обчислення вагових коефіцієнтів

для нижніх рівнів системи на основі нечіткого алгоритму, розробленого в ході дослідження.

Також у розділі проведено оцінку похибок вимірювальних каналів, що являється важливим для забезпечення точності роботи регулятора. У результаті аналізу встановлено, що максимальну похибку формує вимірювальний трансформатор струму через його конструктивні властивості та наявність струму намагнічування. Похибки інших елементів вимірювальних каналів, а саме перетворювачів напруги та струму, а також резистивних подільників, завдяки використанню прецизійних компонентів мають невеликі значення і можуть бути проігноровані в практичному застосуванні.

4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ НАПРУГИ

Для визначення економічної ефективності розробленої системи автоматичного керування треба провести розрахунок капітальних витрат на впровадження цієї системи, а також визначити річні експлуатаційні витрати для обох базової та розробленої САК.

Спочатку проводяться розрахунки капітальних витрат, які включають витрати на закупівлю обладнання, програмне забезпечення, а також витрати на монтажні роботи та налаштування системи. Крім того, враховуються витрати на підготовку персоналу, навчання та сертифікацію, які потрібні для ефективного використання САК.

Після цього проводиться аналіз річних експлуатаційних витрат для двох систем автоматичного керування. Це включає витрати на електричну енергію, технічне обслуговування, ремонтні роботи, а також витрати на поновлення програмного забезпечення та витрати на підтримку технічного персоналу. Важливо брати до уваги також можливі додаткові витрати на обслуговування та заміну устаткування протягом робочого циклу системи.

Закінчується розрахунок економічної ефективності розробленої САК порівнянням загальних витрат та оцінкою отриманого економічного ефекту, який можливий завдяки покращеній ефективності та зниженню витрат на експлуатацію нової системи в порівнянні з базовою.

4.1. Розрахунок капітальних витрат розробленої системи автоматичного керування.

Для розрахунку капіталовкладень на заміну базової системи автоматичного керування використовують наступну формулу:

$$K=C_1+C_2+C_3$$

де: C_1 — вартість обладнання, необхідного для нової САК.

C_2 — витрати на монтажні роботи (монтаж і налаштування системи).

C_3 — транспортні витрати (переміщення обладнання, доставка).

Загальна сума K представляє собою капіталовкладення на впровадження нової САК.

Розрахунок проводиться на підставі попереднього аналізу вартості кожного елемента, включеного до формули, з урахуванням можливих змін і економічних умов на момент впровадження.

Результати розрахунків капіталовкладень в розроблену САК зводимо у таблиці 4.1 та 4.2.

Таблиця 4.1. Розрахунок вартості системи.

№ п/п	Елемент схеми	Кількість, шт	Ціна, грн.	
			Одиного	Всього
1	Мікропроцесор Atmega162	1	240	240
2	Мікросхема ADE7758	1	60	60
3	Рідкокристалічний екран WH1602B	1	280	280
4	Резистор 330 Ом	8	16	128
5	Резистор 10 кОм	1	50	50
6	Резистор 5 кОм	4	18	72
7	Резистор 1 МОм	7	50	350
8	Конденсатор 22 пФ	2	34	102
9	Конденсатор 20 пФ	2	28	56
10	Конденсатор 10 мкФ	2	70	140
11	Конденсатор 0,1 мкФ	3	30	90
12	Кварцовий резонатор 10 МГц	2	22	44
13	Транзистор КТ 315	2	10	20
14	Кнопка ввімкнення	15	44	660
Загальна вартість системи				2292

Таблиця 4.2 - Розрахунок капіталовкладень в систему.

Капіталовкладення	Вартість, грн.
C_1 - Загальна вартість обладнання системи, грн	2292
C_2 - Витрати на монтаж і налаштування системи (60% від вартості обладнання), грн	1376
C_3 - Транспортування обладнання (10% від вартості обладнання), грн	229
K - Капіталовкладення на встановлення розробленої САК, грн	3897

4.2. Обчислення річних експлуатаційних витрат.

Щоб визначити кількість спрацювань пристрою РПН силового трансформатора за рік, потрібно помножити середню кількість спрацювань на день на кількість днів у році.

1. Середня кількість спрацювань за день $N_{\text{день}} = 30$
2. Кількість днів у році $N_{\text{рік}} = 365$

Розрахунок кількості спрацювань за рік $N_{\text{рік}}$:

$$N_{\text{рік}} = N_{\text{день}} \cdot N_{\text{рік}}$$

$$N_{\text{рік}} = 30 \cdot 365$$

$$N_{\text{рік}} = 10950$$

Отже, пристрій РПН силового трансформатора спрацьовує приблизно 10950 разів за рік.

Для визначення щорічних витрат на обслуговування пристрою РПН трансформатора для базової САК, слід врахувати витрати на перевірку та заміну оливи, а також на заміну контактів. Зазначені витрати залежать від числа спрацювань на рік і вимог паспортних даних пристрою РПН.

