

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет автоматики та енергетики
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
канд. техн. наук, професор
_____Петро ПЛЕШКОВ
“ ____ ” _____ 2021 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему
“Дворівнева нечітка система автоматичного
регулювання напруги в розподільних електричних
мережах”

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-20М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

_____Анатолій РОЖКО
« ____ » _____ 2021 р.

Керівник роботи
канд. техн. наук, доцент
_____Василь ЗІНЗУРА
« ____ » _____ 2021 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет автоматики 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

Плешков П.Г.

«___» _____ 2021 р.

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

Рожка Анатолія Олександровича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Дворівнева нечітка система автоматичного
регулювання напруги в розподільних електричних мережах

Two-level fuzzy system of automatic voltage regulation in distribution electric
networks

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

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 30.11.2021 р

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Метою дослідження є
розробка законів регулювання напруги силових трансформаторів з
пристроями РПН, реалізація яких дозволяла б досягти одночасного
підвищення якості і надійності електропостачання

Вступ; аналіз сучасного стану питань автоматичного регулювання напруги
в електричних мережах; загальна методика вирішення задачі дворівневого
нечіткого регулювання напруги в розподільних електричних мережах;
комп'ютерне моделювання дворівневої нечіткої системи регулювання
напруги в розподільних електричних мережах; охорона праці; розрахунок
економічної ефективності впровадження дворівневої нечіткої системи
автоматичного регулювання напруги розподільних електричних мереж;
загальні висновки; перелік посилань

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Економічна частина</i>	<i>к.е.н., доц. Журило І.В.</i>		
<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>	4.10.21	
2	<i>Аналіз сучасного стану питань автоматичного регулювання напруги в електричних мережах</i>		
3	<i>Загальна методика вирішення задачі дворівневого нечіткого регулювання напруги в розподільних електричних мережах</i>	14.10.21	
4	<i>Комп'ютерне моделювання дворівневої нечіткої системи регулювання напруги в розподільних електричних мережах</i>	1.11.21	
5	<i>Охорона праці</i>	10.11.21	
6	<i>Розрахунок економічної ефективності впровадження дворівневої нечіткої системи автоматичного регулювання напруги розподільних електричних мереж</i>	18.11.21	
7	<i>Висновки</i>	21.11.21	
8	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	25.11.21	
9	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	29.11.21	
10	<i>Розрахунок економічної ефективності впровадження дворівневої нечіткої системи</i>	18.11.21	
11	<i>Висновки</i>	21.11.21	
12	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	25.11.21	
13	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	29.11.21	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2021 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2021 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Рожко А. О. Дворівнева нечітка система автоматичного регулювання напруги в розподільних електричних мережах.

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет. – м. Кропивницький, 2021 р.

Метою роботи є розробка законів регулювання напруги силових трансформаторів з пристроями регулювання напруги під навантаженням, реалізація яких дозволяла б досягти одночасного підвищення якості і надійності електропостачання.

В роботі проведено аналіз технічних засобів регулювання напруги, який засвідчив, що найбільш розповсюдженим технічним засобом є механічний пристрій регулювання напруги під навантаженням силового трансформатора. Визначено недоліки існуючих технічних засобів регулювання напруги а також їх систем автоматичного керування.

В роботі проведено розробку дворівневої нечіткої системи регулювання напруги розподільних електричних мереж. На основі апарату нечіткої логіки було створено математичну модель і алгоритм роботи блоку формування вагового коефіцієнту підстанції нижнього рівня. В якості алгоритму нечіткого виводу було застосовано алгоритм Мамдані. Результати комп'ютерного моделювання засвідчили про більш високу ефективність розробленої системи автоматичного керування в порівнянні з існуючими.

Результати роботи можуть бути використані під час проектування нових та експлуатації існуючих систем розподільних електричних мереж

Ключові слова: силовий трансформатор, нечітка логіка, система автоматичного керування, розподільна електрична мережа

THE SUMMARY

Rozhko A. O. Two-level fuzzy system of automatic voltage regulation in distribution electric networks.

Specialty 141 – "Electric power, electrical engineering and electromechanics". – "Electrical power consumption systems". – Central Ukrainian National Technical University. – Kropyvnytskyi, 2021

The aim of the work is to develop the laws of voltage regulation of power transformers with voltage regulation devices under load, the implementation of which would achieve a simultaneous increase in the quality and reliability of power supply.

The paper analyzes the technical means of voltage regulation, which showed that the most common technical means is a mechanical device for voltage regulation under the load of a power transformer. The shortcomings of the existing technical means of voltage regulation as well as their automatic control systems are identified.

The two - level fuzzy voltage regulation system of distribution electric networks is developed in the work. On the basis of the device of fuzzy logic the mathematical model and algorithm of work of the block of formation of weight coefficient of substation of the lower level was created. The Mamdani algorithm was used as a fuzzy inference algorithm. The results of computer simulations showed a higher efficiency of the developed automatic control system compared to the existing ones.

The results of the work can be used in the design of new and operation of existing distribution systems

Keywords: power transformer, fuzzy logic, automatic control system, electrical distribution network

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАНЬ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ.....	12
1.1 Види регулювання напруги в РЕМ.....	12
1.2 Регулювання напруги в РЕМ шляхом зміни коефіцієнта трансформації силових трансформаторів.....	17
1.2.1. Силові трансформатори з ПБЗ.....	18
1.2.2. Регулювання напруги з допомогою силових трансформаторів з механічними РПН.	19
1.2.3. Автоматичне регулювання напруги з допомогою силових трансформаторів, оснащених безконтактними пристроями РПН ...	31
1.3 Узагальнення результатів аналізу та постановка задач дослідження.....	37
Висновки до розділу	38
РОЗДІЛ 2 ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ДВОРІВНЕВОГО НЕЧІТКОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ.....	39
2.1 Постановка задачі автоматичного регулювання напруги в РЕМ.....	39
2.2 Розробка законів автоматичного регулювання напруги в РЕМ.....	42
2.2.1. Розробка закону автоматичного регулювання напруги для підстанції вищого рівня.....	42
2.2.2. Розроблення закону керування для дворівневої системи регулювання напруги в РЕМ	46
2.3 Вибір та обґрунтування математичного апарату, придатного для вирішення задачі керування режимом напруги в РЕМ.....	48
2.3.1. Нечітка арифметика та нечітка математика	49

	7
2.3.2. Нечіткі моделі.....	58
2.4 Математична модель та алгоритм роботи блоку розрахунку вагового коефіцієнту підстанції нижнього рівня.....	66
Висновки до розділу	75
РОЗДІЛ 3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДВОРІВНЕВОЇ НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ.....	75
3.1 Комп'ютерна імітаційна модель дворівневої нечіткої системи автоматичного регулювання напруги в РЕМ	79
3.2 Аналіз ефекту від застосування розробленої дворівневої нечіткої системи автоматичного регулювання напруги	87
Висновки до розділу	93
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ	95
4.1 Аналіз небезпечних факторів, та заходи по їх усуненню	95
4.2 Розрахунок параметрів контуру заземлення	95
Висновки до розділу	98
РОЗДІЛ 5 РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ДВОРІВНЕВОЇ НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ.....	99
5.1 Розрахунок капітальних витрат на провадження розробленої САК.....	99
5.2 Визначення річних експлуатаційних витрат	101
5.3 Розрахунок показників економічної ефективності	104
Висновки до розділу	105
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	106
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	108
ДОДАТКИ.....	113
ДОДАТОК А. Результати перевірки на плагіат.....	114

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

САК – система автоматичного керування

РЕМ – розподільна електрична мережа

ВН – сторона високої напруги трансформатора

НН – сторона низької напруги трансформатора

ПБЗ – пристрій перемикання відпайок без збудження силового трансформатора

РПН – пристрій регулювання напруги під навантаженням силового трансформатора

ПЯЕ – показник якості електричної енергії

ΔU_1 – усталене відхилення трифазної напруги в РЕМ

ВСТУП

В сучасних електричних мережах України показники якості електроенергії на затискачах споживачів рідко відповідають встановленим нормам.

Проблема забезпечення якості електричної енергії тісно пов'язана з питаннями надійності і збереженням ресурсу роботи електроенергетичного обладнання. При цьому, особливо вимогливі споживачі електроенергії можуть нормально функціонувати лише за умов високої якості напруги.

Основними технічними засобами регулювання напруги в розподільних електричних мережах є силові трансформатори, оснащені пристроями регулювання напруги під навантаженням (РПН). Для силових трансформаторів розроблено значну кількість пристроїв автоматичного регулювання напруги, проте всі вони здійснюють керування, яке спрямоване підвищення якості напруги на затискачах споживачі знижуючи при цьому надійність електропостачання, або навпаки, підвищують рівень надійності за рахунок погіршення якості електричної енергії. Ресурс роботи механічних контактів пристрою РПН порівняно малий, оскільки даний пристрій комутує робочі струми, а проведення ремонту пристрою РПН – це досить трудомістка і вартісна операція. Окрім того виникають значні збитки від припинення електропостачання споживачів. Всі ці обставини призводять до того, що оперативний персонал електричних підстанцій проводить перемикання відпайок силового трансформатора як можна рідше. Через це автоматичні регулятори напруги трансформаторів, як правило, відключаються, що призводить до значного зниження якості напруги та збільшення економічних збитків в розподільних електричних мережах (РЕМ)

Зважаючи на це, задача розроблення систем автоматичного регулювання напруги, які здійснювали б керування, спрямовані на одночасне підвищення і якості і надійності електропостачання є досить актуальною.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є розробка законів регулювання напруги силових трансформаторів з пристроями РПН, реалізація яких дозволяла б досягти одночасного підвищення якості і надійності електропостачання.

Для досягнення поставленої в роботи мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Провести аналітичний огляд існуючих методів і технічних засобів регулювання напруги силових трансформаторів з РПН.
2. Розробити закони автоматичного регулювання напруги силових трансформаторів з РПН.
3. На основі розроблених законів регулювання напруги розробити математичні моделі систем автоматичного регулювання напруги силових трансформаторів РПН.
4. Провести аналіз ефекту від можливого застосування розроблених систем автоматичного регулювання напруги в РЕМ.
5. Провести техніко-економічне порівняння систем автоматичного керування, що реалізують розроблені в роботі закони регулювання напруги та визначити їх економічні показники ефективності.

Об'єктом дослідження є процес регулювання напруги на затискачах споживачів в РЕМ.

Предметом дослідження є процес автоматичного регулювання напруги в РЕМ з допомогою пристроїв РПН силових трансформаторів.

Методи дослідження. Розв'язання поставлених в роботі задач відбувалося із використанням методів комп'ютерного імітаційного моделювання, методів теорії автоматичного керування, методів нечіткого керування, методів теорії електричних кіл.

Основні наукові результати роботи:

1. Здійснено обґрунтування законів автоматичного керування дворівневою системою регулювання напруги в РЕМ, реалізація яких

дозволяє досягти одночасного підвищення рівня надійності роботи мереж та якості напруги на затискачах споживачів.

2. Обґрунтовано використання математичного апарату нечіткої логіки для розробки алгоритмів знаходження вагових коефіцієнтів для підстанцій нижнього рівня розподільної електричної мережі реалізація яких враховує фактори, що впливають на режими РЕМ.

3. Розроблено комп'ютерну модель дворівневої системи автоматичного регулювання напруги в РЕМ, яка дозволяє здійснювати аналіз їх роботи та визначити ефект від застосування цих законів.

Основні практичні результати. Практична цінність роботи заключається у підвищенні рівня надійності роботи РЕМ та у підвищенні якості регулювання напруги. Основні практичні результати роботи:

- методику визначення бази правил для системи нечіткого виводу, що призначена для знаходження вагових коефіцієнтів трансформаторних підстанцій нижнього рівня;

- комп'ютерну модель САК дворівневою системою автоматичного регулювання напруги в РЕМ.

Загальна характеристика наукової роботи. Кваліфікаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Повний обсяг роботи складає 114 сторінок. Основна частина викладена на 99 сторінках друкованого тексту, містить 62 рисунки та 5 таблиць. Список використаних джерел містить 41 джерело та викладений на 5 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАНЬ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Для ефективної передачі та розподілу електроенергії в РЕМ потрібно здійснювати автоматичне керування напругою. Найбільш простим методом регулювання напруги в мережі є зміна коефіцієнта трансформації силового трансформатора. Даний метод реалізується за допомогою різних технічних засобів, найбільш досконалим з яких є пристрій РПН трансформатора, що дозволяє проводити автоматичне регулювання напруги.

Проведений в роботі аналіз літературних джерел, результати якого наведені в першому розділі, спрямований на визначення можливостей підвищення якості електроенергії в РЕМ та підвищення їх надійності за рахунок удосконалення методів автоматичного керування пристроєм РПН трансформатора а також розроблення з цією метою відповідного математичного апарату.

1.1 Види регулювання напруги в РЕМ

Для забезпечення значення рівня напруги на затискачах електроспоживача в допустимих межах в різних точках електричної мережі здійснюється регулювання напруги. Таке регулювання може бути як централізованим так і локальним [12].

Централізоване регулювання напруги здійснюється у вузлах електричних мереж і застосовується при живленні великої кількості споживачів електроенергії. В такому регулюванні виділяють три підходи: стабілізація напруги, двоступеневе регулювання напруги та зустрічне регулювання напруги.

Стабілізація напруги використовується для споживачів з незмінним навантаженням. Добовий графік електричних навантажень таких споживачів показаний на рис. 1.1.



Рис. 1.1. Добовий графік електричних навантажень для споживачів з незмінним навантаженням

Для електроспоживачів з чітко вираженим двоступеневим графіком навантаження (рис. 1.2) застосовують двоступінчасте регулювання напруги.

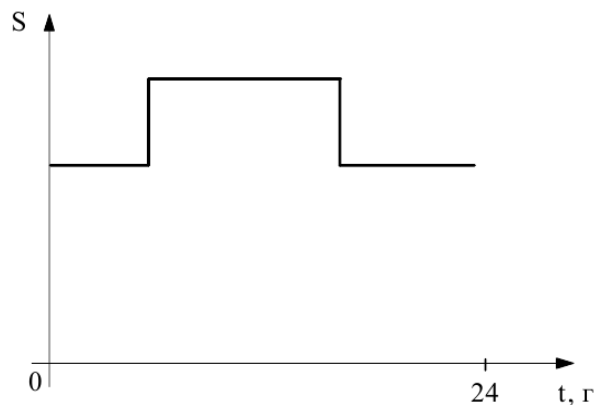


Рис. 1.2. Добовий графік електричного навантаження для споживачів з двоступінчастим навантаженням

В цьому випадку підтримуються два значення рівнів напруги на затискачах електроспоживачів впродовж доби, що відповідають їх графіку електричного навантаження.

Для випадку змінного на протязі доби електричного навантаження (рис. 1.3) застосовується зустрічне регулювання напруги.

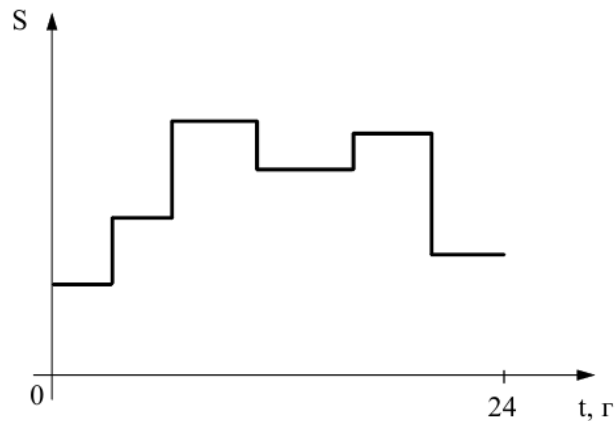


Рис. 1.3. Добовий графік електроспоживачів із змінним навантаженням

Кожне із значень електричного навантаження має своє значення втрати напруги, і, як наслідок, напруга буде змінюватись в залежності від зміни навантаження. Для того, щоб усталені відхилення напруги не виходили за допустимі межі, необхідно здійснювати регулювання напруги в залежності від значення струму навантаження.

Для детального аналізу методу зустрічного регулювання напруги розглянемо схему, зображену на рис. 1.4, а, де.

На рис. 1.4, а:

U_1 – напруга на шинах центру живлення;

$U_{2В}$ – напруга на шинах високої напруги районної підстанції;

$U_{2Н}$ – напруга на шинах низької напруги районної підстанції;

U_3 – напруга на затискачах споживачів.

Напруга на шинах ВН районної підстанції розраховується за формулою:

$$U_{2В} = U_1 - \Delta U_{\tau}. \quad (1.1)$$

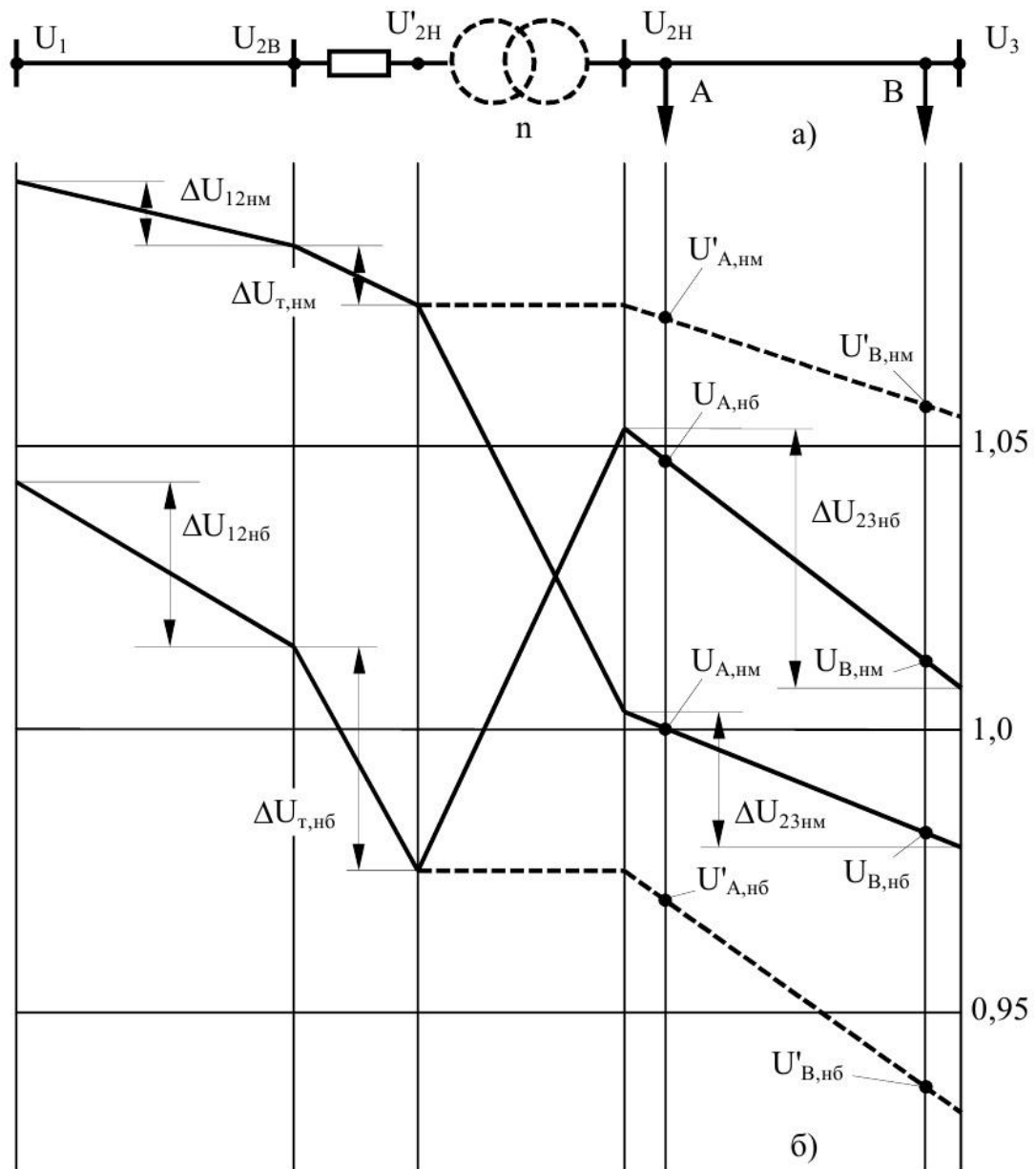


Рис. 1.4. Ілюстрація до методу зустрічного регулювання напруги:

а – схема заміщення; б – графіки розподілення (епюри) напруг

Значення напруги на шинах ВН і НН різняться на величину втрат напруги в силовому трансформаторі ΔU_T ,

На рис. 1.4, б наведені графіки зміни напруги для двох режимів роботи РЕМ: найменших та найбільших навантажень. При цьому по осі абсцис відкладені значення втрати напруги, а по осі ординат – значення усталених відхилень напруги.

З графіку, зображеному на рис. 1.4, б (пунктирні лінії) можна побачити, що при $n = 1$ в режимі мінімальних електричних навантажень напруга на затискачах споживачів буде вище, а в режимі максимальних електричних навантажень – нижче за допустиме значення. При цьому приймачі електроенергії, що приєднані до мережі низької напруги (точки А і В), будуть працювати в недопустимих умовах. Змінюючи коефіцієнт трансформації силового трансформатора районної підстанції n , змінюється напруга U_{2H} , тобто відбувається регулювання напруги на затискачах споживачів.