Витрати на обслуговування щорічно можна розрахувати за формулою:

$$Z_{\text{б}} = Z_{\text{м}} + Z_{\text{к}} + Z_{\text{дод}} , \quad (4.3)$$

де $Z_{\text{б}}$ – вартість витрат по обслуговуванню РПН для базової системи керування;

$Z_{\text{м}}$ – вартість витрат по заміні оливи;

$Z_{\text{к}}$ – вартість витрат по заміні контактів РПН;

$Z_{\text{дод}}$ – додаткові витрати на обслуговування РПН

Щоб розрахувати загальні витрати на основну та додаткову заробітну плату робітників з відрахуваннями в соціфонди, слід використати наступну формулу:

$$Z_{\text{зп}} = Q_{\text{р}} l_{\text{ср}} K_{\text{д}} \left(1 + \frac{H_{\text{соц}}}{100} \right) = 44 \cdot 45 \cdot 1,25 \cdot \left(1 + \frac{22}{100} \right) = 3019,5 \text{ грн}$$

де $Q_{\text{р}}$ –трудомісткість ремонтних та налаштовувальних робіт РПН для трансформатора за рік;

$l_{\text{ср}}$ – середня тарифна ставка робітників за годину, грн./год. (орієнтовно 45 грн/год.);

$K_{\text{д}}$ – коефіцієнт доплати, враховуючий премії та всі види грошових доплат. Приймається 1,25-1,35.

$H_{\text{соц}}$ – норма єдиного соцвнеску, $H_{\text{соц}} = 22 \%$.

Щоб визначити вартість експлуатаційних матеріалів, можна скористатися наступною пропорцією:

$$Z_{\text{е.м}} = 0,25 \cdot Z_{\text{зп}} = 0,25 \cdot 3019,5 = 755 \text{ грн.}$$

Інші витрати на утримання системи можуть становити до 20% від загальної вартості ресурсу ($Z_{\text{зп}}$). Це може включати витрати на

обслуговування та оновлення обладнання, а також витрати на забезпечення безпеки та підтримку системи. Важливо враховувати ці витрати при плануванні бюджету, щоб забезпечити стабільну та ефективну роботу системи в довгостроковій перспективі:

$$З_{\text{утр}} = 0,2 \cdot З_{\text{зп}} = 0,2 \cdot 3019,5 = 603,9 \text{ грн.}$$

Додаткові витрати пов'язані з обслуговуванням РПН включають витрати на регулярне технічне обслуговування, оновлення програмного забезпечення та апаратного забезпечення, а також надання техпідтримки користувачам. Це потрібно враховувати для забезпечення безперебійної роботи системи та мінімізації ризиків виходу її з ладу:

$$З_{\text{дод}} = З_{\text{зп}} + З_{\text{е.м}} + З_{\text{утр}} = 3019,5 + 755 + 603,9 = 4378,4 \text{ грн.}$$

Витрати по заміні оливи:

$$З_{\text{м}} = m \cdot C_{\text{м}} = 150 \cdot 62 = 9300 \text{ грн.},$$

де $m = 150 \text{ л.}$ – норма об'єму оливи для РС-4;

$C_{\text{м}} = 62 \text{ грн/л}$ – ціна за 1 л оливи для РПН.

Так як олива замінюється 1 раз протягом 2-х років, то річні витрати на заміну оливи становлять:

$$З_{\text{м.річ}} = \frac{З_{\text{м}}}{2} = \frac{9300}{2} = 4650 \text{ грн.}$$

Витрати на заміну контактів :

$$З_{\text{к}} = n_{\text{р}} C_{\text{р}} + n_{\text{вр}} C_{\text{вр}} = 6 \cdot 500 + 12 \cdot 240 = 5880 \text{ грн.}$$

де C_p – ціна рухомого контакта;

n_p – число рухомих контактів;

C_{np} – ціна нерухомого контакта;

n_{np} – число нерухомих контактів.

Щорічні витрати на обслуговування РПН трансформатора включають витрати на виконання регулярних технічних оглядів, заміну витратних матеріалів, а також витрати на ремонтні роботи. Ці витрати треба враховувати при плануванні фінансового бюджету для забезпечення безпечної та ефективної роботи трансформатора протягом усього року:

$$Z_6 = Z_m + Z_k + Z_{\text{дод}} = 4650 + 5880 + 4378,4 = 14908,4 \text{ грн.}$$

Завдяки розробленій системі керування, число спрацювань може бути знижене на 19,1%. Це дозволяє зменшити щорічні витрати на обслуговування РПН на 19,1%. Таким чином, щорічні витрати, обумовлені обслуговуванням РПН трансформатора у випадку застосування цієї системи, складатимуть 80,8% від попередньої суми. Це значне скорочення витрат може бути вигідним з економічної точки зору для підприємства:

$$Z_p = Z_6 \cdot \frac{100 - 19,1}{100} = 14908,4 \cdot \frac{100 - 19,1}{100} = 12061 \text{ грн.}$$

4.3. Обчислення економічної ефективності впровадження.

Економічну ефективність системи автоматичного контролю РПН силового трансформатора визначають за приведеними затратами, економічному ефекту та терміну окупності.

Приведені витрати визначають за формулою:

$$Z_i = E_n K_i + I_{o,i} \quad (4.4)$$

E_n – значення нормативного коефіцієнту ефективності капіталовкладень, 1/рік; приймаємо $E_n = 0,12$;

K_i – величина капіталовкладень в i -й варіант досліджень;

$I_{o,i}$ – витрати на обслуговування і налаштування обладнання для i -го варіанту.

Результати розрахунку ефективності впровадження системи автоматичного керування в РЕМ представлені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3. Показники ефективності впровадження розробленої системи керування.

№ з/п	Показник	Одиниця виміру	Базова система	Проектна система
1	Капіталовкладення в систему	грн.	3897	3897
2	Витрати пов'язані з обслуговуванням і налаштуванням РПН	грн./рік	14908,4	12061
3	Приведені затрати	грн./рік	5686	5344
4	Очікуваний економічний ефект	грн./рік	2847,4	
5	Термін окупності впровадження	роки	1,37	

Таким чином, розрахунок річного економічного ефекту наступний:

$$E = Z_6 - Z_n = 14908,4 - 12061 = 2847,4 \text{ грн./рік}$$

Термін окупності додаткових капвкладень, які здійснені завдяки зниженню експлуатаційних витрат, становить:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{E} = \frac{3897}{2847,4} = 1,37 \text{ року.}$$

В результаті техніко-економічного порівняння базової системи та розробленої системи автоматичного регулювання напруги встановлено, що її впровадження являється економічно обґрунтованим. Річний економічний ефект від проведених заходів становить 2847,4 грн. Термін окупності капіталовкладень менший за нормативний і складає 1,37 роки.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі було проведено теоретичні та практичні дослідження задачі автоматизації керування дворівневою системою регулювання напруги в розподільних електромережах. Мета дослідження полягала у підвищенні надійності роботи мереж шляхом зменшення числа перемикачів механічного пристрою регулювання напруги (РПН) силового трансформатора без суттєвого зниження якості напруги.

Дослідження показали, що найбільш придатним технічним засобом для регулювання напруги є механічний пристрій РПН силового трансформатора. Однак, його суттєвим недоліком є досить низька надійність через значний знос механічних контактів, які комутують номінальні струми.

Під час аналізу існуючих систем автоматичного керування напругою в розподільних електричних мережах було виявлено, що для зменшення числа перемикачів механічного пристрою регулювання напруги (РПН) силового трансформатора районної підстанції без погіршення якості напруги найбільш доцільно обладнати кінцеві підстанції регуляторами напруги з тиристорними пристроями РПН. Ці регулятори мають бути об'єднані із регулятором напруги на районній підстанції в одну єдину дворівневу систему регулювання, яка дозволяє перемикачів РПН лише тоді, коли певна кількість регуляторів на кінцевих підстанціях витратила свій діапазон регулювання.

Запропонований закон регулювання напруги для трансформатора верхнього рівня передбачає, що перемикачів не відбуваються до тих пір, доки визначена порогова кількість регуляторів нижнього рівня виконує підтримання напруги на споживачах в заданих межах. Це дозволяє зменшити число перемикачів механічного пристрою РПН на підстанції верхнього рівня, що підвищує надійність роботи розподільних електричних мереж.

У результаті проведеного дослідження з вибору математичного апарату, придатного для вирішення задачі автоматичного керування, було

встановлено, що для визначення вагового коефіцієнта на підстанції нижнього рівня доцільно застосувати математичний апарат з використанням нечіткої логіки. На основі цього математичного апарату було розроблено математичну модель та алгоритм роботи блоку визначення даного коефіцієнту.

Для визначення ефекту від застосування запропонованої дворівневої системи регулювання напруги в РЕМ було розроблено комп'ютерні імітаційні моделі систем автоматичного керування (САК) в комп'ютерному середовищі «Matlab/Simulink». В основу моделей покладено розроблені закони автоматичного регулювання та нечіткий алгоритм роботи блоку прийняття керуючих рішень.

Було створено структуру мікропроцесорного регулятора напруги для трансформаторів з безконтактним пристроєм РПН, а також структуру блоку прийняття рішень на основі мікропроцесора. Цей блок в процесі роботи дворівневої системи регулювання напруги обчислює ваговий коефіцієнт відповідно розробленому нечіткому алгоритму.

Оцінка похибок вимірювальних каналів розробленої САК показала, що найбільшу похибку видає вимірювальний трансформатор струму. Похибками інших частин вимірювальних каналів можна знехтувати.