В режимі мінімальних навантажень підвищується коефіцієнт трансформації трансформатора n , що призводить до зменшення вторинної напруги U_{2H} до значення, близького до $1,0U_{ном}$. В такому режимі вибирається таке найбільше значення n , щоб виконувалась наступна умова:

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

В режимі максимальних навантажень знижується n , що призводить до збільшення напруги U_{2H} до значення, близького до $1,05U_{ном}$. В такому режимі вибирається таке найбільше значення n , щоб була справедливою наступна умова:

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

В результаті цього напруга на затискачах як віддалених, так і близькорозташованих споживачів вводиться в допустимі межі. За такого регулювання в режимі максимальних навантажень напруга підвищується, а в режимі мінімальних навантажень – понижується. Саме тому такий спосіб автоматичного регулювання називається зустрічним.

Локальний регулювання напруги відбувається безпосередньо на затискачах споживача і поділяється на групове та індивідуальне.

Класифікація найбільш поширених методів регулювання напруги в розподільних електричних мережах приведена на рис. 1.5.

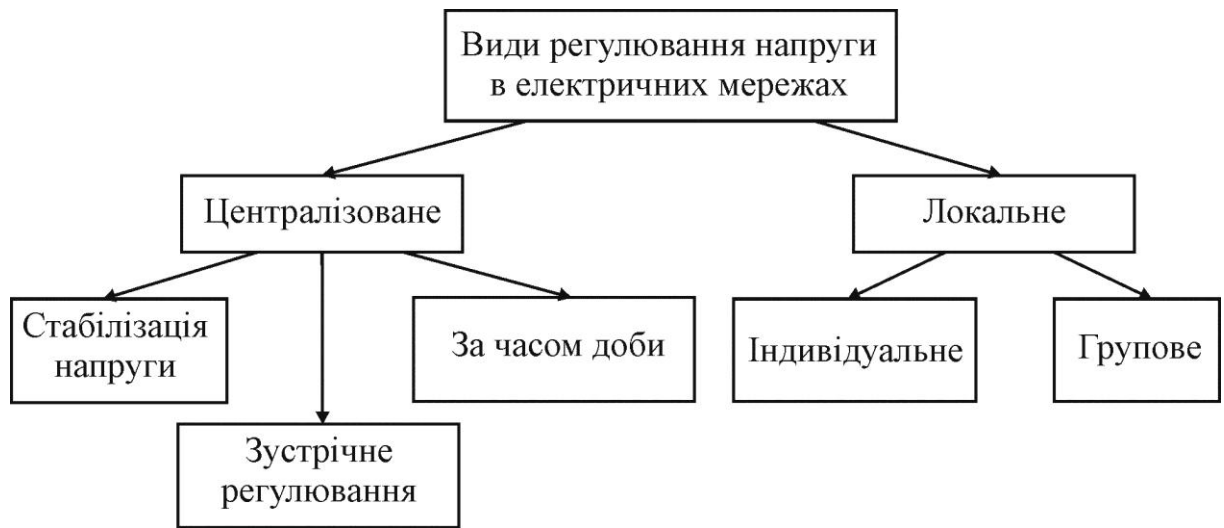


Рис. 1.5. Класифікація основних методів регулювання напруги в РЕМ

1.2 Регулювання напруги в РЕМ шляхом зміни коефіцієнта трансформації силових трансформаторів

Основним технічним засобом регулювання напруги в РЕМ є трансформатори районних підстанцій, адже вони можуть узгодити вимоги до значень напруги близьких та віддалених споживачів [12 – 14].

Трансформатори можуть бути підключені в різних точках електричних мереж, в яких режим напруги заздалегідь невідомий і може змінюватись в процесі експлуатації РЕМ. Тому силові трансформатори мають окрім основних ще і додаткові відгалуження для регулювання. Змінюючи підключення цих відгалужень можна змінювати значення коефіцієнту трансформації (в межах 10 – 20 %).

За конструктивним виконанням виділяють трансформатори двох типів:

- трансформатори з перемиканням регулювальних відгалужень без збудження (трансформатори з ПБЗ);

- трансформатори з перемиканням регулювальних відгалужень під навантаженням (трансформатори з РПН).

Як правило, регулювальні відгалуження розміщуються на стороні високої напруги трансформатора, яка має менше значення робочого струму.

1.2.1. Силкові трансформатори з ПБЗ. В теперішній час трансформатори з ПБЗ виробляють з основним і 4-ма додатковими відгалуженнями. Принципова схема трансформатора з ПБЗ приведена на рис. 1.6.

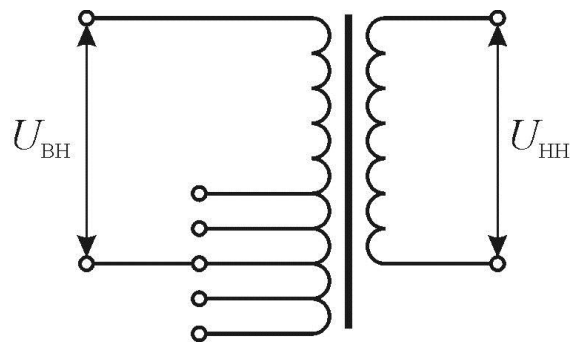


Рис. 1.6. Принципова схема силового трансформатора з ПБЗ

Основне відгалуження має напругу, що дорівнює номінальній напрузі мережі, до якої приєднаний трансформатор (6 кВ, 10 кВ, 20 кВ). При використанні основного відгалуження коефіцієнт трансформації силового трансформатора називається номінальним. При застосовуванні чотирьох додаткових відгалужень коефіцієнт трансформації силового трансформатора відрізняється від номінального відповідно на +5 %, +2,5 %, –2,5 % і –5 %.

Для здійснення перемикання регулювального відгалуження необхідно відключити трансформатор від електричної мережі. Ці перемикання виконуються рідко, як правило лише при сезонній зміні електричних навантажень. Тому в режимі максимальних і мінімальних навантажень впродовж доби трансформатор з ПБЗ працює із одним регулювальним відгалуженням, і відповідно з незмінним коефіцієнтом трансформації.

Зважаючи на це з допомогою такого трансформатора неможливо реалізувати зустрічне регулювання напруги, що є його основним .

1.2.2. Регулювання напруги з допомогою силових трансформаторів з механічними РПН. Трансформатори з вбудованим пристроєм РПН [15 – 18] відрізняються від трансформаторів з пристроєм ПБЗ наявністю перемикаючого пристрою та збільшеною кількістю регулювальних відгалужень і, як наслідок, діапазоном регулювання.

Більш досконалим, в порівнянні з ПБВ є спосіб зміни відгалужень трансформатора без відімкнення його обмоток від мережі. Такий спосіб регулювання напруги застосовується у трансформаторах з пристроєм РПН. [6, 9, 15 – 17]. Трансформатори з пристроями РПН мають більшу кількість регулюючих відгалужень, через що збільшується діапазон регулювання напруги, який знаходиться у межах $\pm 10\% \dots \pm 16\%$ з кроком регулювання $1,25\% \dots 2,5\%$ [6, 14]. Так, для трансформатора ТМН-10000/35 передбачено діапазон регулювання $\pm 11,7\%$ при наявності ± 9 ступенів регулювання з кроком $1,3\%$ кожна [18]. Зважаючи на те, що перемикання регулюючих відгалужень трансформатора з пристроєм РПН відбувається без розімкнення струмових ланцюгів, такі перемикання можна здійснювати протягом доби. Це дозволяє реалізовувати за допомогою трансформаторів з пристроями РПН різні закони автоматичного регулювання напруги.

Найпоширенішими у вітчизняних РЕМ є трансформатори з механічними пристроями РПН. На рис. 1.7 наведена принципова схема знижувального силового трансформатора з пристроєм РПН [14, 19, 20].

Обмотка високої напруги трансформатора з пристроєм РПН складається з двох частин – регулюючої і нерегульованої. Регулююча частина має кілька відгалужень 1 – 7. Частина регулюючої обмотки з відгалуженнями 1 – 3 під'єднана узгоджено з основною обмоткою, зміна відгалуження 3 на відгалуження 2 збільшує значення коефіцієнту трансформації.

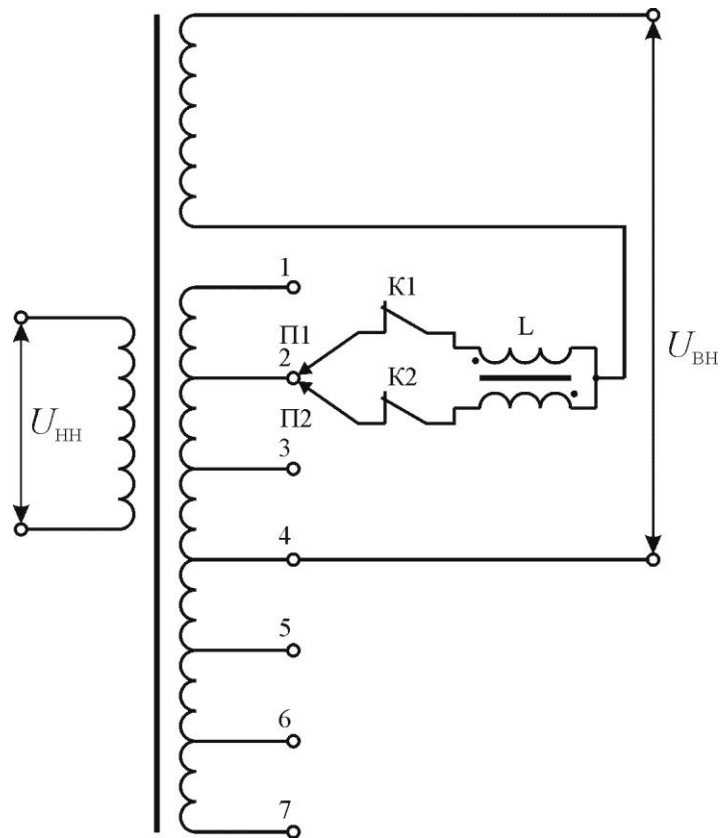


Рис. 1.7. Принципова схема силового трансформатора з пристроєм РПН

Інша частина регулюючої обмотки (відгалуження 5 – 7) підключена зустрічно з основною обмоткою. Зміна відгалуження 5 на відгалуження 7 зменшує значення коефіцієнту трансформації. Кількість регулюючих відгалужень обмотки, ввімкнених узгоджено та зустрічно з основною обмоткою, може не однаковою.

Пристрій перемикання регулюючої частини обмотки складається із контакторів K1, K2, рухомих контактів П1, П2 і реактора L, що слугує для обмеження струму. Середня точка цього реактора з'єднана з нерегульованою частиною обмотки силового трансформатора.

Для обмеження значення струму короткого замикання, який протікає по частині обмотки, що замкнута накоротко в середньому положенні, можуть застосовуватись активні опори.

Недоліками трансформаторів з пристроями РПН є їх висока вартість і обмежена кількість перемикачів, що негативно впливає якість регулювання.

В роботі [19] запропоновано трансформатор, що має дві гілки грубого регулювання та одну гілку точного регулювання. Зміна напруги відбувається за рахунок з'єднання регулювальних гілок в різних комбінаціях. Такий спосіб регулювання напруги більш складний для реалізації, оскільки для одержання різних варіантів з'єднання регулювальних гілок потрібно встановлювати досить складний пристрій перемикання.

Трансформатори з пристроями РПН оснащуються автоматичними регуляторами, що реалізують певний закон регулювання напруги.

Найбільш простим законом регулювання напруги є регулювання напруги за відхиленням. Пристрій, описаний в роботі [20] реалізує такий цей регулювання. Функціональна схема зазначеного пристрою приведена на рис. 1.8.

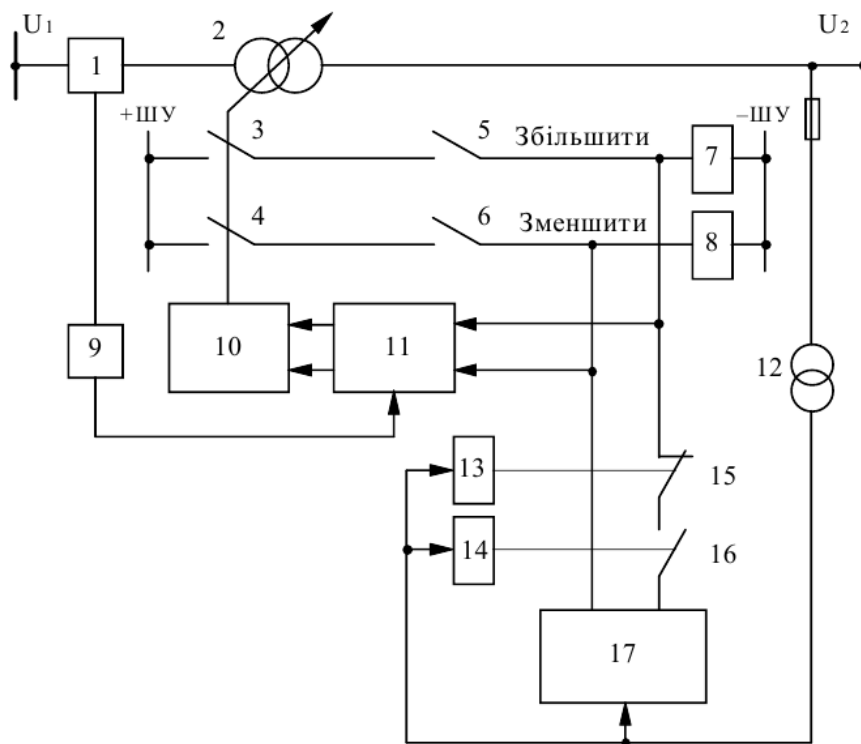


Рис. 1.8. Схема пристрою регулювання напруги трансформатора з РПН

Описаний в роботі [20] пристрій для регулювання напруги трансформаторів не враховує зміну навантаження споживачів. Через це за

допомогою даного пристрою неможливо реалізувати зустрічне регулювання напруги.

Пристрій для регулювання напруги вузла РЕМ, що дає змогу врахувати навантаження споживачів описаний в роботі [21]. Функціональна схема цього пристрою приведена на рис. 1.9.

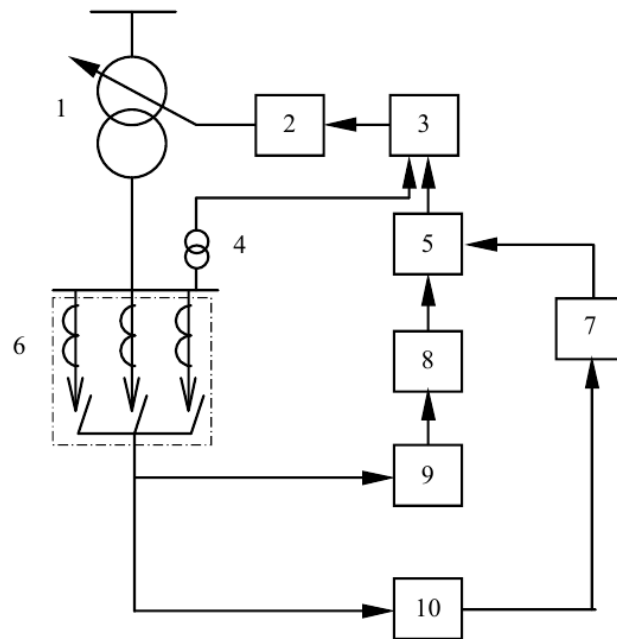


Рис. 1.9. Схема пристрою автоматичного регулювання напруги вузла РЕМ

Недоліком даного пристрою є те, що при частих коливаннях навантаження кількість перемикачів пристрою РПН трансформатора буде великою. Це, в свою чергу, призведе до швидкого спрацювання ресурсу пристрою РПН силового трансформатора.

На підстанціях РЕМ широко застосовуються пристрої автоматичного регулювання напруги трансформаторів типу АРТ-1Н [23]. Перевагою даний пристроїв є підвищення стійкості регулювання за рахунок наявності затримки сигналу на перемикач. За рахунок цього досягається відсутність реакції системи керування на короточасні коливання напруги, і, як наслідок, підвищується надійність роботи системи в цілому. Окрім цього даний пристрій дозволяє проводити дистанційну зміну уставки, що часто використовується в системах регулювання напруги, що побудовані на основі

цього регулятора [24, 25]. Проте цей пристрій не визначає напрямок зміни напруги внаслідок чого він виконує зайві перемикання пристроєм РПН трансформатора, що негативно відображається на його ресурсі. Також пристрій АРТ-1Н не в змозі швидко реагувати на великі значення відхилення напруги, що призводить до зниження якості регулювання напруги.

Спосіб регулювання напруги трансформатора, що описаний в роботі [26], передбачає автоматичну зміну уставки регулятора при перевищенні значенням напруги струмової компенсації певного граничного значення. Такий підхід запобігає недопустимому підвищенню напруги на споживачах при великому значенні струму навантаження лінії. Функціональна схема пристрою, який реалізує цей спосіб, наведена на рис. 1.10.

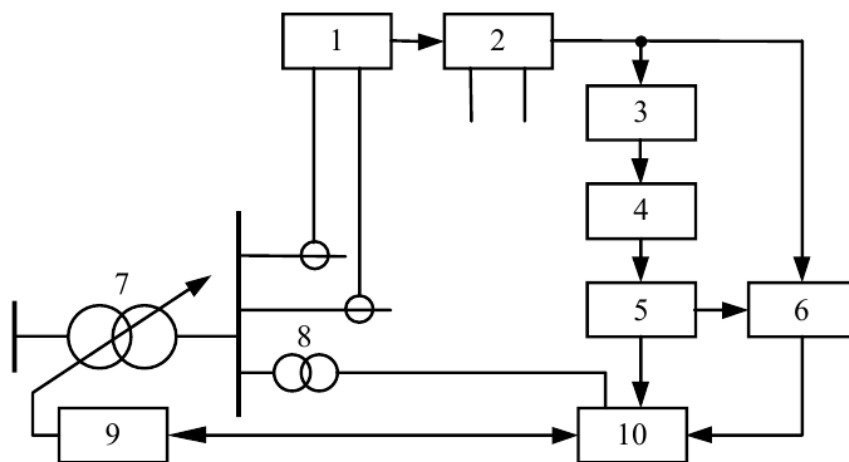


Рис. 1.10. Схема пристрою регулювання напруги трансформатора

В цьому пристрої пусковий орган 3 виконує порівняння сумарної напруги струмової компенсації із максимально допустимим її значенням. При перевищенні значення цієї пруги пристрій подає сигнали через блок затримки 4 на виконавчий орган 5, що генерує команду на зміну уставки блоку регулювання 10 та сигнал блокування роботи струмової компенсації, що надходить на елемент блокування струмової компенсації 6. При зменшенні значення сумарної напруги струмової компенсації до значення,

що менше за максимально допустиме, даний пристрій повертає блок регулювання 10 в нормальний роботи.

Аналогічний спосіб регулювання напруги реалізований в пристрої для автоматичного регулювання напруги вузла РЕМ [27]. Функціональна схема даного пристрою приведена на рис. 1.11.

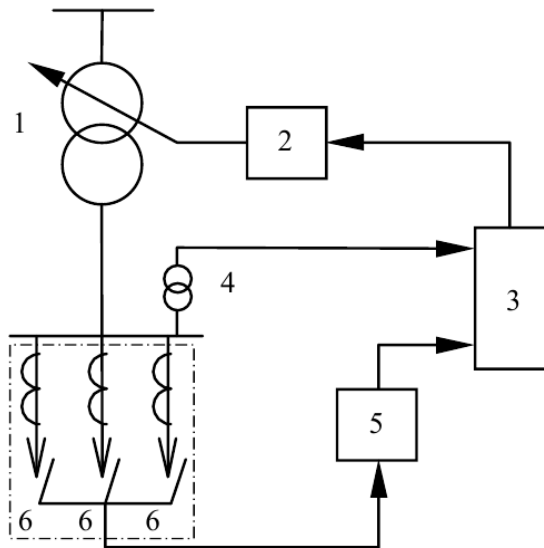


Рис. 1.11. Схема пристрою для автоматичного регулювання напруги

Цей пристрій в режимі найменших навантажень здійснює регулювання напруги за усередненими значеннями відхиленнями напруги. При збільшенні навантажень до найбільших значень відбувається перехід до автоматичного регулювання за граничними значеннями відхилення напруги у вузлах РЕМ. Якість регулювання напруги на споживачах РЕМ підвищується за рахунок зменшення кількості електричної енергії, яка споживається за межами допустимого діапазону зміни напруги, при зміні електричного навантаження в широких межах.

Обидва пристрої, що описані вище змінюють уставку регулятора напруги АРТ-1Н, тому мають ідентичні обмеження.

В роботі [29] описаний пристрій регулювання напруги вузла РЕМ за критерієм мінімізації економічних збитків від неякісної електроенергії. Функціональна схема даного пристрою показана на рис. 1.12.