Результати техніко-економічного порівняння базової та розробленої САК показали, що застосування розробленої дворівневої системи автоматичного регулювання напруги в РЕМ являється економічно обґрунтованим.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Електротехнічні системи електроспоживання / [Плешков П. Г., Зінзура В. В., Гарасьова Н. Ю., Котиш А. І., Величко Т. В., Плешков С. П.]; під редакцією Заслуженого працівника освіти України, кандидата технічних наук, професора Плешкова П. Г. – М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2021.– 209 с.
2. Кваліфікаційна робота магістра: метод. рекомендації до змісту, структури та оформлення кваліфікаційної роб. : для студ. спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков, К. Г. Петрова, Н. Ю. Гарасьова та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 74 с.
3. Особливі режими електричних мереж: Навчальний посібник/ Г.Г. Півняк, А.К. Шидловський, Г.А. Кігель, А.Я. Рибалко, О.І. Хованська. - Д.: Національний гірничий університет, 2009.-376 с
4. Електричні системи і мережі. Частина 3 : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / Ю. В. Малогулко, О. Б. Бурикін, Т. Л. Кацадзе, В. В. Нетребський ; за ред. П. Д. Лежнюка. – Вінниця : ВНТУ, 2022. – 172 с.
5. Жежеленко І.В. Показники якості електроенергії та їх контроль на промислових підприємствах. - М., Вища школа, 1986. – 152с. 4. Жежеленко І.В., Рабінович М.Л., Божко В.М. Якість електроенергії на промислових підприємствах К., Техніка, 1981. - 329 с.
6. Шидловський А.К. Музиченко О.Д. Симетруючі пристрої. – К., Техніка, 1970. – 129с.
7. Бялобржеський О.В. Контроль і керування якістю електричної енергії // Бялобржеський О.В., Сухоніс Т.Ю., Качалка В.Ю. – Кременчук, 2014. – 127 с.

8. Грабко В. В. Моделі і засоби регулювання напруги за допомогою трансформаторів з пристроями РПН / В. В. Грабко. – Вінниця, УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 109 с.
9. Електропостачання промислових підприємств : Підручник для студентів електромеханічних спеціальностей / В.І. Мілих, Т.П. Павленко. – Харків : ФОП Панов А. М., 2016. – 272 с.
10. Лежнюк П.Д. Електроощадні технології в електричних мережах енергосистем / Л. Н. Добровольська, В. В. Кулик, П. Д. Лежнюк // Під редакцією Лежнюка П.Д. – Луцьк: ІВВ Луцького НТУ, 2018. – 328 с.
11. Кучанський В.В. Заходи та технічні засоби підвищення ефективності роботи магістральних електричних мереж: монографія / В. В. Кучанський, Д. О. Малахатка. – Вінниця: ГО «Європейська наукова платформа», 2021. – 120 с.
12. Бурбело М. Й. Формування математичних моделей вимірювальних систем установок симетрування / М. Й. Бурбело,
13. О. В. Бабенко // Вісник ВПІ. – 2005. – №6. – С. 242-251.
14. Бурбело М. Й. Квазізрівноважені вимірювальні канали для симетрувальних установок / М. Й. Бурбело, О. В. Бабенко. – Вінниця, УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 96 с.
15. Шкрабець Ф.П., Плешков П.Г. Основи електропостачання. Навчальний посібник. – Кіровоград: РВЛ КНТУ, 2010, -408 с.
16. Мокін Б.І., Грабко В.В., Львов І.Ю. Спосіб регулювання напруги в електричних мережах // Збірка праць IV – ої Міжнар. наукової конференції “Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств” (PQ 2000). – 2000. – С.153.
17. Mokin B., Grabko V., Lvov I. About one method to control the voltage in electric nets // Proc. 5-th International Conf. on Development and Application Systems (DAS 2000). – Suceva (Romania). – 2000. – С.16-19.

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

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

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

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

Додаток А

ОХОРОНА ПРАЦІ

Аналіз небезпечних і шкідливих факторів та заходи для їх усунення.

Один із методів забезпечення безпеки роботи в електроустановках — це захисне заземлення. Захисне заземлення являє собою навмисне з'єднання металічних неструмоведучих частин із землею або її еквівалентом, які можуть опинитися під напругою через коротке замикання на корпус, індуктивний вплив сусідніх струмоведучих частин, перенесення потенціалу, блискавковий розряд тощо. Еквівалентами землі можуть бути вода річки чи моря, кам'яне вугілля в корінному заляганні і подібне.

Основна мета захисного заземлення — запобігання ураження електричним струмом при доторканні до корпусу електроустановки та до інших неструмоведучих металічних частин, що опинилися під напругою внаслідок короткого замикання або інших причин.

Захисне заземлення слід відрізнити від робочого заземлення та заземлення блискавкозахисту. Робоче заземлення передбачає навмисне з'єднання окремих точок струмової ланцюга з землею, наприклад, нейтральних точок обмоток генераторів, силових і вимірювальних трансформаторів, дугогасячих апаратів, реакторів поперечної компенсації в дальніх лініях електропередач, а також фаз при використанні землі як фазного або оберненого проводу. Робоче заземлення забезпечує нормальну або аварійну роботу електроустановки і здійснюється безпосередньо (тобто через спеціальні апарати, такі як пробивні запобіжники, розрядники, резистори тощо).

Заземлення блискавкозахисту передбачає навмисне з'єднання блискавкоприймачів і розрядників з землею для відведення струмів блискавки в землю. Принцип дії захисного заземлення полягає у зниженні до

безпечних значень напруги доторкання і кроку, які виникають через замкнення на корпус та інші причини. Це досягається шляхом зменшення потенціалу заземленого обладнання (зниженням опору заземлювача), а також вирівнюванням потенціалів основи, на якій стоїть людина, і заземленого обладнання (підняттям потенціалу основи до значення, близького до потенціалу заземленого обладнання).

Область застосування захисного заземлення включає:

- мережі з напругою до 1000 В змінного струму — трифазні трипроводні з ізольованою нейтраллю, однофазні двопроводні, ізольовані від землі, а також постійного струму двопроводні з ізольованою середньою точкою обмоток джерела струму;
- мережі з напругою понад 1000 В змінного і постійного струму з будь-яким режимом нейтралі або середньою точкою обмоток джерела струму.

Захисне заземлення є найпростішим, але дуже ефективним заходом захисту від ураження електричним струмом при виникненні напруги на металевих неструмоведучих частинах.

Перед початком роботи в електроустановках оперативний персонал має виконати технічні заходи, що забезпечують безпеку робіт:

1. Вимкнення обладнання, яке виводиться в ремонт, та застосування заходів проти його помилкового включення або самоувімкнення.
2. Установка тимчасових огорож, плакатів із написами: “Не вмикати, працюють люди” та “Не відкривати, працюють люди”.
3. Приєднання переносного заземлення до заземлюючої шини і перевірка відсутності напруги на струмопровідних частинах, які потрібно заземлювати для безпеки.
4. Накладання переносного заземлення на вимкнені струмопровідні частини електроустановок одразу після перевірки відсутності напруги або

включення заземлюючих ножів, що мають бути на кожному приєднанні електроустановці.

5. Огородження робочого місця і вивішування плакатів, що дозволяють працювати “Працювати тут”.

Захисні заходи при пошкодженні ізоляції включають:

Контроль ізоляції — вимірювання її активного або омичного опору для виявлення дефектів і попередження замкнень на землю та коротких замикань (КЗ). Стан ізоляції значною мірою визначає безпеку експлуатації електроустановок, оскільки опір ізоляції в мережах з ізольованою нейтраллю визначає величину струму замикання на землю і, відповідно, струм, що проходить через людину. У мережах напругою понад 1000 В зниження опору ізоляції майже завжди призводить до пробоя ізоляції і глухого замикання на землю.

При глухозаземленій нейтралі струм замикання на землю і струм, що проходить через людину, не залежать від величини опору ізоляції. Однак при поганому стані ізоляції часто виникають її пошкодження, що призводить до глухих замкнень на землю (корпус) і до КЗ. При замиканні на землю без спрацювання захисту виникає небезпека ураження електричним струмом, оскільки неструмоведучі металічні частини, з якими людина зазвичай має контакт, опиняються під напругою.

Щоб попередити замикання на землю та інші пошкодження ізоляції, що становлять небезпеку для людини і призводять до виходу з ладу обладнання, необхідно проводити випробування підвищеною напругою та контроль опору ізоляції.

Приймально-здавальні випробування проводяться при введенні в експлуатацію новозмونتованих і виведених з ремонту електроустановок. Обсяг і норми цих випробувань регламентуються Правилами технічної експлуатації електроустановок (ПТЕ). При випробуваннях підвищеною напругою дефекти ізоляції виявляються за допомогою пробоя і подальшого

прогара ізоляції. Виявлені дефекти усуваються, а потім проводяться повторні випробування налаштованого обладнання.

Експлуатаційний контроль ізоляції включає вимірювання її опору при прийманні електроустановки після монтажу періодично згідно з Правилами або у разі виявлення дефектів. Опір ізоляції вимірюється на відімкненій установці. Під час такого вимірювання можна визначити опір ізоляції окремих ділянок мережі, електричних апаратів, машин тощо. В мережах з напругою до 1000 В опір ізоляції кожної ділянки має бути не нижче 0,5 МОм. Для електричних апаратів і машин норми інші, тому вони відмикаються від мережі, і опір їх ізоляції вимірюється окремо.

Вимірювання опору ізоляції під робочою напругою дозволяє визначити стан ізоляції всієї мережі, включаючи джерело і електроприймачі. Отримана величина опору ізоляції дозволяє оцінити ступінь безпеки експлуатації даної мережі. Норми, наведені в Правилах технічної експлуатації (ПТЕ), не є критерієм нормальної роботи ізоляції для всієї мережі, оскільки вони встановлені лише для окремих її ділянок.