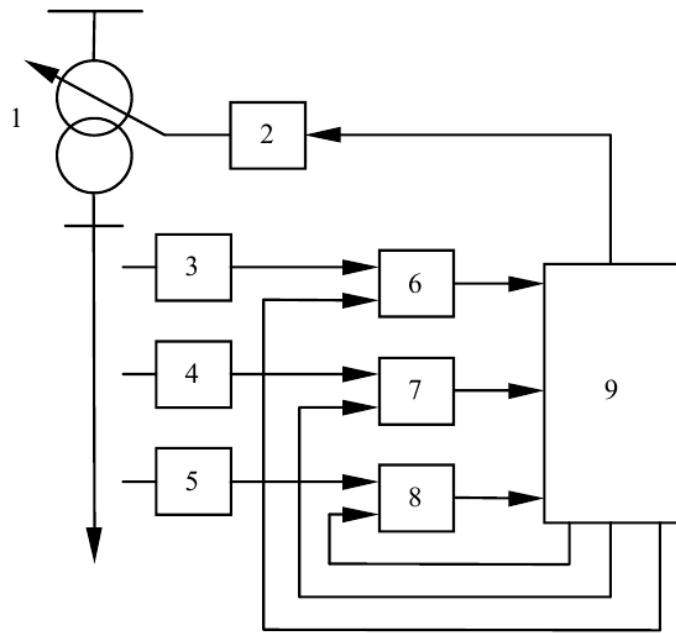


Рис. 1.12. Схема пристрою для регулювання напруги вузла РЕМ

З датчиків напруги 3, активної потужності 4 та реактивної потужності 5 через АЦП 6–8 здійснюється синхронне введення параметрів режиму РЕМ, – напруги U , активної потужності P і реактивної потужності Q в мікроконтролер 9, в якому за заданою програмою розраховується:

– усталене відхилення поточного значення від номінального значення напруги

$$V = U - U_{\text{н}}; \quad (1.4)$$

– економічну характеристику вузла навантаження РЕМ

$$y(V) = \alpha V^2 + \beta V + c, \quad (1.5)$$

де α , β і c – коефіцієнти, що залежать від режиму роботи РЕМ і складу обладнання у вузлі

$$\alpha = f(Q, P), \quad \beta = f(P, Q); \quad (1.6)$$

– функцію належності нечіткого обмеження усталених відхилень напруги

$$M_n(V) = \begin{cases} 0, & V \leq a; \\ \frac{\max : y(V_i) - y(V_i)}{\max : y(V_i) - \min : y(V_i)}, & V \in [a, b]; \\ 0, & V > b, \end{cases} \quad (1.7)$$

де a і b – значення гранично допустимих величин усталеного відхилення напруги;

$\max : y(V_i)$, $\min : y(V_i)$ – макс. і мін. значення функції економічних збитків в межах допустимих значень усталених відхилень напруги;

– оптимальне значення усталеного відхилення напруги для вузла навантаження

$$V_{\text{опт}} = \text{opt } M(V); \quad (1.8)$$

– гістограму усталених відхилень напруги як густину розподілу ймовірностей $P(V)$;

– значення нечіткого інтегралу:

$$F = f[M(V)]. \quad (1.9)$$

Перемикання відпайок проводиться тільки в тому випадку, коли воно спричинить значне зниження збитків від неякісної електроенергії. Цим досягається зменшення кількості перемикачів РПН.

Аналогічний спосіб регулювання напруги з простішою реалізацією реалізовує пристрій, описаний в роботі [30]. Як і пристрої, описані вище,

такий спосіб регулювання не в змозі швидко реагувати на значне різке відхилення напруги в РЕМ.

Спосіб регулювання напруги за залежностями струму від напруги в описаний в роботі [31]. Цей спосіб полягає в тому, що за відомими залежностями $f_n = I(U)$ в центрі живлення для характерних режимів РЕМ визначається оптимальна залежність за мінімумом втрат електричної енергії з врахуванням обмежень напруги, і за виміряними значеннями I та U поточний режим ідентифікується з одним з n попередньо розрахованих характерних режимів. Згідно оптимальної залежності визначається оптимальна напруга для режиму i здійснюється перемикання пристрою РПН з попередньою перевіркою його допустимості. Функціональна схема такого пристрою, що реалізує цей спосіб, приведена на рис. 1.14.

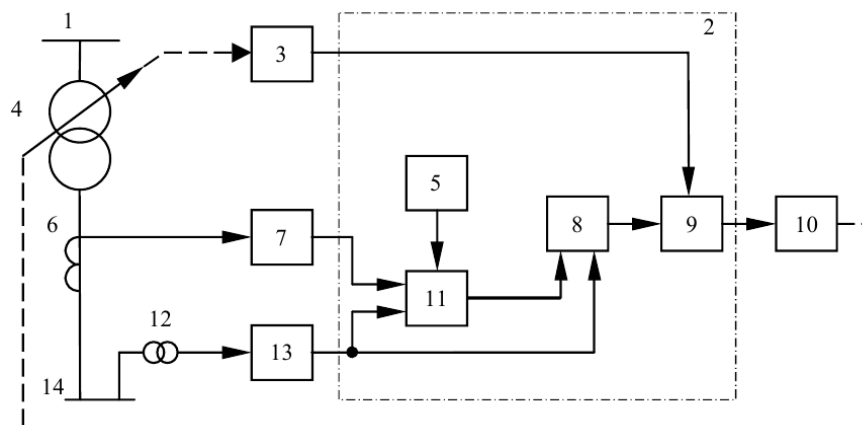


Рис. 1.13. Схема пристрою регулювання напруги РЕМ

Кожному з характерних режимів РЕМ відповідає значення напруги, за якого втрати електроенергії енергії мінімальні. Ці значення зберігаються в пам'яті мікроконтролера керування 2. Значення напруги і струму на стороні НН трансформатора 4 неперервно контролюються з допомогою датчиків напруги 12 і струму 6. Ці значення надходять через АЦП 7 і 13 в блок 2 мікроконтролеру керування. В блоці 2 проходить ідентифікація поточного режиму РЕМ з одним із попередньо розрахованих характерних режимів

роботи даної РЕМ і за відомими залежностями розраховуються значення оптимальної напруги, що відповідає мінімуму втрат електричної енергії в усіх елементах РЕМ.

Використання даного способу регулювання напруги дає можливість зменшити кількість перемикачів пристрою РПН трансформатора і тим самим покращити надійність енергопостачання. Проте, використовувати описаний спосіб доцільно лише в РЕМ з незмінною структурою, для яких можливо розрахувати характерні режими.

В роботі [34] пропонується в процесі регулювання напруги підтримувати задане співвідношення усталених відхилень напруги на сторонах ВН та НН силового трансформатора. Такий підхід дозволяє отримати сумарно кращу якість напруги в обох приєднаних мережах. Ця мета досягається за рахунок того, що окрім сигналу усталеного відхилення напруги вторинної обмотки трансформатора вводиться сигнал усталеного відхилення напруги первинної обмотки. Схема пристрою, що реалізує описаний спосіб регулювання напруги РЕМ приведена на рис. 1.14.

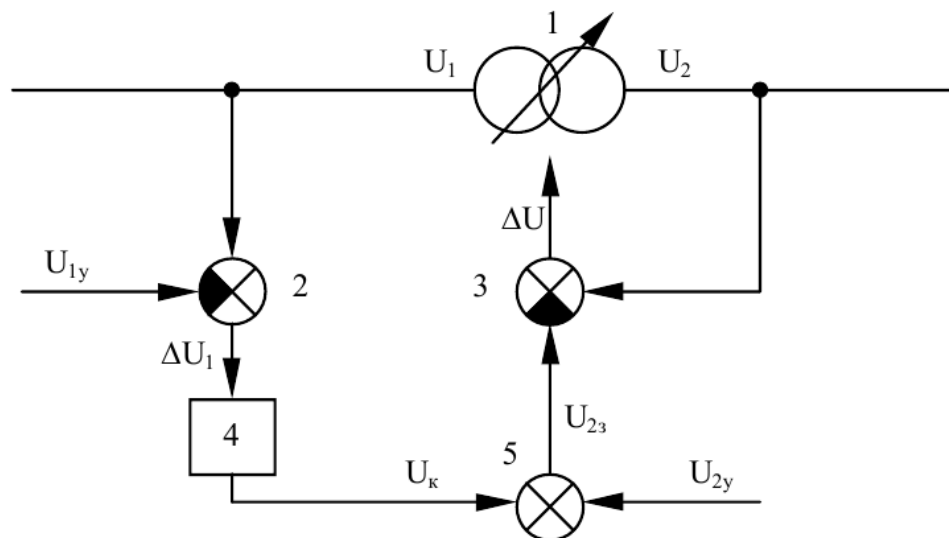


Рис. 1.14. Схема пристрою регулювання напруги в РЕМ

Закон автоматичного регулювання напруги згідно запропонованого способом має такий вигляд:

$$\begin{cases} \Delta U = U_2 - U_{23} = 0; \\ U_{23} = U_{2y} + U_k; \\ U_k = \alpha \Delta U_1; \\ \Delta U_1 = U_1 - U_{1y}; \\ \Delta U_2 = U_2 - U_{2y} \end{cases} \quad (1.10)$$

Після проведення перетворень отримується вираз:

$$\Delta U_2 = \alpha \Delta U_1. \quad (1.11)$$

Отже, при зниженні напруги на стороні ВН вторинна напруга також підтримується на зниженому рівні, що сприяє зменшенню усталеного відхилення напруги на первинній стороні. Разом з цим співвідношення усталених відхилень напруг двох обмоток трансформатора із-за наявності коефіцієнта α отримується рівним заданому.

Такий спосіб регулювання напруги підвищує сумарну якість напруги обох РЕМ, але знижує якість напруги на затискачах кінцевих споживачів, що не завжди є виправданим.

Спосіб регулювання напруги РЕМ з врахування напруги первинної обмотки трансформатора і струмів споживачів запропоновано в роботі [35]. Коефіцієнт трансформації трансформатора змінюють в залежності від значення відхилення напруги на його вторинній обмотці від заданого значення, що змінюється в залежності від певного коректуючого сигналу. Разом з цим вимірюється напругу первинної обмотки трансформатора, порівнюється із заданою напругою і одержане відхилення використовується як коректуючий сигнал. Окрім цього вимірюється значення струмів в кожній із груп однотипних споживачів, коректується в залежності від економічних характеристик споживачів, перетворюється в значення напруги і отримані

значення відхилення використовуються як додаткові коректуючі сигнали. Зважаючи на те, що напрям зміни напруги після виходу значень за межі зони нечутливості не враховується, то під час регулювання з'являються надлишкові перемикання, що скорочує термін роботи пристрою РПН трансформатора.

В автоматичному регуляторі напруги силових трансформаторів, описаному в роботі [38] передбачається визначення знаку похідної огинаючої напруги. Це дає змогу зменшити кількість спрацювань пристрою РПН трансформатора і підвищити надійність електропостачання. Функціональна схема цього регулятора приведена на рис. 1.15.

В даному пристрої сигнал переключення відпайки обмотки трансформатора в бік зменшення відхилення напруги з'являється лише тоді, коли напруга знаходиться поза межами зони нечутливості протягом часу τ і вона не має тенденцій до повернення в цю зону. Ця умова реалізується в блоці визначення похідної огинаючої напруги.

З допомогою блоків 16–19 відбувається діагностування схеми регулятора і електропривода. У випадку несправності робота описаного регулятора блокується.

Визначення значення похідної огинаючої напруги дає здатність уникнути зайвих перемикань пристрою РПН у випадках, коли значення напруги виходить за межі зони нечутливості, проте під дією зовнішніх факторів повертається до неї.

Обмеженням роботи даного способу регулювання напруги є те, що під час їх застосування неможливо швидко повертати напругу до нормального значення при значних значеннях її відхиленнях. Це пов'язане з тим, що кожне перемикання пристрою РПН трансформатора затримується на час τ . Через це знижується якість регульованої напруги.

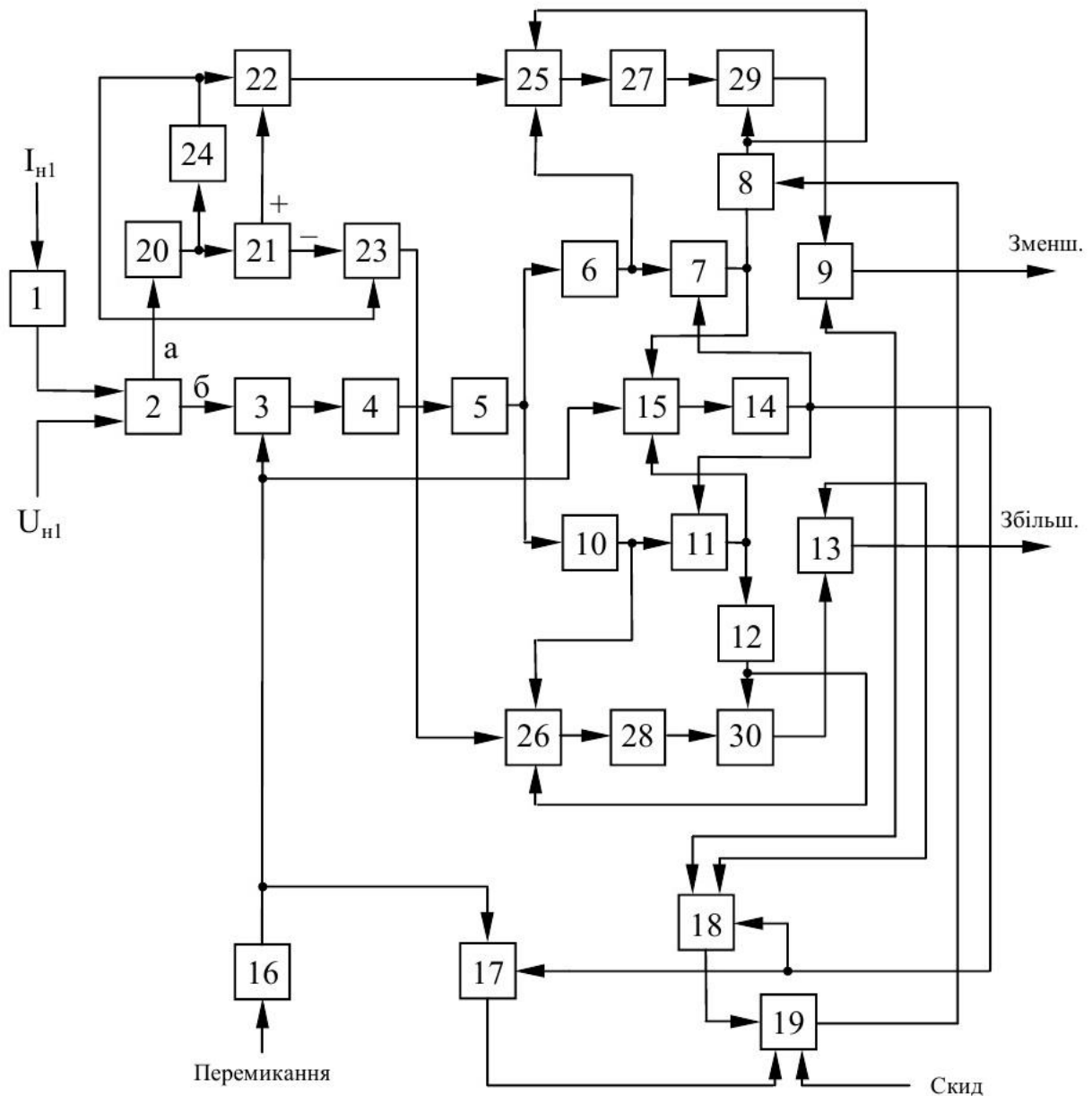


Рис. 1.15. Функціональна схема автоматичного регулятора для силових трансформаторів

1.2.3. Автоматичне регулювання напруги з допомогою силових трансформаторів, оснащених безконтактними пристроями РПН. Пристрій РПН силового є елементом з досить обмеженим ресурсом перемикавання. Окрім цього час перемикавання відпайки складає більше 5 с [49]. Зазначені недоліки відсутні в безконтактних пристроях РПН, в яких застосовуються напівпровідникові пристрої (силові ключі) [50].

Трансформатори, оснащені цими пристроями, мають час переключення відпайки ≥ 10 мс, що сприяє покращенню динамічної стійкості системи регулювання напруги [49].

В роботі [51] описано пристрій для регулювання напруги, в якому для переключення відпайок застосовуються напівпровідникові силові ключі. Схема пристрою приведена на рис. 1.16.

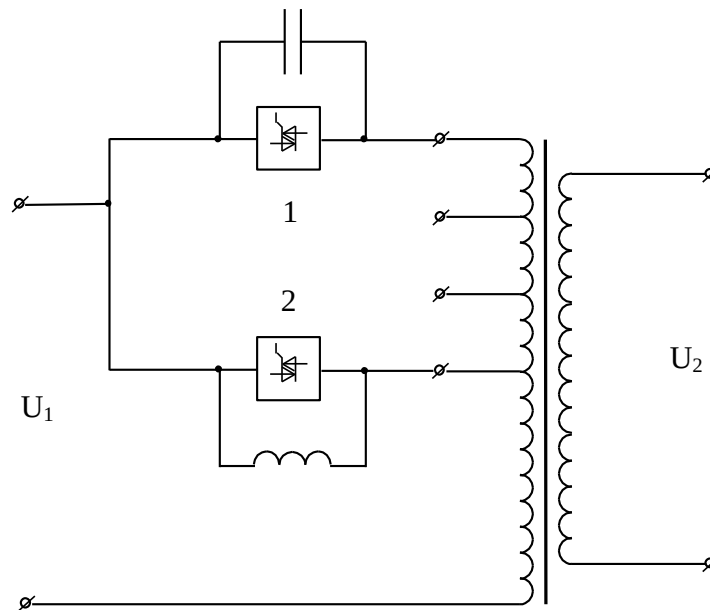


Рис. 1.16. Схема пристрою регулювання змінної напруги

В режимі найменших навантажень ключ 1 включений, а ключ 2 – виключений, і напруга на вторинній обмотці силового трансформатора мінімальна. При найбільшому навантаженні ключ 1 вимикається, а ключ 2 вимикається, і напруга на вторинній обмотці найбільша. В проміжних режимах напруга підтримується, зміною кутів керування ключів 1 і 2.

Описаний пристрій не забезпечує захист напівпровідникових ключів від струмів коротких замикань. Окрім цього в проміжних режимах роботи в РЕМ з'являються вищі гармоніки. fdfadsf

В роботі [52] запропоновано пристрій для переключення відгалужень трансформатора із використанням симісторних ключів [53 – 55]. На рис. 1.17 показана функціональна схема зазначеного пристрою.

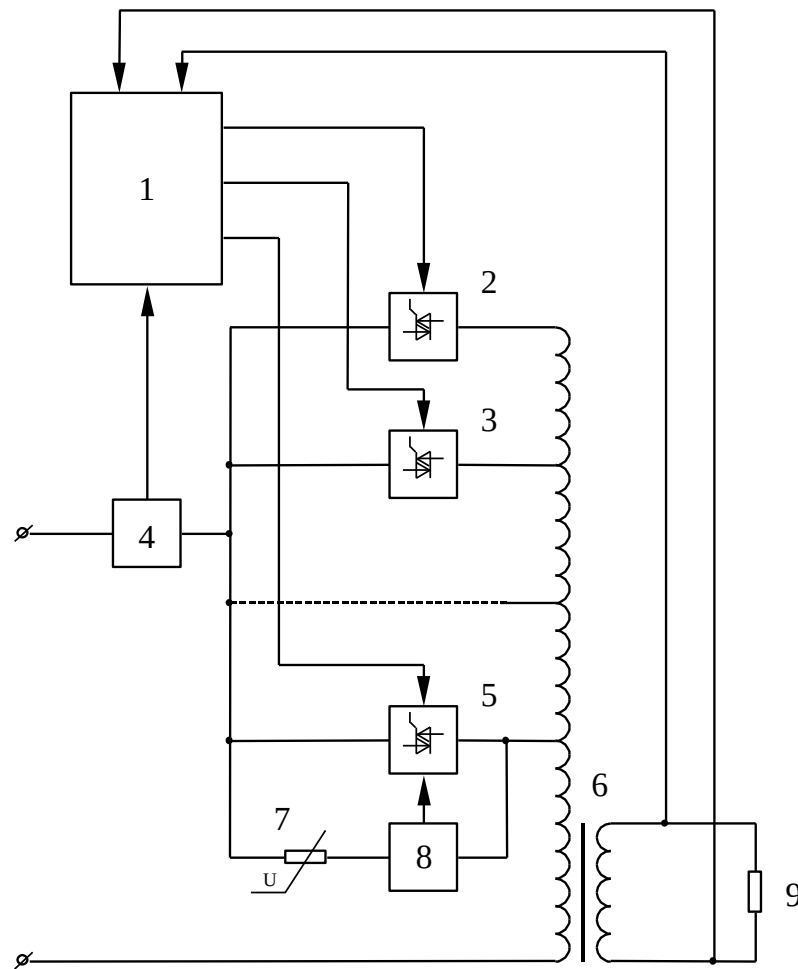


Рис. 1.17. Схема пристрою для перемикання відгалужень трансформатора

В нормальному режимі роботі пристрою система автоматичного керування 1 генерує імпульси на один із симісторних ключів 2, 3, 5, вмикаючи його. При появі короткого замикання датчик 4 надсилає сигнал системі автоматичного керування 1. Остання зупиняє подачу імпульсів керування, симісторний ключ, що працює, вимикається, варистор 7 розпочинає пропускати струм, що живить формувач 8, який подає сигнал на ключ 5 і він пропускає через себе зазначений аварійний струм. Після усунення к. з. система керування 1 знову повертається до нормальної роботи.