Міркувати про нормальну роботу або наявність дефектів ізоляції можна лише шляхом порівняння результатів вимірювань під напругою з даними попередніх вимірювань. Якщо результати співпадають, ізоляція є робочою. Виявлення різкого зниження опору ізоляції в порівнянні з попередніми вимірами вказує на наявність дефектів ізоляції.

В мережах з напругою до 1000 В невеликої ємності (до 0,05 мкФ) слід підтримувати опір ізоляції на такому рівні, щоб струм, що проходить через людину, яка торкнулася до фази, не перевищував тривало допустимої величини.

Постійний контроль ізоляції передбачає вимірювання її опору під робочою напругою на протязі всього часу роботи електроустановки, з подачею сигналу у разі зниження опору ізоляції до гранично допустимої

величини або нижче. Прилад постійного контролю ізоляції повинен відповідати певним вимогам:

- Показувати лише активний або омичний опір ізоляції фаз відносно землі незалежно від величини ємності.
- Бути стійким до коливань напруги мережі.
- Мати надійність.
- Здійснювати самоконтроль – при несправності приладу стрілка вказівника повинна встановлюватися на нуль, а не на ∞ .
- Опір внутрішніх кіл приладу має бути значно вищим, ніж повний опір фаз відносно землі (не нижче 100 кОм).

Керівник підприємства зобов'язаний забезпечити належне утримання, експлуатацію і обслуговування електроустановок відповідно до вимог чинних нормативних документів. Для цього він повинен:

- Призначити відповідального за справний стан і безпечну експлуатацію електрогосподарства з числа інженерно-технічних працівників, які мають електротехнічну підготовку і пройшли перевірку знань у встановленому порядку.
- Забезпечити достатню кількість електротехнічних працівників.
- Затвердити Положення про енергетичну службу підприємства, а також посадові інструкції і інструкції з охорони праці.
- Встановити порядок, що передбачає ретельне спостереження за обладнанням і мережами – оглядом, перевіркою дії, випробуванням і вимірюванням.
- Забезпечити перевірку знань працівників у встановлені строки згідно з вимогами ПТЕ.
- Забезпечити проведення протиаварійних, приймально-здавальних і профілактичних випробувань та вимірювань електроустановок згідно з правилами і нормами ПТЕ.
- Забезпечити проведення технічного огляду електроустановок.

Фахівці служб охорони праці мають відповідальні обов'язки контролювати безпечну експлуатацію електроустановок і повинні мати групу IV з електробезпеки. Це гарантує, що вони мають достатні знання та навички для забезпечення безпеки робіт у електроустановках. Забороняється покладати на енергослужбу обов'язки, що не входять до її професійної компетенції.

Оперативне обслуговування може здійснюватися як місцевими оперативними чи оперативно-ремонтними працівниками, за якими закріплена ця електроустановка, так і виїзними, за якими закріплена група електроустановок. Вид оперативного обслуговування, кількість оперативних працівників в зміну чи на електроустановці визначаються особою, відповідальною за електрогосподарство, за узгодженням з керівником підприємства (організації) і зазначається в місцевих інструкціях.

До оперативного обслуговування електроустановок допускаються працівники, які знають оперативні схеми, посадові і експлуатаційні інструкції, інструкції з охорони праці, особливості обладнання і пройшли навчання, дублювання та перевірку правил техніки безпеки (ПТБ) та правил технічної експлуатації (ПТЕ).

Оперативні працівники, які обслуговують електроустановки одноосібно, та ті старші в зміні чи бригаді оперативні працівники, за якими закріплені електроустановки, повинні мати групу з електробезпеки IV в електроустановках напругою вище 1000 В і III – в електроустановках напругою до 1000 В.

Оперативні працівники, які заступають на чергування, мають прийняти зміну від попереднього чергового, здати зміну наступному черговому у відповідності з графіком. Під час приймання зміни оперативний працівник зобов'язаний:

- Ознайомитися зі схемою і станом та режимом роботи устаткування на своїй ділянці особистим оглядом в обсязі, встановленому інструкцією.

- Одержати від чергового, який здає зміну, інформацію про стан устаткування, за яким необхідно вести ретельний нагляд для запобігання аваріям та неполадкам, а також про стан устаткування, що перебуває в ремонті або резерві.

- Перевірити й прийняти інструмент, матеріали, ключі від приміщень, засоби захисту, оперативну документацію та інструкції.

- Ознайомитися з усіма записами та розпорядженнями за час, що минув з його останнього чергування.

- Оформити приймання зміни записом у журналі, відомості, а також в оперативній схемі власним підписом та підписом працівника, який її здає.

- Доповісти старшому зміни про початок чергування та про неполадки, виявлені під час прийняття зміни.

Прийняття і здача зміни безпосередньо під час ліквідації аварії, виконання перемикань чи операцій по вмиканню та вимиканню обладнання забороняється. Це робиться для забезпечення безпеки працівників і мінімізації ризиків додаткових аварій. Старший в зміні оперативний працівник зобов'язаний негайно повідомити диспетчера енергопостачальної організації про аварії, які спричинили відключення однієї або кількох ліній електропередачі, що живлять підприємство.

В разі порушення режиму роботи, пошкодження чи аварії електроустаткування, оперативний працівник зобов'язаний негайно вжити заходів з відновлення схеми нормального режиму роботи і повідомити про те, що сталося, безпосередньо старшому у зміні працівнику або особі, відповідальній за електрогосподарство.

У випадку неправильних дій оперативних працівників під час ліквідації аварії, старший в зміні оперативний працівник зобов'язаний прийняти на себе керівництво і відповідальність за подальший перебіг ліквідації аварії. Оперативні працівники повинні проводити обходи та огляди устаткування і виробничих приміщень на закріпленій за ними ділянці.

Під час огляду в електроустановках понад 1000 В забороняється відкривати двері приміщень, комірок, що обладнані сітчастими огорожами або бар'єрами, якщо відстань між дверима та струмовідними частинами менша за допустиме значення. Перелік таких приміщень та комірок затверджується особою, відповідальною за електрогосподарство. Забороняється під час огляду електроустановок виконувати будь-яку роботу.

Огляди, виявлення і ліквідація несправностей в електроустановках без місцевих чергових працівників виконується централізовано виїзними працівниками, що здійснюють нагляд і роботи на об'єкті. Результати оглядів фіксуються в оперативному журналі.

Двері приміщень електроустановок (щитів, збірок тощо) мають бути постійно замкнені. В приміщеннях електроустановок забороняється зберігання матеріалів та інструментів, що не належать до даної електроустановки.

Небезпека ураження струмом при торканні до корпусу та інших не струмоведучих металічних частин електрообладнання, що виявилися під напругою внаслідок замикання на корпус та по іншим причинам, може бути усунена швидким відключенням пошкодженої електроустановки від живлячої мережі і разом з тим зниженням напруги корпусу відносно землі.

Розрахунок захисного заземлення.

Згідно з Правилами улаштування електроустановок (ПУЕ), всі металеві частини електроустановок, які в процесі роботи можуть опинитися під напругою, мають бути заземлені для забезпечення електробезпеки. Це включає трансформаторні підстанції, цехові трансформатори та інше обладнання.

Розрахунок і пристрій заземлення:

1. Трансформаторні підстанції 10/0,4 кВ на стороні 0,4 кВ мають глухозаземлену нейтраль, а обмотки цехових трансформаторів з'єднані Δ/Y з

нулем. Це означає, що всі металеві частини цих підстанцій повинні бути заземлені.

2. Струм замикання на землю для цехових трансформаторів становить 27 А, що визначає необхідний рівень заземлення для захисту від ураження електричним струмом.

3. Заземлення цехового обладнання забезпечується за допомогою вертикальних заземлювачів і з'єднувальних смуг. Вертикальні заземлювачі необхідно встановлювати на достатній глибині, щоб забезпечити низький опір заземлення, що дозволяє витратити електричні струми замикання на землю.

4. Грунтова основа (супісь) вказує на середній опір землі, що також враховується при розрахунку заземлення. Супісь як грунтова основа має середній електричний опір, що може впливати на ефективність заземлення.

5. Розрахунок заземлення зводиться до визначення:

- кількості вертикальних заземлювачів (наприклад, труби або штирі), які повинні бути занурені в землю на необхідну глибину;
- довжини з'єднувальної смуги, яка з'єднує заземлювачі з обладнанням та іншими металевими частинами підстанції;
- розташування на плані цих елементів з урахуванням їхнього взаємного розташування та відстаней між ними.

Цей процес забезпечує мінімізацію опору заземлення і тим самим знижує потенціал небезпеки для персоналу під час роботи з електроустановками.

Розрахунок.

1. Визначається норма на опір заземлення R_3^H .

Якщо заземлюючий пристрій використовується одночасно для електроустановок напругою до 1000 В та вище:

$$R_3 \leq \frac{125}{I_3} = \frac{125}{27} = 4,63 \text{ Ом}.$$

Згідно ПУЕ, R_3 повинен бути не більше 4 Ом. Приймається $R_3 = 4$ Ом.

2. Визначається розрахунковий питомий опір ґрунту:

$$\rho_p = \rho_{\text{табл}} \psi = 250 \cdot 1,4 = 350 \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

де $\rho_{\text{табл}}$ – табличне значення, для супіску $\rho_{\text{табл}} = 250 \text{ Ом} \cdot \text{м}$;

ψ – підвищуючий коефіцієнт, для України, для стержньових заземлювачів $\psi = 1,4$.