Недоліком даного пристрою є неврахування струмової компенсації в процесі регулювання.

В пристрої для регулювання напруги, описаному в роботі [56], первинна обмотка трансформатора містить дві групи обмоток, кожна з яких секціонована. Комутація виконується за допомогою тиристорних ключів. Схема даного пристрою показана на рис. 1.18.

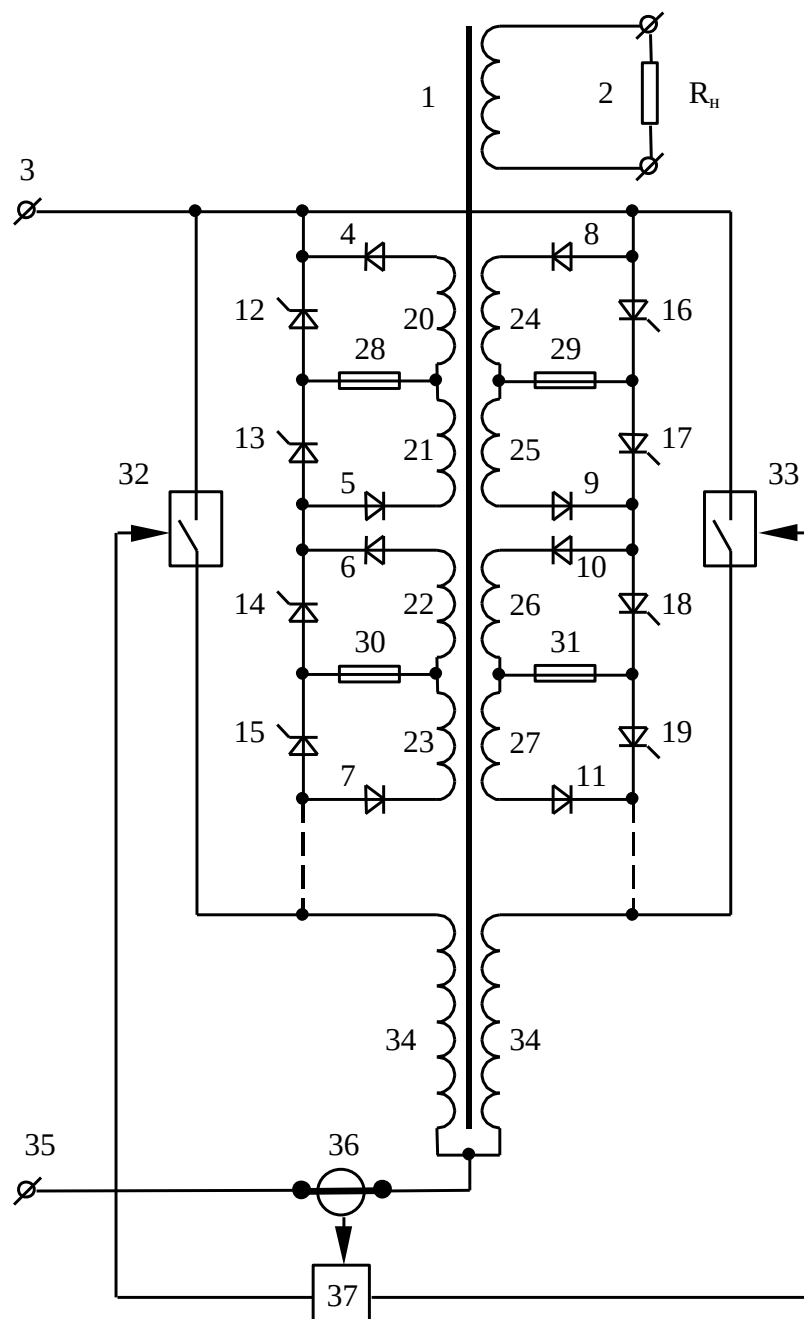


Рис. 1.18. Схема пристрою для регулювання змінної напруги

Для підвищення напруги на затискачах споживачів 2 тиристори 16 і 12 вмикаються в довільний момент часу відповідного на півперіоду. Це призводить до шунтування секції секції 29 у від'ємний напівперіод і секції 24 в додатний напівперіод. Для підвищення рівня вихідної напруги ще на одну ступінь вмикають тиристори 17 і 13 в довільний момент часу відповідного на півперіоду. Слід зазначити, що в такому випадку в кожній групі обмоток силового трансформатора шунтуються по дві секції (24 і 25, 20 і 21).

Недоліком даного пристрою є використання двох груп обмоток, що працюють в різні півперіоди. Це призводить до значного збільшення вартості силового трансформатора.

В роботі [57] описано пристрій для перемикання відгалужень регулюючої обмотки силового трансформатора під навантаженням. Цей пристрій містить два вакуумних вимикачі, контактори та коло розвантаження. Цей пристрій дає змогу знизити знос контактів перемикача, але має порівняно високу вартість.

В роботі [58] запропоновано спосіб регулювання напруги РЕМ, який передбачає зміну коефіцієнту трансформації трансформатора за рахунок зміни кількості витків його вторинної обмотки. Для перемикання відпайок трансформатора запропоновано застосовувати тиристорні ключі. Функціональна схема даного пристрою приведена на рис. 1.19.

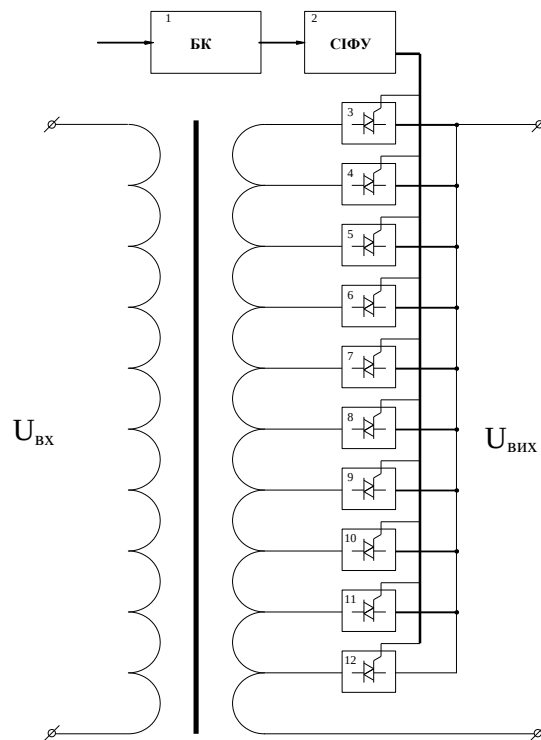


Рис. 1.19. Функціональна схема пристрою регулювання напруги трансформатора з тиристорним пристроєм РПН

На рис. 1.19: 1 – блок автоматичного керування, 2 – СІФУ, 3–12 – тиристорні ключі.

Аналогічний пристрій регулювання напруги трансформатора з перемиканням відпайок вторинної обмотки силового трансформатора описано в роботі [59].

Загальним недоліком способу регулювання напруги, який втілюють два вищезначених пристрої, є те, що перемикання проводиться на стороні НН силового трансформатора, на якій у випадку великого значення потужності трансформатора струми досягають декількох кА. Це значно ускладнює конструкцію такого пристрою та підвищує його вартість.

1.3. Узагальнення результатів аналізу та постановка задач дослідження

Проведений аналіз існуючих пристроїв регулювання напруги силових трансформаторів з РПН показав, що вони вирішують лише одну із задач регулювання напруги: або підвищують якість напруги на затискачах споживачів, через що збільшується кількість спрацювань пристроїв РПН трансформаторів, або підвищують рівень надійності електропостачання за рахунок зниження рівня якості напруги. В останньому випадку особливо тяжкими є режими, за яких мають місце значні відхилення напруги від номінального значення. Це, в результаті призводить до тривалого живлення споживачів електроенергії напругою низької якості.

Використання тиристорних пристроїв РПН є досить перспективним напрямком розвитку систем автоматичного регулювання напруги в РЕМ. Але в теперішній час застосування цих пристроїв є досить обмеженим: вони здебільшого застосовуються у вузлах середньої і низької напруги із трансформаторами невеликої потужності. Це пов'язано із відсутністю напівпровідникових ключів, розрахованих на великі струми і напруги.

Для вирішення задачі розробки ефективних систем автоматичного керування рівнем напруги силових трансформаторів з РПН можна скористатись таким алгоритмом:

- на основі аналізу виявлених недоліків систем регулювання напруги провести синтез закону регулювання напруги трансформатора з пристроєм РПН, використання якого дасть можливість покращити якість регулювання напруги порівняно з існуючими законами керування;
- розробити спосіб дворівневого регулювання напруги, що передбачає регулювання не лише на районних підстанціях РЕМ, але і на кінцевих підстанціях мережі та вирішує обидві задачі регулювання напруги;
- провести дослідження якості створених систем регулювання напруги;

Реалізації вищезначених пунктів алгоритму вирішення поставленої задачі призначені наступні розділи роботи.

Висновки до розділу

1. Проведений аналіз основних підходів до регулювання напруги показав, що найбільш розповсюдженим в розподільних електричних мережах є закон зустрічного регулювання напруги.

2. Проведений аналіз технічних засобів регулювання напруги засвідчив, що найбільш розповсюдженим технічним засобом є механічний пристрій РПН трансформатора. Але, суттєвим недоліком цього пристрою є його низька надійність спричинена значною зношуваністю механічних контактів, які комутують номінальні струми.

3. Проведений аналіз існуючих пристроїв регулювання напруги силових трансформаторів з РПН показав, що вони вирішують лише одну із задач регулювання напруги: або підвищують якість напруги на затискачах споживачів, через що збільшується кількість спрацювань пристроїв РПН трансформаторів, або підвищують рівень надійності електропостачання за рахунок зниження рівня якості напруги. В останньому випадку особливо тяжкими є режими, за яких мають місце значні відхилення напруги від номінального значення. Це, в результаті призводить до тривалого живлення споживачів електроенергії напругою низької якості.

РОЗДІЛ 2

ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ДВОРІВНЕВОГО НЕЧІТКОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Одним із головних недоліків механічного пристрою РПН трансформатора є його порівняно низька надійність. Зниження надійності роботи пристрою РПН прямо пропорційне кількості його спрацювань. Це пов'язано зі зношенням контактів, що комутують номінальні струми. Одним із перспективних шляхів вирішення цієї проблеми є удосконалення САК пристроями РПН силових трансформаторів, застосування яких забезпечить зниження кількості перемикачів пристрою РПН трансформатора без значного зниження якості напруги.

Для вирішення описаної наукової задачі необхідно:

- формалізувати задачу керування режимом напруги в РЕМ;
- провести розробку законів автоматичного регулювання напруги в РЕМ;
- здійснити вибір відповідного математичного апарату;
- розробити математичну модель і алгоритм регулювання напруги в розподільних електричних мережах.

Вирішенню даних задач присвячений другий розділ роботи.

2.1 Постановка задачі автоматичного регулювання напруги в РЕМ

Як зазначалось в попередньому розділі, однією із причин зниження надійності РЕМ є вихід з ладу пристрою РПН трансформатора. Для зниження кількості перемикачів пристрою РПН трансформатора запропоновано об'єднати регулятори на кінцевих підстанціях з регулятором на районній підстанції в єдину дворівневу систему автоматичного регулювання, яка дозволяє перемикачів пристрою РПН лише в тому випадку, коли деяка

кількість регуляторів кінцевих підстанцій вибрали свій діапазон регулювання. Функціональна схема цієї системи показана на рис. 2.1.

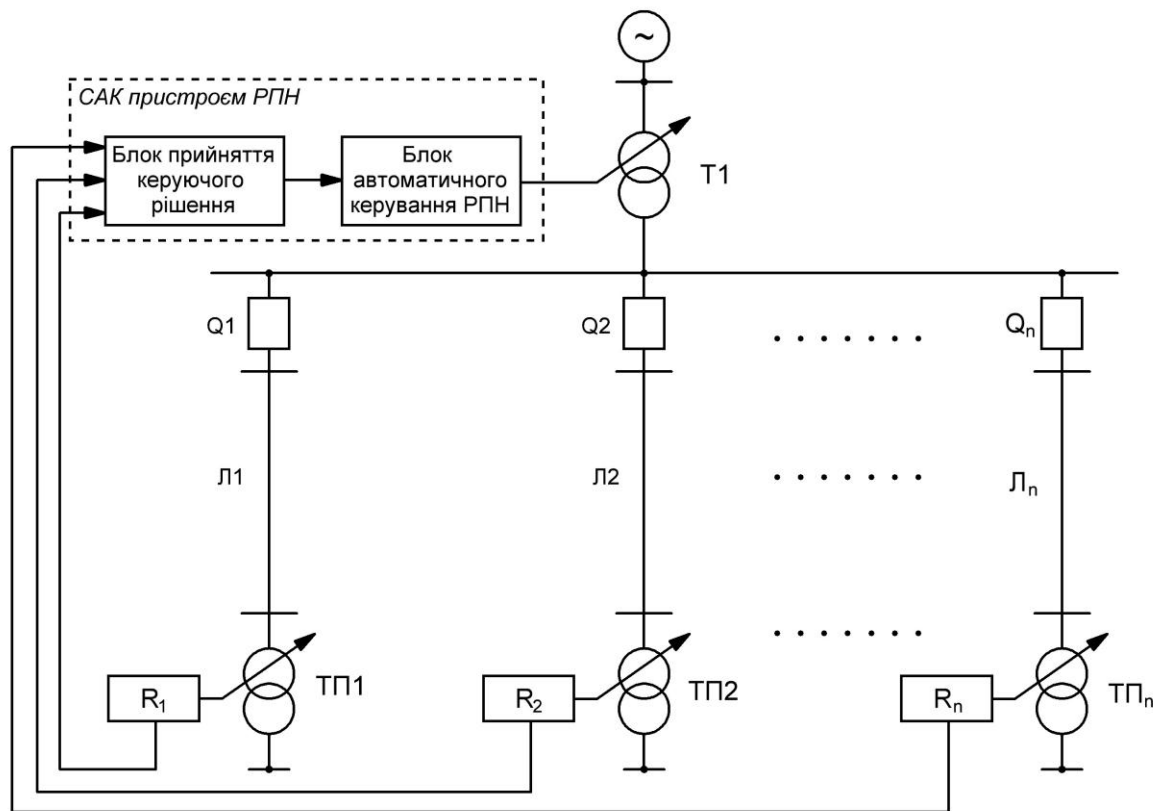


Рис. 2.1. Функціональна схема дворівневої системи регулювання напруги РЕМ

На рис. 2.1: T_p – силовий трансформатор районної підстанції; $Q_1 - Q_n$ – вимикачі; $T_1 - T_n$ – трансформатори нижнього рівня з безконтактними пристроями РПН; $R_1 - R_n$ – регулятори напруги підстанцій нижнього рівня.

Обмеження кількості перемикачів пристрою РПН трансформатора спричиняє покращення регулювання напруги, проте не підвищує якість регулювання. Окрім цього, пристрої РПН встановлюються здебільшого на районних підстанціях, і регулювання напруги відбувається для значної кількості споживачів. Але в кінці кожної з ліній напруга на затискачах споживачів весь час зазнає змін внаслідок зміни значення струму навантаження в лінії.

На кінцевих трансформаторних підстанціях встановлюються трансформатори з ПБЗ. Перемикання відгалужень цих трансформаторів може здійснювати лише при відімкненні трансформатора від мережі.

Стрімкий розвиток силової електроніки спричинив створення силових ключів, здатних працювати за великих значень напруг і струмів. В порівнянні з механічними пристроями РПН такі прилади володіють високою надійністю кращою ремонтпридатністю. Це дає можливість розроблення пристрою РПН на базі трансформаторів з ПБЗ, що характеризується відносно невеликою вартістю, високою швидкодією і значним ресурсом роботи.

На рис. 2.2 наведена функціональна схема системи автоматичного регулювання напруги із використанням трансформатора з пристроєм ПБЗ і напівпровідниковим пристроєм РПН.

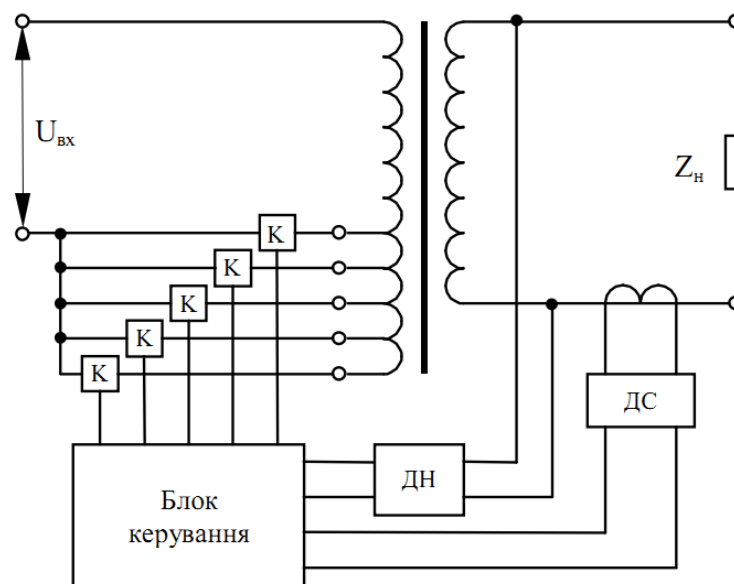


Рис. 2.2. Функціональна схема системи автоматичного регулювання напруги трансформатора з пристроєм ПБЗ

Напруга на вторинній обмотці силового трансформатора вимірюється за допомогою датчика напруги, а струм навантаження – датчиком струму (трансформатором струму). Виходячи з цих даних блок автоматичного керування проводить розрахунок значення усталеного відхилення напруги на

затискачах споживачів, і залежно від цього значення видає команду на спрацювання одного з силових ключів. Діапазон регулювання такого пристрою складає $\pm 5\%$. Блок автоматичного керування реалізує закон регулювання напруги (2.3).

Таким чином, для досягнення поставленої мети було сформульоване наступне завдання: *за відомими діапазоном та кроком регулювання пристроїв РПН на підстанціях високого та низького рівнів, а також вимірними діючими значеннями струмів та напруг на стороні низької напруги кожної з них визначити алгоритм роботи системи автоматичного керування, який в масштабі реального часу знаходив би такі значення керуючих впливів, які забезпечують мінімальні значення усталеного відхилення напруги та мінімально можливе значення кількості спрацювань механічного пристрою РПН.*

2.2 Розробка законів автоматичного регулювання напруги в РЕМ

Для вирішення поставленого в роботі завдання необхідно здійснити синтез законів автоматичного керування пристроєм РПН трансформатора для підстанції вищого рівня а також для дворівневої системи регулювання напруги.

2.2.1. Розробка закону автоматичного регулювання напруги для підстанції вищого рівня. На підстанціях електричної мережі реалізується зустрічне регулювання напруги. Для автоматичного регулювання дискретними пристроями РПН цей закон можна записати у вигляді [60]:

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

$$K_m = \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{н.н}}, & \text{якщо } u(t) \leq u_{н.3}; \\ \frac{U_i}{U_{н.н}}, & \text{при } u_{н.3} < u(t) < u_{в.3}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{н.н}}, & \text{якщо } u(t) \geq u_{в.3}; \end{cases} \quad (2.1)$$

де K_m – коефіцієнт трансформації силового трансформатора з РПН;

$u(t)$ – напруга на шинах підстанції;

$u_{н.3}$, $u_{в.3}$ – мінімальне і максимальне значення границь зони нечутливості;

U_y – уставка регулятора, що відповідає номінальній напрузі;

$U(t)$ – поточне значення напруги;

$I_{\min}$ – струм, який знімається з шин підстанції в режимі мінімальних навантажень;

$I(t)$ – поточне значення струму;

$U_{н.н}$ – напруга на шинах НН трансформатора;

U_i – напруга, що створюється в обмотці ВН трансформатора при підключенні i -го відгалуження;

K_1 – коефіцієнт, що характеризує чутливість регулятора;

K_2 – коефіцієнт, що визначає нахил характеристики зустрічного регулювання:

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

$I_{\max}$ – струм навантаження в режимі максимальних навантажень.

Під час експлуатації намагаються зменшити кількість перемикань відгалужень, спеціально ідучи на зниження якості регулювання, але при

цьому збільшуючи надійність. З цією метою закон автоматичного регулювання створюють нечутливим до короточасних флуктуацій напруги що досягається введенням у вираз (2.1) параметру часової затримки τ_3 і відповідної логічної умови:

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

$$K_m = \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{н.н}}, & \text{якщо } \begin{cases} u(t) \leq u_{н.з}; \\ u(t - \tau_3) \leq u_{н.з}; \end{cases} \\ \frac{U_i}{U_{н.н}}, & \text{при } u_{н.з} < u(t) < u_{в.з}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{н.н}}, & \text{якщо } \begin{cases} u(t) \geq u_{в.з}; \\ u(t - \tau_3) \geq u_{в.з}; \end{cases} \end{cases} \quad (2.3)$$

де τ_3 – час величини затримки сигналу.

Закон регулювання напруги (2.3) реалізується в системах керування безконтактними пристроями РПН підстанцій нижчого рівня (ТП 10/0,4 кВ).

Для того, щоб підвищити рівень стійкості регулювання, у вираз (2.3) необхідно ввести додаткову логічну умову, що враховує знак похідної огинаючої регульованої напруги. Зазначена умова дозволяє не проводити перемикання відгалужень у випадку, коли регульований параметр знаходиться поза межами зони нечутливості, але під дією зовнішніх чинників прямує до цієї зони. Закон автоматичного регулювання в такому випадку набуває вигляду:

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

$$K_m = \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{н.н}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \leq u_{н.3}; \\ u(t - \tau_3) \leq u_{н.3}; \\ \frac{dU_{ор}}{dt} \leq 0; \end{cases} \\ \frac{U_i}{U_{н.н}}, \text{ при } u_{н.3} < u(t) < u_{в.3}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{н.н}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \geq u_{в.3}; \\ u(t - \tau_3) \geq u_{в.3}; \\ \frac{dU_{ор}}{dt} \geq 0, \end{cases} \end{cases} \quad (2.4)$$

де $\frac{dU_{ор}}{dt}$ – похідна огинаючої напруги.

Однак цей закон керування не передбачає швидкої реакції регулятора на велике відхилення контрольованої напруги, через що тривалий період часу напруга на навантаженні досягає ненормованих значень із-за затримки сигналу керування.

Тому необхідно доповнити закон регулювання (2.4) умовою, яка б дозволяла здійснювати перемикання пристроєм РПН трансформатора без затримки сигналу τ_3 , у випадку, коли напруга набуває значень, що значно відрізняється від $U_{ном}$:

$$\begin{aligned}
 u(t) &= K_1((U(t) - U_y) - K_2(I(t) - I_{\min})); \\
 K_m &= \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{н.н}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \leq u_{н.3}; \\ u(t - \tau_3) \leq u_{н.3}; \\ \frac{dU_{ог}}{dt} \leq 0; \end{cases} \\ \frac{U_i}{U_{н.н}}, \text{ при } u_{н.3} < u(t) < u_{в.3}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{н.н}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \geq u_{в.3}; \\ u(t - \tau_3) \geq u_{в.3}; \\ \frac{dU_{ог}}{dt} \geq 0; \end{cases} \end{cases} \\
 U(t) &\xrightarrow{t_{\text{рег}} \rightarrow \min} U_{\text{ном}} \pm \Delta U, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) < u_{н.3л} \\ u(t) > u_{в.3л} \end{cases},
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

де $U_{в.3}, U_{н.3}$ – напруга РЕМ, що відповідає верхній і нижній межах зони нечутливості регулятора;

$u_{в.3л}, u_{н.3л}$ – верхня і нижня межі зони нечутливості, значення яких обумовлені якістю регулювання напруги;

$t_{\text{рег}}$ – час регулювання, впродовж якого значення напруги повертається в межі зони нечутливості.

2.2.2. Розроблення закону керування для дворівневої системи регулювання напруги в РЕМ. Закон автоматичного керування, що використовується для дворівневої системи регулювання напруги розподільній електричній мережі має вигляд:

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

$$K_m = \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{н.н}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \leq u_{н.3}; \\ u(t - \tau_3) \leq u_{н.3}; \\ \frac{dU_{ог}}{dt} \leq 0; \\ \sum_{j=1}^n K_j m_{н j} > K_{п}; \end{cases} \\ \frac{U_i}{U_{н.н}}, \text{ при } u_{н.3} < u(t) < u_{в.3}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{н.н}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \geq u_{в.3}; \\ u(t - \tau_3) \geq u_{в.3}; \\ \frac{dU_{ог}}{dt} \geq 0; \\ \sum_{j=1}^n K_j m_{в j} > K_{п}, \end{cases} \end{cases} \quad (2.6)$$

де K_j – ваговий коефіцієнт j -го трансформатора нижнього рівня;

$K_{п}$ – пороговий коефіцієнт, який задає суму вагових коефіцієнтів трансформаторів;

$m_{нj}$, $m_{вj}$ – коефіцієнти, що визначають закінчення діапазону регулювання j -м трансформатором нижнього рівня у випадку регулювання напруги в бік її збільшення або зменшення відповідно.

$$m_{н} = \begin{cases} 0, \text{ якщо } u_{п}(t) > u_{пн3}; \\ 1, \text{ якщо } \begin{cases} u_{п}(t) \leq u_{пн3}; \\ u_{п}(t - \tau_{п3}) \leq u_{пн3}; \end{cases} \end{cases}$$

$$m_{в} = \begin{cases} 0, \text{ якщо } u_{п}(t) < u_{пв3}; \\ 1, \text{ якщо } \begin{cases} u_{п}(t) \geq u_{пв3}; \\ u_{п}(t - \tau_{п3}) \geq u_{пв3}, \end{cases} \end{cases} \quad (2.7)$$

де $u_{II}(t)$ – поточне значення напруги на шинах трансформатора нижнього рівня;

$u_{IIн.з}$, $u_{IIв.з}$ – значення напруг, які відповідають нижній і верхній границям зони нечутливості трансформатора нижнього рівня;

$\tau_{IIз}$ – величина часу затримки сигналу регулятора нижнього рівня.

Діапазон зміни порогового коефіцієнта K_{II} лежить в межах від 0 до 1.

Слід відмітити, що існує певна складність у визначенні значення коефіцієнта впливу j -го трансформатора K_j із закону керування (2.6) кінцевої підстанції. На значення даного коефіцієнту впливає досить велика кількість факторів. В зв'язку з цим виникає задача врахування цих факторів, що, в свою чергу, дозволить покращити точність у прийнятті рішення щодо перемикання регулюючого відгалуження трансформатора районної підстанції.

2.3 Вибір та обґрунтування математичного апарату, придатного для вирішення задачі керування режимом напруги в РЕМ

Існує досить велика кількість методів синтезу, що придатні для реалізації САК, в основу яких покладено закони керування (2.3) та (2.6). Зважаючи на мікропроцесорну реалізацію запропонованих законів керування, розроблені САК повинні мати дискретний характер.

Більш складною є задача розробки математичної моделі визначення вагового коефіцієнта K_j (математичної моделі блоку прийняття рішення). На значення даного коефіцієнту впливає велика кількість факторів. Найголовнішими з цих факторів є номінальна потужність трансформатора, рівень його завантаження та його важливість. Беручи до уваги досить складний взаємозв'язок між значеннями цих факторів та значенням вагового коефіцієнту K_j , створення «класичної» математичної моделі, що адекватно описувала б даний зв'язок є практично неможливою. В зв'язку з цим

вирішення даної задачі найдоцільніше здійснити шляхом використання математичного апарату нечіткої логіки.

Розглянемо теоретичні аспекти даного математичного апарату.

2.3.1. Нечітка арифметика та нечітка математика. Нечіткі числа можуть застосовуватися при моделюванні систем, для яких залежність між вхідними та вихідними сигналами відома і подана в вигляді традиційної математичної моделі $y = f(x)$, однак вхідні сигнали не піддаються точному вимірюванню, а доступні лише наближені значення, наприклад: $x_1 = \text{«приблизно 9»}$, $x_2 = \text{«приблизно 10»}$, $y = x_1 + x_2$.

У цьому випадку значення виходу системи y може бути отримано в формі нечіткого числа (рис. 2.3).

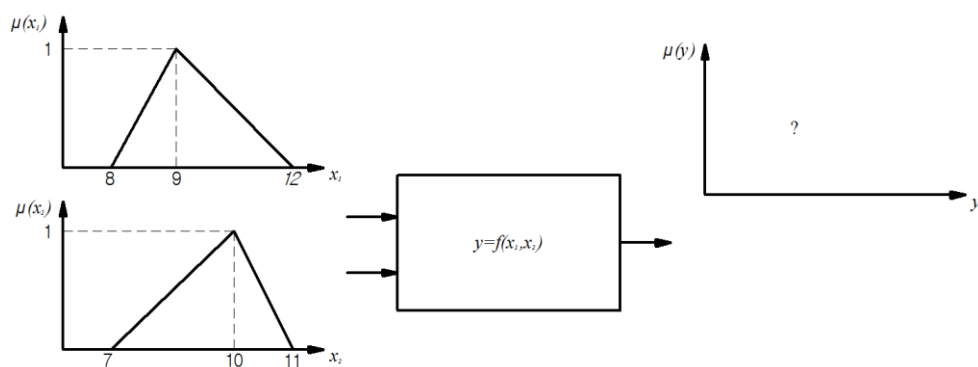


Рис. 2.3. Знаходження нечіткого вихідного значення моделі з нечіткою інформацією про вхідні значення

Якщо модель $y = f(x)$ задана у вигляді математичного виразу, що містить операції додавання, віднімання, множення або ділення, то повинні бути визначені методи виконання цих операцій над нечіткими числами. Дані методи грають важливу роль, оскільки дозволяють вводити в традиційну математичну модель системи нечіткі оцінки вхідних значень, які людина формулює на основі свого сприйняття або інтуїції. Крім того, на основі таких методів можна створювати гібридні моделі, що складаються з чітких і нечітких блоків, при цьому чіткі елементи моделі можуть використовуватися

в тому числі і для обробки нечіткої інформації, що видається відповідними нечіткими елементами.

В нечіткій арифметиці базові математичні операції над нечіткими числами є узагальненням відповідних операцій над звичайними числами. Правила такого узагальнення запропоновані Лотфрі Заде у вигляді принципу узагальнення, який нижче формулюється в двох варіантах для систем типу SISO (з одним входом і одним виходом) і систем типу MISO (з декількома входами і одним виходом).

Нехай є звичайна система з одним входом і одним виходом, яка реалізує відображення f множини x вхідних значень в множині y вихідних значень (рис. 2.4).

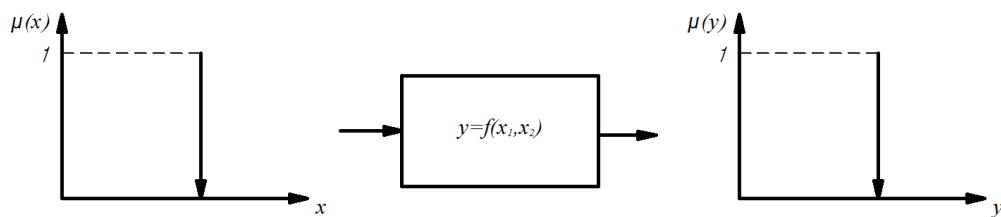


Рис. 2.4. Традиційна система типу SISO (один вхід $\vee$ один вихід) з чітким входом x і виходом y

Якщо A нечітка множина, задана на множині X , то результатом $f(A)$ її відображення, відповідно до принципу узагальнення, є нечітка множина $B = f(A)$, яка визначається у вигляді (2.8), де символ $\vee$ означає операцію АБО (об'єднання нечітких множин):

$$\mu_B(y) = \mu_{f(A)}(y) = \bigvee_{y=f(x)} \mu_A(x), \quad x \in X, y \in Y. \quad (2.8)$$

Для багатьох реальних систем вхідні і вихідні величини (наприклад, напруга або сила струму) можуть бути виражені за допомогою чисел, тому в подальшому ми будемо припускати, що універсальні множини чисел X і Y

збігаються з множиною дійсних чисел R . Відзначимо, що в загальному випадку X і Y можуть являти собою множини довільних елементів. Якщо вхідне значення x і вихідне значення y задовольняють умові

$$\forall x, y \in R, \quad (2.9)$$

то принцип узагальнення для функції з однією змінною (випадок системи типу SISO) фактично задає функцію приналежності $\mu_B(x)$ вихідного параметра за формулою:

$$\mu_B(y) = \mu_{f(A)}(y) = \bigvee_{y=f(x)} \mu_A(x), \quad \forall x, y \in R. \quad (2.10)$$

Якщо для виконання операції $\bigvee$ використовується оператор MAX, то вираз (2.10) може бути представлено у вигляді:

$$\mu_B(y) = \max_{y=f(x)} \mu_A(x), \quad \forall x, y \in R. \quad (2.11)$$

Принцип узагальнення для функції однієї змінної ілюструється рис. 2.5.

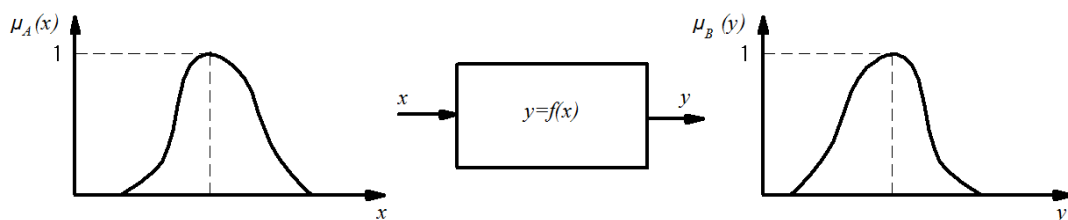


Рис. 2.5. Відображення нечіткого x в нечіткий вихід y
звичайною SISO-системою

Протилежним для нечіткого числа A є нечітке число $-A$, яке може бути отримано на основі принципу узагальнення, що приймає в даному випадку вид:

$$\mu_{-A}(y) = \bigvee_{y=-x} \mu_A(x), \quad \forall x, y \in R. \quad (2.12)$$

Зворотне нечітке число A^{-1} обчислюється на основі принципу узагальнення у формі:

$$\mu_{A^{-1}}(y) = \bigvee_{y=\frac{1}{x}} \mu_A(x), \quad \forall x, y \in R, x \in X. \quad (2.13)$$

Додавання двох нечітких чисел є відображення вхідного вектора

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2]^T,$$

визначеного на декартовому добутку $R \times R$, в вихідне значення y , визначене на множині R . Якщо A_1 і A_2 нечіткі числа, то їх сума також є нечітким числом і задається виразом:

$$(A_1 + A_2)(y) = \bigvee_{y=x_1+x_2} [A_1(x_1) \wedge A_2(x_2)], \quad \forall x_1, x_2, y \in R. \quad (2.14)$$

Для обчислення суми нечітких чисел досить визначити функцію приналежності $\mu_{A_1+A_2}(y)$ по формулі:

$$\mu_{A_1+A_2}(y) = \bigvee_{y=x_1+x_2} [\mu_{A_1}(x_1) \wedge \mu_{A_2}(x_2)], \quad \forall x_1, x_2, y \in R, \quad (2.15)$$

де $\wedge$ – оператор об'єднання множин (наприклад MAX або інші s-норми);
 $\vee$ – оператор перетину множин (наприклад MIN, PROD або інші t-норми).

Різниця нечітких чисел $A_1(x_1)$ і $A_2(x_2)$ може бути отримана за допомогою принципу узагальнення в формі:

$$(A_1 - A_2)(y) = \bigvee_{y=x_1-x_2} [A_1(x_1) \wedge A_2(x_2)], \quad \forall x_1, x_2, y \in R. \quad (2.16)$$

Обчислення різниці нечітких чисел фактично зводиться до обчислення її функції приналежності за формулою:

$$\mu_{A_1-A_2}(y) = \bigvee_{y=x_1-x_2} [\mu_{A_1}(x_1) \wedge \mu_{A_2}(x_2)], \quad \forall x_1, x_2, y \in R, \quad (2.17)$$

Добуток нечітких чисел $(A_1 \cdot A_2)$ можна знайти, використовуючи принцип узагальнення в формі:

$$(A_1 \cdot A_2)(y) = \bigvee_{y=x_1 \cdot x_2} [A_1(x_1) \wedge A_2(x_2)], \quad \forall x_1, x_2, y \in R. \quad (2.18)$$

Фактично обчислення добутку нечітких чисел зводиться до знаходження його функції приналежності за формулою:

$$\mu_{A_1 \cdot A_2}(y) = \bigvee_{y=x_1 \cdot x_2} [\mu_{A_1}(x_1) \wedge \mu_{A_2}(x_2)], \quad \forall x_1, x_2, y \in R, \quad (2.19)$$

Результат ділення нечітких чисел (A_1 / A_2) може бути знайдено за допомогою принципу узагальнення за формулою:

$$(A_1 / A_2)(y) = \bigvee_{y=x_1/x_2} [A_1(x_1) \wedge A_2(x_2)], \quad \forall x_1, x_2, y \in R. \quad (2.20)$$

Основними елементами нечітких моделей є логічні правила виду:

$$\text{ЯКЩО } (x_1 \text{ середнє}) \text{ I } (x_2 \text{ мале}) \text{ ТО } (y \text{ велике}) \quad (2.21)$$

Для обробки інформації в таких моделях необхідно використовувати ряд операцій, в основному логічного характеру. Сукупність цих операцій і пов'язані з ними поняття можна об'єднати під загальною назвою «нечітка математика». Основні її принципи представлені нижче.

Нечітка модель деякої реальної системи містить логічні правила, що описують її функціонування. Для системи з двома вхідними величинами (x_1, x_2) і однієї вихідний величиною y правило може мати вигляд:

$$\begin{aligned} \text{ЯКЩО} \quad & [(x_1 \text{ мале}) \text{ I } (x_2 \text{ середнє})] \text{ АБО} \\ & [(x_1 \text{ середнє}) \text{ I } (x_2 \text{ мале})] \text{ ТО } (y \text{ середнє}) \end{aligned} \quad (2.22)$$

де «мале» і «середнє» – нечіткі множини (нечіткі оцінки значень відповідних величин);

ЯКЩО–ТО, I, АБО – логічні зв'язки (оператори агрегування нечітких множин).

Якщо нечіткі множини («мале», «середнє») використовуються для обчислення вхідних і вихідних станів системи, то логічні зв'язки задають якісні відношення між цими станами шляхом об'єднання фрагментів правила в єдине ціле. Точність нечіткої моделі залежить як від способу задання використовуваних в ній нечітких множин (їх числа, форми і параметрів функції належності), так і від використовуваних типів логічних зв'язок.

До основних типів логічних зв'язок (логічних операторів) відносяться:

- I, $\cap$, $\vee$ – оператор перетину (логічний добуток) множин,
- АБО, $\cup$, $\wedge$ – оператор об'єднання (логічна сума) множин,

Логічні оператори мають кілька різних форм представлення, в зв'язку з чим виникає задача вибору відповідної форми.

Нечітка логіка створювалася на основі класичної, чіткої, двозначної логіки. Її засновник, Лотфі Заде, вказав на недоліки класичної логіки при моделюванні явищ реального світу. Ввівши поняття нечіткої множини, він надав можливість удосконалення моделей, що містять логічні зв'язки. Заде визначив операцію перетину нечітких множин як розширення відповідної операції над звичайними множинами, це означає, що перетин звичайних множин має бути окремим випадком перетину нечітких множин. Разом з тим, з практичної точки зору, по причині прагнення підвищити точність нечітких моделей, використовуються також оператори які не задовольняють цій аксіомі.

У класичній логіці перетин множин A і B визначається без використання функцій приналежності за формулою:

$$A \cap B = \{x : x \in A \text{ і } x \in B\}. \quad (2.23)$$

Основні властивості операції перетину чітких множин $A \cap B$, заданих на універсальній множині X , наявність яких очікується і в разі нечітких множин, визначаються співвідношеннями.

Комутативність:

$$A \cap B = B \cap A \quad (2.24)$$

Асоціативність:

$$(A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C). \quad (2.25)$$

Дана властивість визначає можливість покрокового обчислення логічного добутку кількох множин шляхом знаходження добутків їх пар. Порядок, в якому формуються пари, не впливає на кінцевий результат.

Ідемпотентність:

$$A \cap A = A \quad (2.26)$$

Поглинання (перетин з порожньою множиною $\emptyset$):

$$A \cap \emptyset = \emptyset. \quad (2.27)$$

Тотожність (перетин з універсальною множиною):

$$A \cap X = A. \quad (2.28)$$

де X – універсальна множина.

Закон логічного протиріччя:

$$A \cap \bar{A} = \emptyset. \quad (2.29)$$

Для операції перетину нечітких множин деякі з цих властивостей можуть не виконуватися такою є, наприклад, властивість (2.29). Стосовно до нечітких множин, дана операція може бути задана різними способами і тому має неоднозначний зміст.

У класичній логіці логічна сума множин A і B визначається без використання поняття функції приналежності, відповідно до виразу:

$$A \cup B = \{x: x \in A \text{ або } x \in B\}. \quad (2.30)$$

Результат об'єднання чітких множин є однозначним, оскільки об'єднання виконується завжди одним і тим же способом. У разі нечітких множин можливий ряд способів виконання об'єднання, і тим самим результат його неоднозначний.

З урахуванням аксіоми нечіткої логіки, відповідно до якої всі її операції, при застосуванні їх до чітких множин, повинні збігатися з операціями класичної логіки, можна очікувати, що для операції об'єднання нечітких множин виконуються перераховані нижче властивості (2.31) – (2.36).

Комутативність:

$$A \cup B = B \cup A \quad (2.31)$$

Дана властивість означає, що порядок дотримання множин, що беруть участь в операції об'єднання, не впливає на кінцевий результат.

Асоціативність:

$$A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C = A \cup B \cup C. \quad (2.32)$$

Об'єднання декількох множин можна виконувати послідовно, формуючи пари множин, при цьому порядок їх формування не суттєвим.

Ідемпотентність:

$$A \cup A = A. \quad (2.33)$$

Об'єднання з порожньою множиною $\emptyset$:

$$A \cup \emptyset = A. \quad (2.34)$$

Поглинання (об'єднання з універсальною множиною X):

$$A \cup X = X \quad (2.35)$$

Закон виключеного третього A :

$$A \cup \bar{A} = X. \quad (2.36)$$

Деякі властивості операції об'єднання, що виконуються для чітких множин, при переході до нечітких множин можуть не виконуватися.