3. Опір одинарного вертикального заземлювача:

$$\begin{aligned} R_o &= 0,366 \frac{\rho_{\text{розр}}}{l} \left[\lg \left(\frac{2l}{d} \right) + \frac{1}{2} \lg \left(\frac{4t+l}{4t-l} \right) \right] = \\ &= 0,366 \cdot \frac{350}{5} \cdot \left[\lg \left(\frac{2 \cdot 5}{2,5} \right) + \frac{1}{2} \lg \left(\frac{4 \cdot 3 + 5}{4 \cdot 3 - 5} \right) \right] = 20,361 \text{ Ом}, \end{aligned}$$

де l – довжина заземлювача, приймається 5 м;

d – діаметр заземлювача (приймаються стрижні діаметром 2,5 см).

$$t = h + \frac{l}{2} = 0,5 + \frac{5}{2} = 3 \text{ м},$$

де h – глибина прокладки смуг (згідно ПУЕ – 0,5...0,8 м).

Приймаються електроди прокладені по замкнутому контуру згідно плану та визначається орієнтовна кількість заземлювачів:

$$n_o = \frac{R_o}{R_3 \eta_t} = \frac{20,361}{4 \cdot 0,59} = 8,628 \approx 9 \text{ шт.},$$

де η_t – коефіцієнт використання ряду заземлювачів, для $a/l = 4/5 = 0,8$,

$\eta_t = 0,59$, $a = 4$ м – відстань між електродами згідно ПУЕ.

4. Довжина горизонтальної з'єднувальної смуги:

$$l_i = 1,05 a n = 1,05 \cdot 4 \cdot 9 = 37,8 \text{ м}.$$

5. Опір смуги з урахуванням екранування:

$$R_{\Pi} = 0,366 \frac{\rho_{\text{розр}}}{l_{\Pi} \eta_{\Pi}} \lg \frac{2l_{\Pi}}{b n} = 0,366 \frac{350}{37,8 \cdot 0,59} \lg \frac{2 \cdot 37,8^2}{0,01 \cdot 0,5} = 24 \text{ Ом},$$

де η_{Π} – коефіцієнт використання з'єднувальної смуги шириною $b = 10$ мм та товщиною 5 мм.

6. Потрібний опір вертикальних заземлювачів з урахуванням опору з'єднувальної смуги:

$$R_{\text{тр}} = \frac{R_{\Pi} R_3^H}{R_{\Pi} - R_3^H} = \frac{24 \cdot 4}{24 - 4} = 4,8 \text{ Ом.}$$

Схема прокладки заземлення представлена на рис. А1.

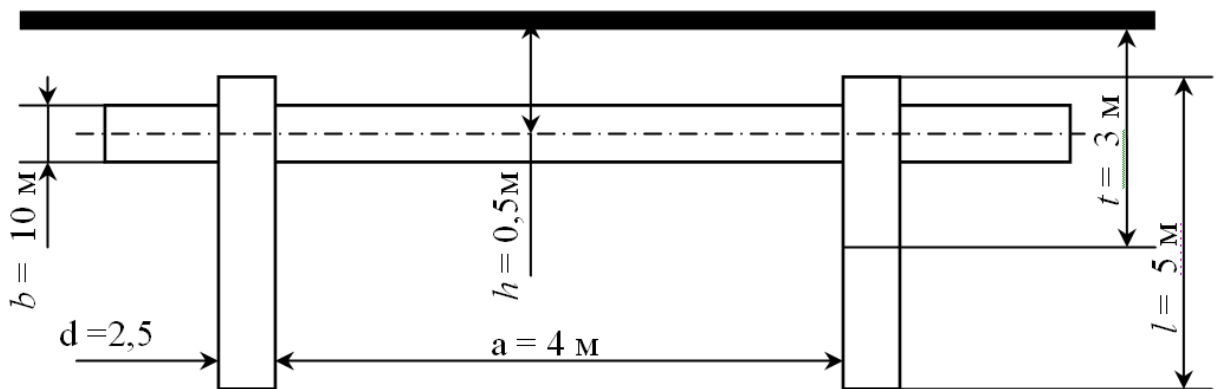


Рисунок А1 - Схема прокладки заземлення

7. Кінцева кількість заземлювачів:

$$n = \frac{R_0}{R_{\text{тр}} \eta_t} = \frac{20,361}{4,8 \cdot 0,59} = 7,49 \approx 8 \text{ шт.}$$

8. Проводиться перевірка опору заземлювача і порівнюється отримане значення з нормативним:

$$R_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{тр}}} + \frac{1}{R_{\Pi}}} = \frac{1}{\frac{1}{4,8} + \frac{1}{24}} = 4 \text{ Ом.}$$

Якщо дійсний опір заземлюючого пристрою з 8-ма заземлювачами не перевищує нормуючого значення, це свідчить про його ефективність і забезпечення необхідного рівня електробезпеки. Дійсний опір заземлюючого пристрою є ключовим показником його здатності витратити електричні

струми замикання на землю, знижуючи потенціал небезпеки для людей і обладнання.

Заземлюючий пристрій, що має 8 заземлювачів і відповідає нормам, гарантує ефективну розрядку електричних струмів до землі, що є важливим фактором для запобігання ураження електричним струмом та збереження безпеки електроустановок.