2.3.2. Нечіткі моделі. На рис. 2.6 представлена типова структура нечіткої моделі системи з двома входами і одним виходом.

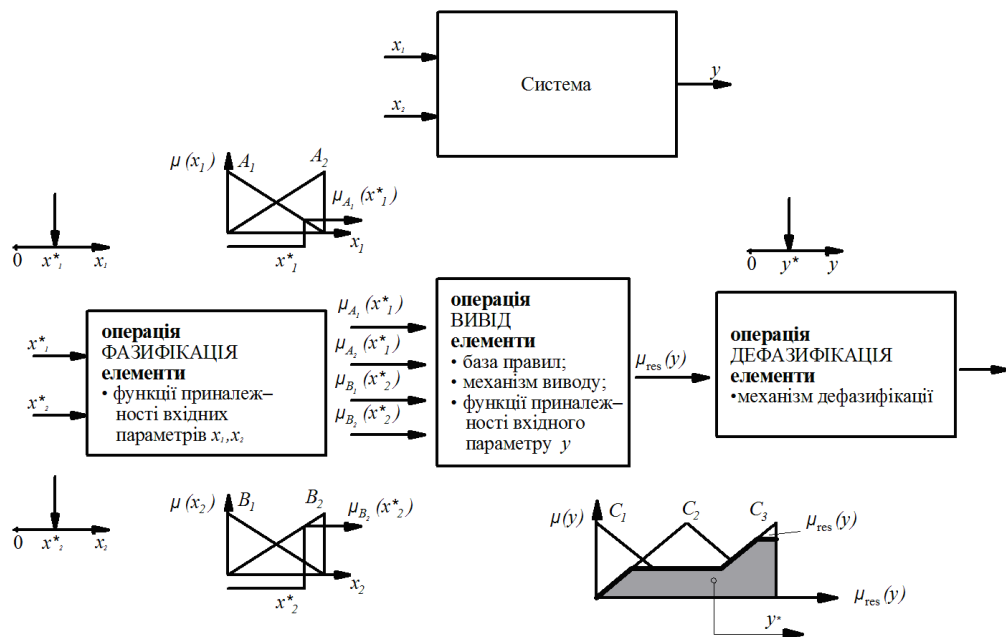


Рис. 2.6. Структура нечіткої моделі системи
з двома входами і одним виходом

На входи нечіткої моделі подано два чітких числових значення x_1^* , x_2^* . Блок «ФАЗИФІКАЦІЯ» (FUZZIFICATION) обчислює їх ступені приналежності вхідним нечітким множинам A_i , B_j . Для виконання зазначеної операції блок фазифікації повинен мати доступ до точно визначених функцій приналежності $\mu_{A_i}(x_1)$, $\mu_{B_j}(x_2)$ входів.

Обчислені і представлені на виході блоку фазифікації степені приналежності $\mu_{Ai}(x_1^*)$, $\mu_{Bj}(x_2^*)$ дають інформацію про те, в якому степені числові значення x_1^* , x_2^* належать конкретним нечітким множинам, тобто наскільки ці величини є малими (A_1, B_1) або великими (A_2, B_2).

Блок «ВИБІД» (INFERENCE) на вході отримує ступені приналежності $\mu_{Ai}(x_1^*)$, $\mu_{Bj}(x_2^*)$ і на виході обчислює так звану результуючу функцію приналежності вихідного значення моделі. Ця функція зазвичай має складну форму і визначається за допомогою виведення, яке може бути здійснене безліччю способів. Для виконання обчислень блок виведення повинен включати в себе наступні обов'язкові елементи:

- база правил,
- механізм виведення,
- функції приналежності вихідного параметра y .
- база правил містить логічні правила, які задають системі причинно-наслідкові зв'язки між нечіткими значеннями її вхідних і вихідних величин. База правил може, наприклад, мати наступний вигляд:

$$\begin{aligned}
 R1: & \text{ЯКЩО } (x_1 = A_1) \text{ I } (x_2 = B_1) \text{ ТО } (y = C_1), \\
 R1: & \text{ЯКЩО } (x_1 = A_1) \text{ I } (x_2 = B_2) \text{ ТО } (y = C_2), \\
 R1: & \text{ЯКЩО } (x_1 = A_2) \text{ I } (x_2 = B_1) \text{ ТО } (y = C_3), \\
 R1: & \text{ЯКЩО } (x_1 = A_2) \text{ I } (x_2 = B_2) \text{ ТО } (y = C_4).
 \end{aligned}
 \tag{2.37}$$

Вирішення покладеного на блок виведення завдання, пов'язаного з визначенням результуючої функції приналежності $\mu_{\text{res}}(y)$, забезпечується механізмом виведення, який складається з наступних елементів:

- **ІМ1:** елемент, який обчислює рівень виконання кожного правила R_i окремо;
- **ІМ2:** елемент, який обчислює активізовані функції приналежності висновків кожного правила R_i ;

– **ІМ3:** елемент, який обчислює результуючу функцію приналежності $\mu_{\text{res}}(y)$ вихідного значення на основі активізованих висновків окремих правил.

Наприклад механізм виведення для системи з двома входами матиме вигляд:

- **ІМ1:** агрегація умов правил з використанням оператора PROD для перетину множин (І) і оператора MAX для об'єднання множин (АБО),
- **ІМ2:** визначення активізованих функцій приналежності висновків правил з використанням оператора імплікації Мамдані,
- **ІМ3:** визначення результуючої функції приналежності $\mu_{\text{res}}(y)$ вихідного значення (аккумуляція) з використанням оператора MAX.

Блок «ДЕФАЗИФІКАЦІЯ» (DEFUZZIFICATION) на основі результуючої функції приналежності $\mu_{\text{res}}(y)$ обчислює чітке числове значення y^* вихідного параметра, що є результатом для вхідних числових значень x_1^* , x_2^* . Дана операція виконується за допомогою механізму дефазифікації, який визначає метод обчислення. Прикладом механізму дефазифікації є метод центру тяжіння.

Далі будуть описані окремі блоки нечіткої моделі і різні варіанти вибору їх елементів.

У блоці «ФАЗИФІКАЦІЯ», представленому на рис. 2.7, обчислюються ступінь приналежності числових значень вхідних параметрів моделі вхідним нечітким множинам.

Рівність 0,3 міри приналежності вхідного значення $x_1^* = 1,4$ нечіткій множині A_1 (малий) означає, що рівень відповідності даного значення найбільш типовому малому значенню (0) дорівнює 0,3. З іншого боку, твердження про те, що значення $x_1^* = 1,4$ велике, є істинним зі ступенем 0,7. Таким чином, зазначене значення x_1 більшою мірою відповідає типовому великому значенню (2), ніж типовому малому (0).

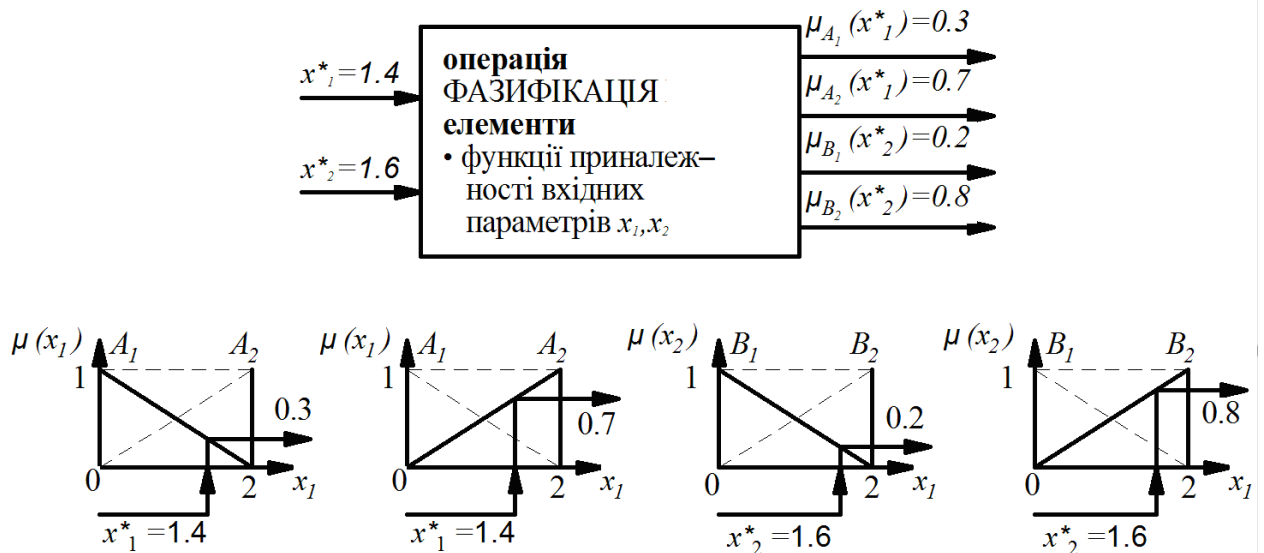


Рис. 2.7. Блок фазифікації і приклад його роботи

Для обчислення ступенів приналежності значень конкретним нечітким множинам, функції приналежності останніх повинні бути точно задані на якісному (вид функції) і кількісному (її параметри) рівні. Як форма функції приналежності, так і її параметри, істотно впливають на точність моделі.

Прикладом математичного опису функції приналежності (див. рис. 2.7) є сукупність виразів виду:

$$\begin{aligned} \mu_{A_1}(x_1) &= 0,5(2 - x_1), & \mu_{A_2}(x_1) &= 0,5x_1, \\ \mu_{B_1}(x_2) &= 0,5(2 - x_2), & \mu_{B_2}(x_2) &= 0,5x_2. \end{aligned} \quad (2.38)$$

В процесі фазифікації чіткий вхідний вектор $\mathbf{X}^*$ перетворюється в вектор $\mathbf{M}$ ступенів приналежності, які, в свою чергу, є вхідними даними для блоку виведення:

$$\mathbf{X}^* = \begin{bmatrix} x_1^* \\ x_2^* \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{фазифікація}} \mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mu_{A1}(x_1^*) \\ \mu_{A2}(x_1^*) \\ \mu_{B1}(x_2^*) \\ \mu_{B2}(x_2^*) \end{bmatrix}.$$

Блок «ВИВІД» на основі ступенів приналежності $\mu_A(x_1)$, $\mu_B(x_2)$ вхідних значень визначає результуючу функцію приналежності $\mu_{\text{res}}(y)$ вихідного значення моделі (рис. 2.8).

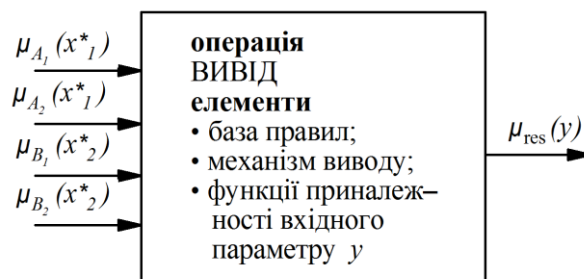


Рис. 2.8. Блок виводу нечіткої моделі

Операція виведення включає в себе наступні кроки:

- 1) обчислення ступенів виконання окремих правил (точніше, їх умов);
- 2) визначення активізованих функцій приналежності висновків окремих правил;
- 3) визначення результуючої функції приналежності виведення з усіх правил, що входять в базу.

По мірі розвитку нечіткої логіки розробляються нові типи нечітких моделей. Одною з причин розробки нових моделей є велика різноманітність існуючих реальних систем, з різними видами інформації про ці системи і різним ступенем її доступності.

Основна перевага нечітких моделей в порівнянні з традиційними математичними моделями є можливість використання для їх розробки значно

менших обсягів інформації про систему, при цьому інформація може носити наближений, нечіткий характер.

Моделі Мамдані. Концепція лінгвістичної нечіткої моделі, що відтворює людський спосіб мислення, була запропонована в перших роботах Заде. А ідея застосування даної концепції до нечіткого керування динамічними об'єктами належить Мамдані, який наряду з цим представив спосіб побудови моделі людини-оператора, керуючого об'єктом. Запропонований Мамдані метод моделювання був зустрінутий з великим інтересом і отримав схвалення в зв'язку з його простотою і доступністю. В даний час цей метод використовується найчастіше, хоча були розроблені і інші типи моделей, серед яких найбільш важливими є моделі Такагі-Сугено. В рамках методу Мамдані модельована система розглядається як «чорний ящик», який характеризується недостатністю інформації про фізичні явища які відбуваються всередині нього.

Модель Мамдані являє собою безліч правил, де кожне правило задає в зазначеному просторі деяку нечітку точку. На основі безлічі нечітких точок формується нечіткий графік, в якому механізм інтерполяції між точками залежить від використовуваного апарату нечіткої логіки.

Алгоритм Мамдані має такі переваги:

1. Простота програмування – алгоритм найбільш простий і зрозумілий для програмування.
2. Дозволяє скласти меншу кількість правил необхідну для роботи контролера.
3. При програмуванні алгоритму не настільки важлива точність виведення, скільки наочність і «зрозумілість» усіх складових алгоритму. Алгоритм Мамдані задовольняє цій вимозі.

Даний алгоритм є найбільш часто вживаним на практиці, тому що дуже добре себе зарекомендував у ряді завдань керування в режимі реального часу. Математично він може бути описаний наступною послідовністю кроків:

1. Нечіткість: знаходяться ступені істинності для передумов кожного правила:

$$A_1(x_0), A_2(x_0), B_1(y_0), B_2(y_0).$$

2. Нечіткий висновок: знаходяться рівні «відсікання» для передумов кожного з правил (з використанням операції $\min$):

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= A_1(x_0) \wedge B_1(y_0) \\ \alpha_2 &= A_2(x_0) \wedge B_2(y_0)\end{aligned}\tag{2.39}$$

де « $\wedge$ » – операція логічного мінімуму ($\min$).

Далі потім знаходяться усічені функції приналежності

$$\begin{aligned}C'_1 &= (\alpha_1 \wedge C_1(z)), \\ C'_2 &= (\alpha_2 \wedge C_2(z)).\end{aligned}\tag{2.40}$$

3. Композиція: з використанням операції $\max$ (позначається як « $\vee$ ») проводиться об'єднання знайдених усічених функцій, що призводить до отримання підсумкової нечіткої підмножини для змінної виходу з функцією приналежності

$$\mu_\Sigma(z) = C(z) = C'_1(z) \vee C'_2(z) = (\alpha_1 \wedge C_1(z)) \vee (\alpha_2 \wedge C_2(z)).\tag{2.41}$$

4. Нарешті, приведення до чіткості (для знаходження z_0) проводиться, наприклад, центроїдним методом (як центр ваги для $\mu_\Sigma(z)$).

$$z_0 = \frac{\int_{\Omega} z \mu_\Sigma(z) dz}{\int_{\Omega} \mu_\Sigma(z) dz}\tag{2.42}$$

Моделі Такагі-Сугено (TS-моделі) також називають моделями Такагі-Сугено-Канга, квазілінійними моделями і нечіткими лінійними моделями. Від моделей Мамдані моделі Такагі-Сугено відрізняються формою правил. Якщо в разі моделі Мамдані, яка описує систему з одним входом і одним виходом, правила мали вигляд:

$$\text{ЯКЩО } (x = A) \text{ ТО } (y = B), \quad (2.43)$$

де A, B – нечіткі множини типу «малий» або «близький до 5»).

У випадку TS-моделі правила мають вигляд:

$$\text{ЯКЩО } (x = A) \text{ ТО } (y = f(x)). \quad (2.44)$$

Замість нечіткої множини висновок кожного правила має функцію $f(x)$, яка може бути нелінійною, хоча зазвичай використовуються лінійні функції. Таким чином, правила TS-моделі мають вигляд:

$$\text{ЯКЩО } (x = A) \text{ ТО } (y = ax + b). \quad (2.45)$$

Якщо в моделі системи типу SISO база правил має вигляд:

$$\begin{aligned} R1 : & \text{ЯКЩО } (x = A_1) \text{ ТО } (y = f_1(x)), \\ & \vdots \\ Rm : & \text{ЯКЩО } (x = A_m) \text{ ТО } (y = f_m(x)), \end{aligned} \quad (2.46)$$

то значення на виході моделі обчислюється на основі ступенів активізації окремих висновків f_i , $i = 1, \dots, m$, відповідно до формули:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_{Ai}(x) f_i(x)}{\sum_{i=1}^m \mu_{Ai}(x)} \quad (2.47)$$

TS-моделі поєднують в собі опис системи на основі лінгвістичних правил з традиційним функціональним поданням процесу її функціонування, який є звичним для нас, а часто, в разі реально існуючої системи, і добре нам відомим. Отримати опис функціонування системи на локальному рівні, і особливо лінійний опис, досить легко. Крім цього, є такі додаткові переваги.

- складні, нелінійні поверхні можна апроксимувати за допомогою безлічі плоских лінійних сегментів. Кожен такий сегмент можна задати одним правилом TS-моделі;

- TS-моделі є особливо придатними для опису регуляторів. В даний час є добре розвинені методики проектування лінійних регуляторів, і в разі складних нелінійних об'єктів можна розробити оптимальні лінійні регулятори для найбільш важливих їх характеристик (областей функціонування), а потім об'єднати їх шляхом створення одного нечіткого TS-регулятора;

- внаслідок локально лінійної структури TS-форми, її використання для представлення об'єктів і регуляторів спрощує підтвердження стійкості систем керування.

2.4 Математична модель та алгоритм роботи блоку розрахунку вагового коефіцієнту підстанції нижнього рівня

Метою даного параграфу є розробка математичної моделі, з допомогою якої можливо визначати ваговий коефіцієнт впливу трансформатора кінцевої трансформаторної підстанції у дворівневій системі регулювання напруги.

Зробимо припущення, що на точність визначення зазначеного коефіцієнта впливу впливають номінальна потужність трансформатора, завантаження трансформатора та його важливість.

Проведемо розробку нечіткої математичної моделі, яка дозволила б визначати цей ваговий коефіцієнт впливу K_j .

На першому етапі побудови моделі необхідно визначити можливий проміжок зміни параметрів, що впливають на визначення вагового коефіцієнта та проаналізувати їх. Вихідним сигналом моделі буде значення вагового коефіцієнта впливу K_j .

Вхідні параметри моделі та їх лінгвістична оцінка наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Вхідні та вихідні параметри моделі

№ з/п	Параметри	Назва	Діапазон зміни	Терми
<i>Входи моделі</i>				
1	S_{nom}	Номінальна потужність трансформатора	0 ... 2500 кВА	низька (L), середня (M), висока (H)
2	K_z	Коефіцієнт завантаження трансформатора	0...1	дуже низький (VL), низький (L), середній (M), високий (H), дуже високий (VH)
3	IMP	Важливість	0...1	низька (L), середня (M), висока (H)
<i>Вихід моделі</i>				
1	K_j	Ваговий коефіцієнт впливу	0... K_p	дуже високий (VH), високий (H), вище середнього (MH), середній (M), нижче середнього (LM), низький (L), дуже низький (VL)

Верхня межа діапазону значень коефіцієнта впливу визначається за виразом:

$$K_p = \frac{1}{n_T} \quad (2.48)$$

де n_T – кількість трансформаторів підстанцій нижнього рівня.

Структурна схема нечіткого блоку визначення вагового коефіцієнту K_j показана на рис. 2.9.

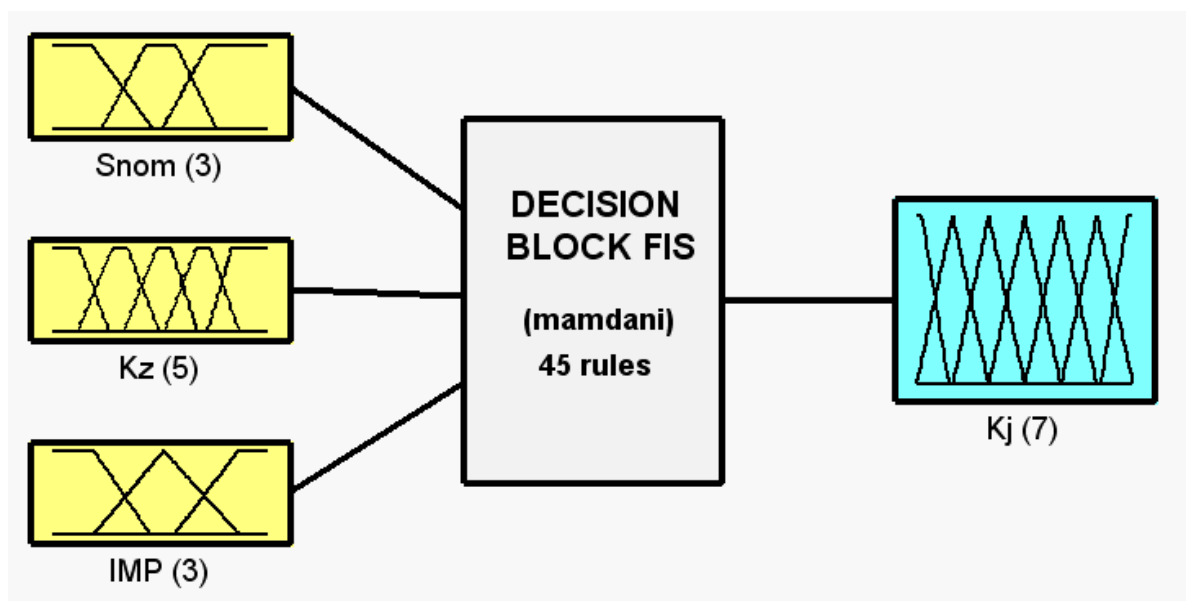


Рис. 2.9. Структурна схема нечіткого блоку визначення вагового коефіцієнту K_j

Для вирішення поставленої в роботі задачі в якості нечіткого алгоритму був обраний алгоритм Мамдані. Цей вибір обумовлено тим, що для даного алгоритму притаманні простота та прозорість.

Зважаючи на кількість входів та виходів, а також на кількість термів функцій приналежності, та для забезпечення повноти нечіткої моделі було складено 45 правил нечіткої продукції. ці правила, що являють собою експертну базу знань.

При розробці нечіткої моделі було використано функції приналежності чотирьох видів: трикутні, трапецієподібні, Z- і S- подібні. Ці функції описуються наступними виразами:

S-подібна, задається двома параметрами – a, b :

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

Z-подібна, задається двома параметрами – b, c :

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

Трикутна, задається трьома параметрами – a, b, c :

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

Трапецеїдальна, задається чотирма параметрами – a, b_1, b_2, c :

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

Графічне відображення функцій приналежності, та їх числові характеристики наведено на рис. 2.10 – 2.13.

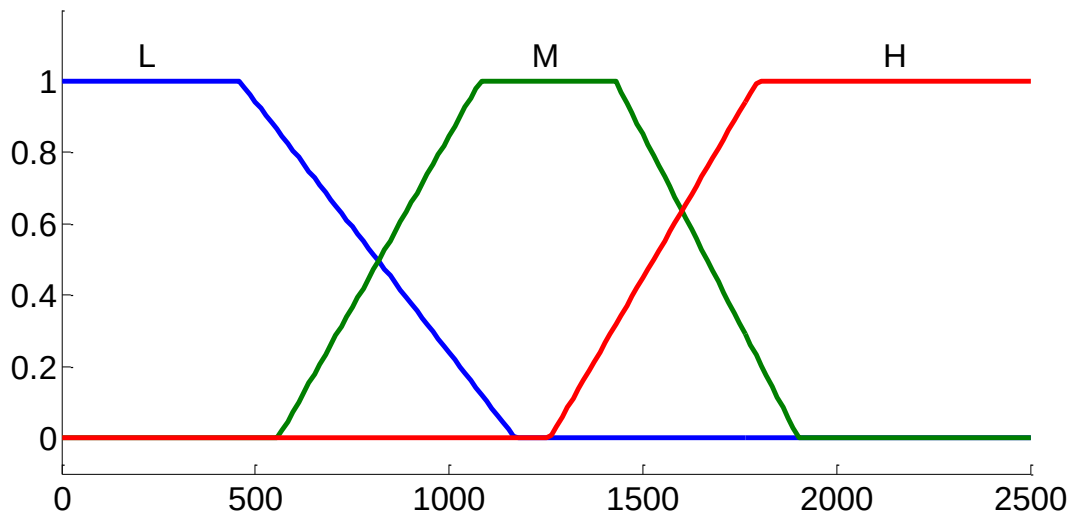


Рис. 2.10. Нечіткі значення змінної «Snom»

- *Низька* (L) – Z-подібна функція з параметрами [0 0 459.7 1170];
- *Середня* (M) – трапецеїдальна функція з параметрами [559 1080 1430 1901];
- *Висока* (H) – S-подібна функція з параметрами [1260 1796 2500 2500].

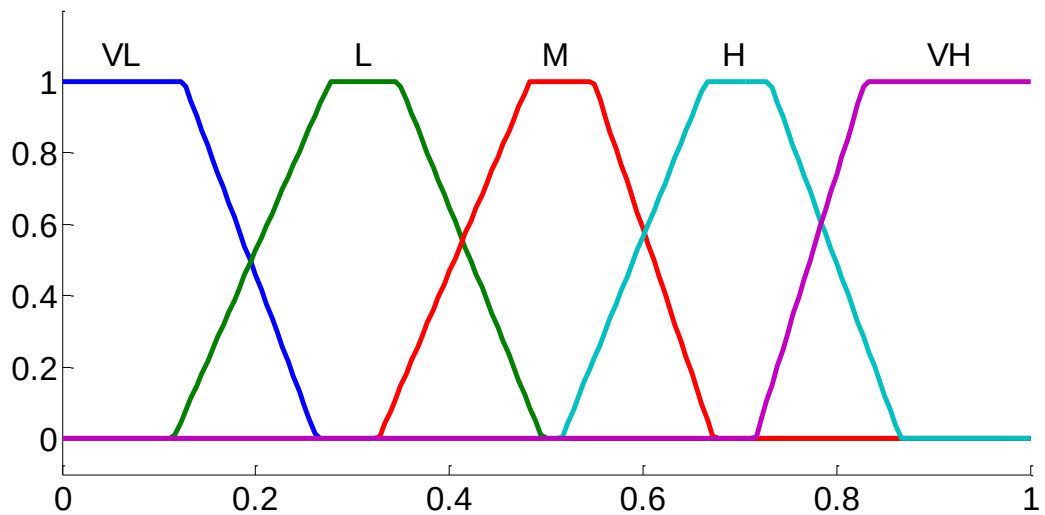


Рис. 2.11. Нечіткі значення змінної «Kz»

- *Дуже низький* (VL) – Z-подібна функція з параметрами [0 0 0.1257 0.263];
- *Низький* (L) – трапецеїдальна функція з параметрами [0.115 0.2765 0.348 0.496];
- *Середній* (M) – трапецеїдальна функція з параметрами [0.327 0.483 0.549 0.673];
- *Високий* (H) – трапецеїдальна функція з параметрами [0.516 0.665 0.731 0.8664];
- *Дуже високий* (VH) – S-подібна функція з параметрами [0.716 0.8294 1 1].

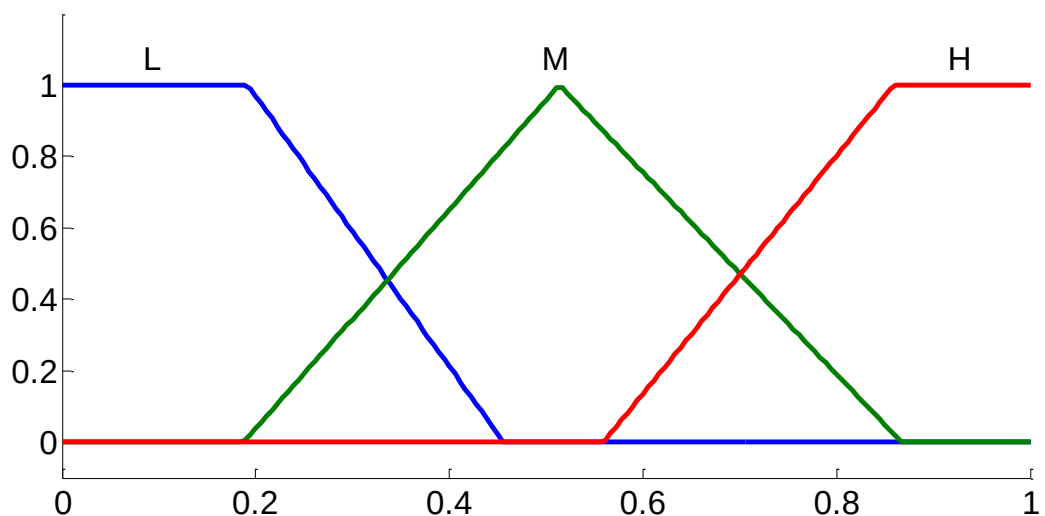


Рис. 2.12. Нечіткі значення змінної «IMP»

- *Низька* (L) – Z-подібна функція з параметрами [0 0 0.1918 0.456];
- *Середня* (M) – трикутна функція з параметрами [0.1876 0.5137 0.8673];
- *Висока* (H) – S-подібна функція з параметрами [0.5595 0.859 1 1].

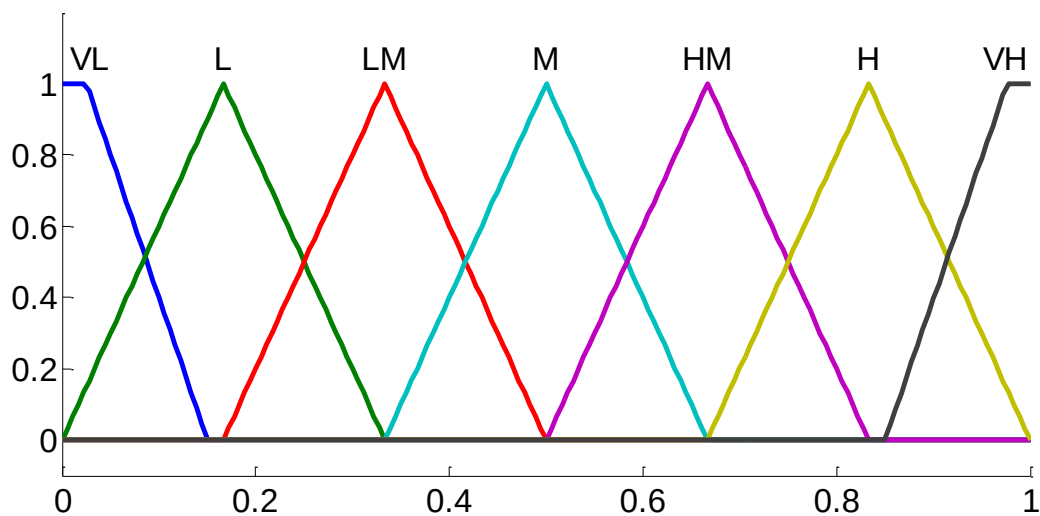


Рис. 2.13. Нечіткі значення вихідної змінної «IMP»

- *Дуже низький* (VL) – Z-подібна функція з параметрами [0 0 0.02529 0.15];
- *Низький* (L) – трикутна функція з параметрами [0 0.1667 0.3334];
- *Нижче середнього* (LM) – трикутна функція з параметрами [0.1666 0.3333 0.5];
- *Середній* (M) – трикутна функція з параметрами [0.3332 0.5 0.6668];
- *Вище середнього* (HM) – трикутна функція з параметрами [0.5 0.6668 0.8332];
- *Високий* (H) – трикутна функція з параметрами [0.6664 0.8332 1];

- *Дуже високий* (VH) – S-подібна функція з параметрами [0.85 0.9762 1 1].

Графічні залежності (тривимірні поверхонь відгуку), які відображають зміну виходів моделі в залежності від значень її входів наведено на рис. 2.14 – 2.16.

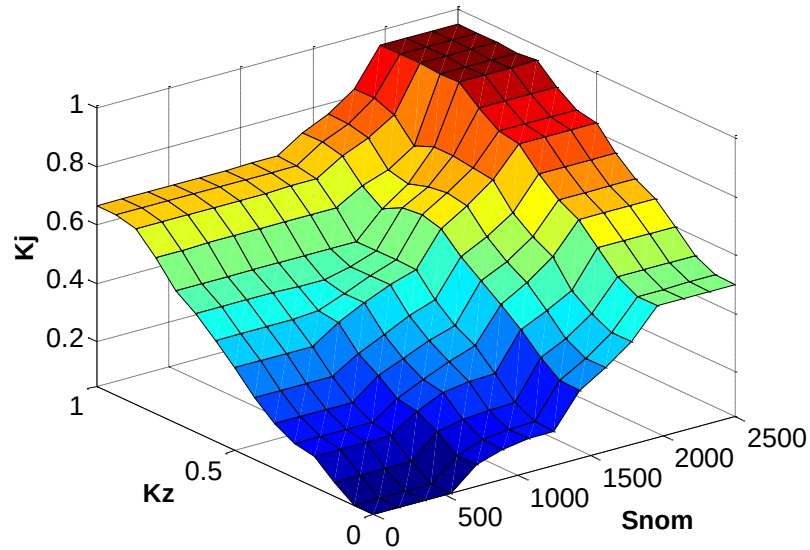


Рис. 2.14. Графік $K_j = f(S_{nom}, K_z)$

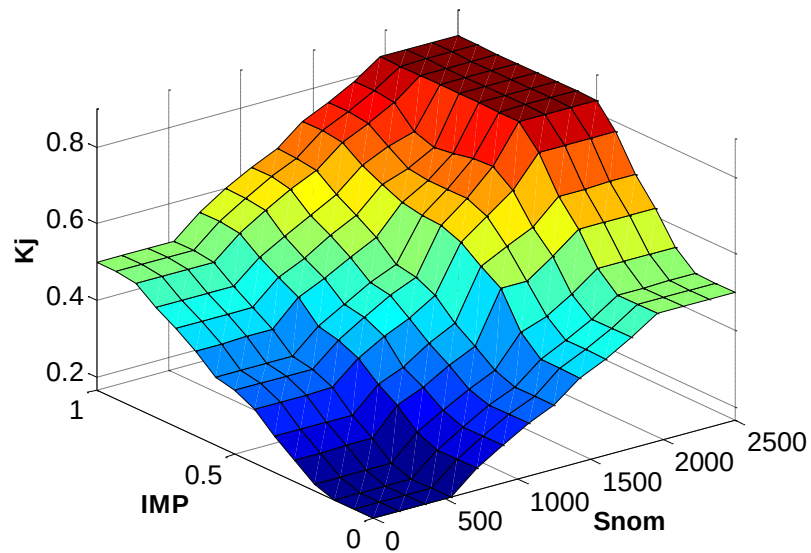


Рис. 2.15. Графік $K_j = f(S_{nom}, IMP)$

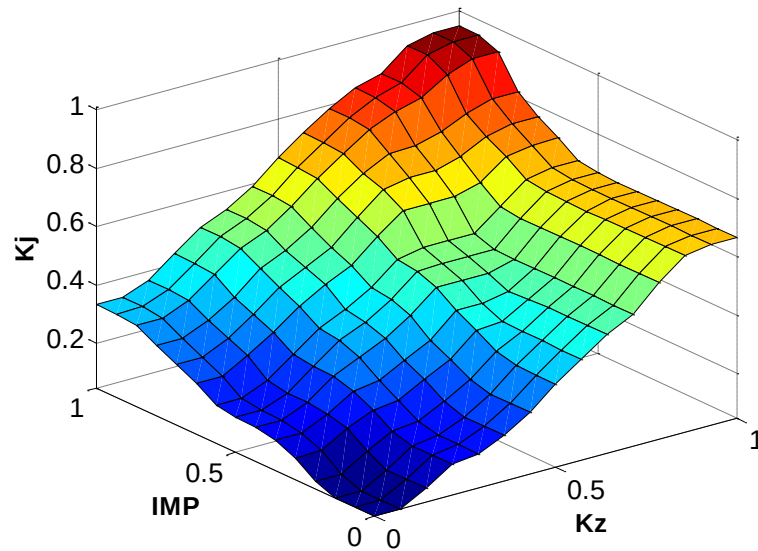


Рис. 2.16. Графік $K_j = f(K_z, IMP)$

Як видно з графіків, які зображені на рис. 2.14 – 2.16, дані поверхні мають відносно «плавний» характер, що свідчить про досить низьку чутливість виходу.

Результати проведеного комп'ютерного моделювання показали, що для дефазифікації отриманих нечітких значень коефіцієнта K_j найбільш доцільно використати центроїдний метод.

Ілюстрація роботи нечіткої моделі визначення K_j наведена на рис. 2.16.

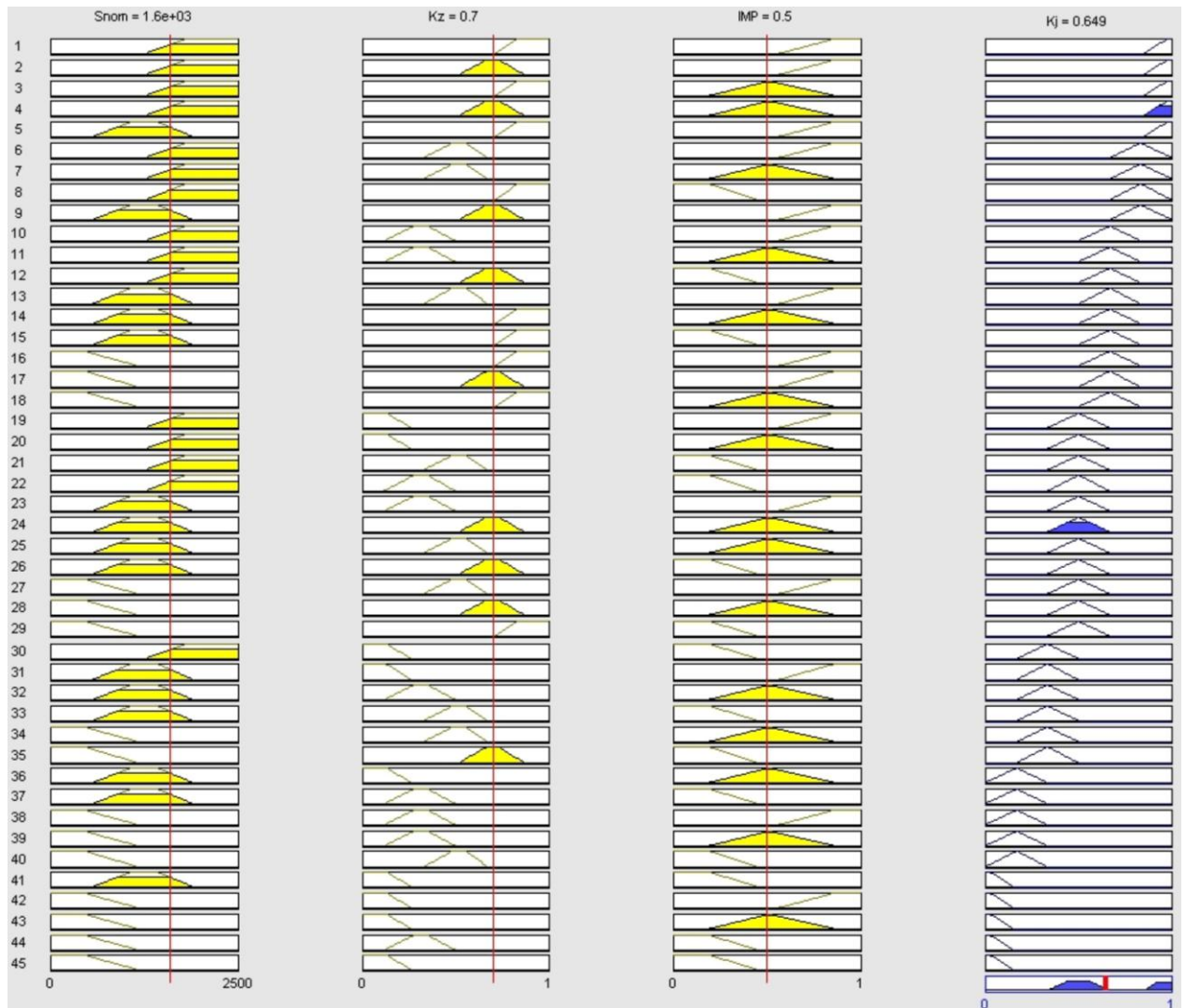


Рис. 2.17. Ілюстрація роботи розробленої нечіткої моделі визначення вагового наведена K_j

Висновки до розділу

1. В результаті проведеного аналізу існуючих САК регулювання напруги в РЕМ було визначено, що для зниження кількості перемикань механічного РПН трансформатора найбільш доцільно обладнати трансформатори з ПБЗ на кінцевих підстанціях безконтактними пристроями регулювання напруги об'єднати ці регулятори з регулятором на районній підстанції в дворівневу систему, яка дає дозвіл на переключення механічного пристрою РПН лише в тому випадку, коли певна кількість пристроїв

регулювання кінцевих трансформаторних підстанцій вичерпали діапазон регулювання.

2. Запропоновано закон автоматичного регулювання напруги трансформатора верхнього рівня, за якого перемикання не відбувається, поки визначена пороговим коефіцієнтом кількість пристроїв регулювання нижнього рівня забезпечує входження значень напруги на затискачах споживачів в заданих межах. Цим досягається зниження кількості перемикань механічного РПН.

3. В результаті проведених досліджень встановлено, що для вирішення визначення вагового коефіцієнту підстанції нижнього рівня найбільш доцільно застосувати математичний апарат нечіткої логіки. Вказаний математичний апарат дозволяє створювати математичні моделі, які з необхідною точністю описують взаємозв'язок між входами та виходами без повного уявлення про фізичну суть таких взаємозв'язків.

4. На основі нечіткої логіки було створено математичну модель і алгоритм роботи блоку формування вагового коефіцієнту підстанції нижнього рівня. В якості алгоритму нечіткого виводу найбільш доцільно застосувати алгоритм Мамдані. Цей вибір обумовлено тим, що даний алгоритм є найбільш простим для програмування, а також володіє простотою і наочністю всіх його складових.

РОЗДІЛ 3

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДВОРІВНЕВОЇ НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Для перевірки працездатності розробленої нечіткої САК а також для визначення ефекту від застосування даної системи найбільш доцільно скористатись методом комп'ютерного імітаційного моделювання.

Для цього необхідно вирішити наступні задачі:

- на основі створених математичних моделей розробити комп'ютерні імітаційні моделі дворівневої системи автоматичного регулювання напруги;
- з допомогою розроблених комп'ютерних моделей провести аналіз ефекту від застосування нечіткої САК режимами напруги РЕМ.

На рис. 3.1 наведено принципову схему РЕМ, на прикладі якої і здійснювалась оцінка ефективності роботи розробленої САК режимами напруги в РЕМ.

Як видно з рис. 3.1, до складу РЕМ входить районна підстанція з трансформатором ТМН-10000/35 (який оснащено механічним пристроєм РПН) та 4 відхідні повітряні лінії з трансформаторами ТМ-1000/10, ТМ-1600/10 та ТМ-2500/10 (які обладнано безконтактними пристроями РПН).

Для створення математичної моделі системи автоматичного регулювання напруги силового трансформатора скористаємося її функціональною схемою, яка приведена на рис. 3.2.

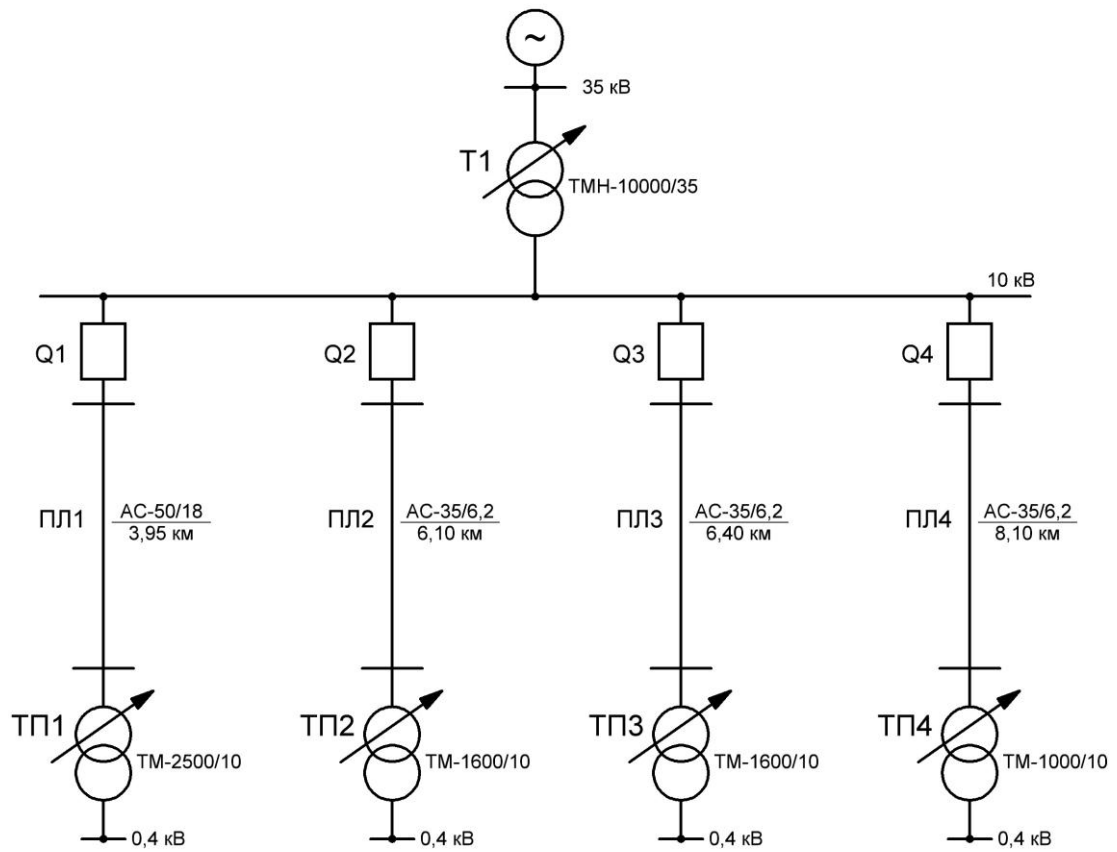


Рис. 3.1. Принципова схема РЕМ

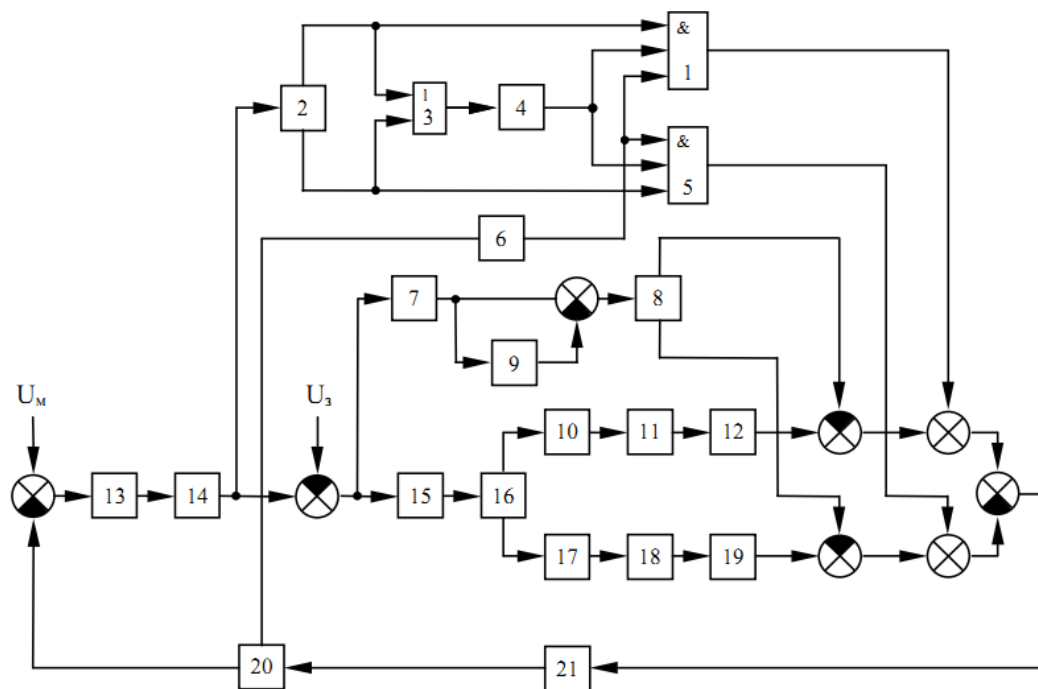


Рис. 3.2. Функціональна схема системи автоматичного регулювання напруги силового трансформатора

3.1 Комп'ютерна імітаційна модель дворівневої нечіткої системи автоматичного регулювання напруги в РЕМ

На рис. 3.3. наведена узагальнена комп'ютерна імітаційна модель дворівневої системи автоматичного регулювання напруги в РЕМ.

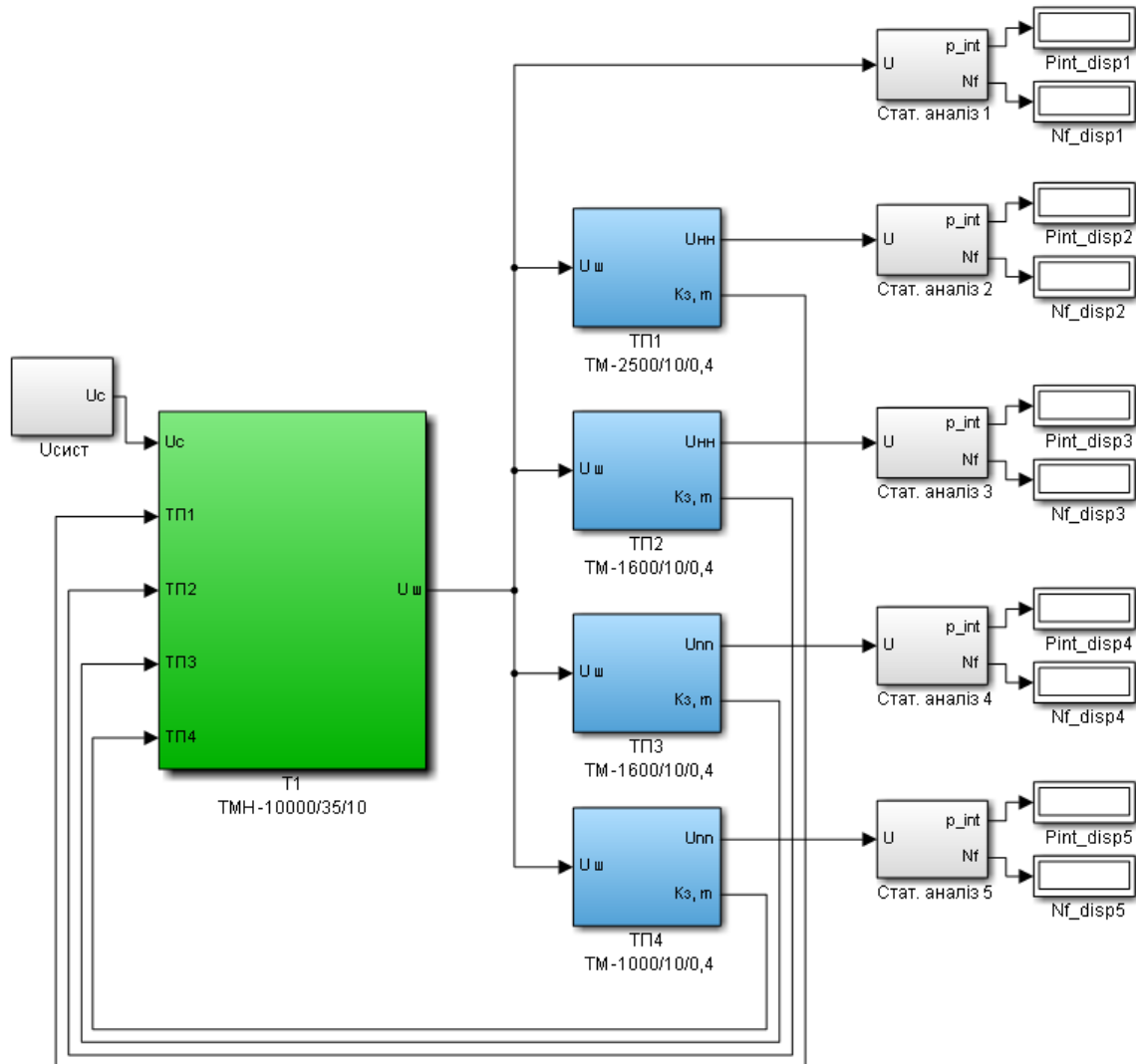


Рис. 3.3. Узагальнена комп'ютерна імітаційна модель дворівневої нечіткої системи автоматичного регулювання напруги в РЕМ

На рис. 3.3: «Т1» – модель силового трансформатора підстанції вищого рівня (ТМН-10000/35);

- «ТП1» – «ТП4» – моделі трансформаторних підстанцій нижчого рівня (напругою 10/0,4 кВ);

- «Усист» – модель живлячої мережі;
- «Стат. аналіз1» – «Стат. аналіз5» – блоки розрахунку статистичних показників ПЯЕ;
- «Pint_disp1» – «Pint_disp5» – блоки відображення значень інтегральної ймовірності потрапляння усталеного відхилення напруги в нормально допустимі межі згідно ГОСТ 13109-97;
- «Nf_disp1» – «Nf_disp5» – блоки відображення кількості не потраплянь значень усталеного відхилення напруги в нормально допустимі межі.

На рис. 3.4 наведено комп'ютерну імітаційну модель підстанції вищого рівня з трансформатором ТМН-10000/35/10, що реалізована в блоці Т1 (рис. 3.3).

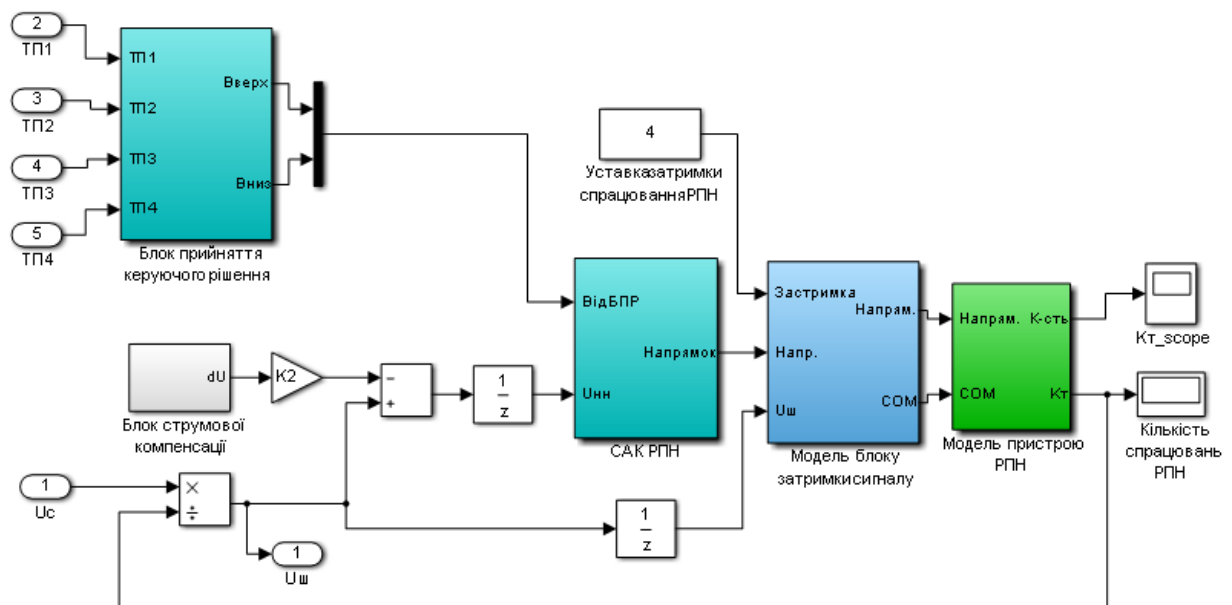


Рис. 3.4. Комп'ютерна імітаційна модель підстанції вищого рівня з трансформатором ТМН-10000/35/10

Основними елементами даної комп'ютерної моделі є:

- «САК РПН» – блок, що реалізує закон автоматичного регулювання підстанції вищого рівня (2.5);

- «Модель блоку затримки сигналу» – блок, в якому реалізується затримка сигналу спрацювання механічного пристрою РПН згідно (2.5);
- «Модель пристрою РПН» – модель механічного пристрою РПН силового трансформатора;
- «Блок прийняття керуючого рішення» - модель блоку, в якому розраховуються значення вагових коефіцієнтів K_j для кожної з підстанцій, порівнюється сума цих значень із величиною порогового коефіцієнта K_n та приймається рішення щодо необхідності спрацювання механічного пристрою РПН.

На рис. 3.5 наведено комп'ютерну модель САК механічного РПН.

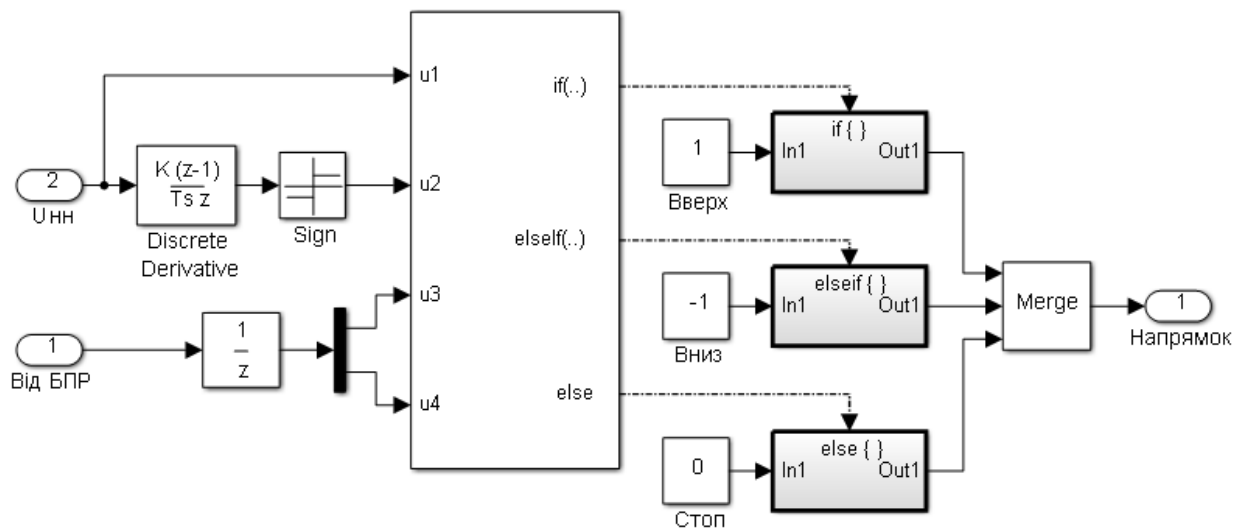


Рис. 3.5. Комп'ютерна модель САК механічного пристрою РПН

Дана модель реалізує закон керування (2.5) підстанції вищого рівня. Слід зазначити що величина огинаючої графіка діючих значень напруг розраховується з допомогою стандартного блоку диференціювання сигналу «Discrete Derivative»

На рис. 3.6 показана модель блоку затримки сигналу спрацювання механічного пристрою РПН.

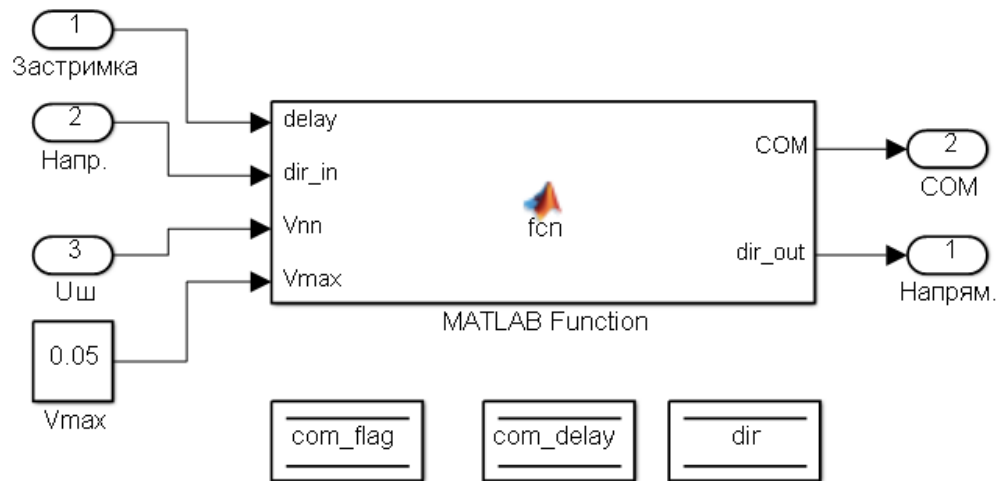


Рис. 3.6. Модель блоку затримки сигналу спрацювання механічного пристрою РПН

Алгоритм роботи блоку затримки сигналу реалізовано програмно з допомогою мови програмування MATLAB та стандартного блоку «Matlab function».

На рис. 3.7 наведено комп'ютерну імітаційну модель механічного пристрою РПН.

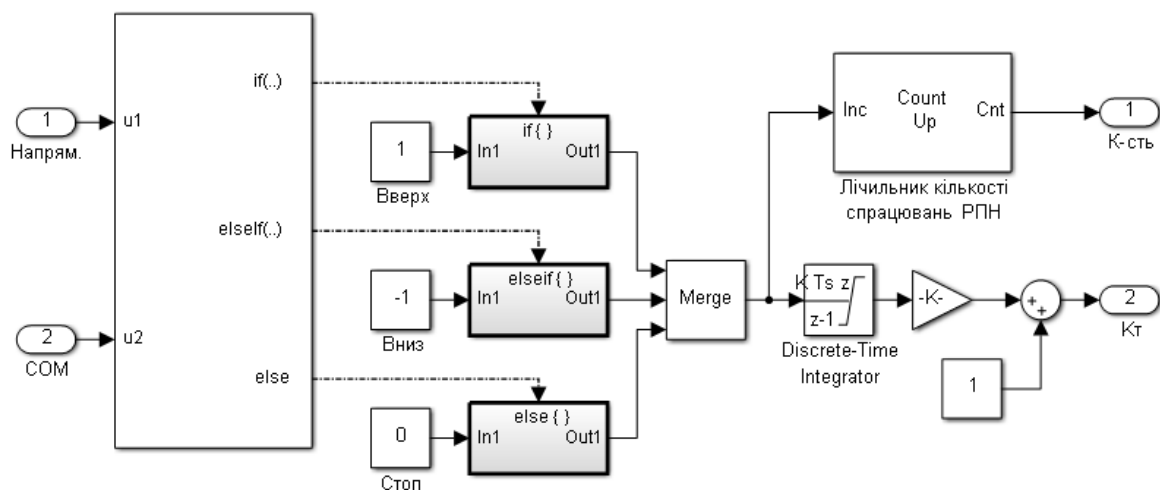


Рис. 3.7. Комп'ютерна імітаційна модель механічного пристрою РПН

Вхідними сигналами даного блоку є:

- «Напрям.» – напрям перемикання пристрою РПН (що надходить від САК пристроєм РПН);

- «СОМ» – сигнал дозволу перемикання, що надходить від блоку затримки спрацювання пристрою РПН.

Вихідним сигналом блоку моделі механічного пристрою РПН є значення коефіцієнту трансформації силового трансформатора.

На рис. 3.8 показана модель блоку прийняття керуючого рішення.

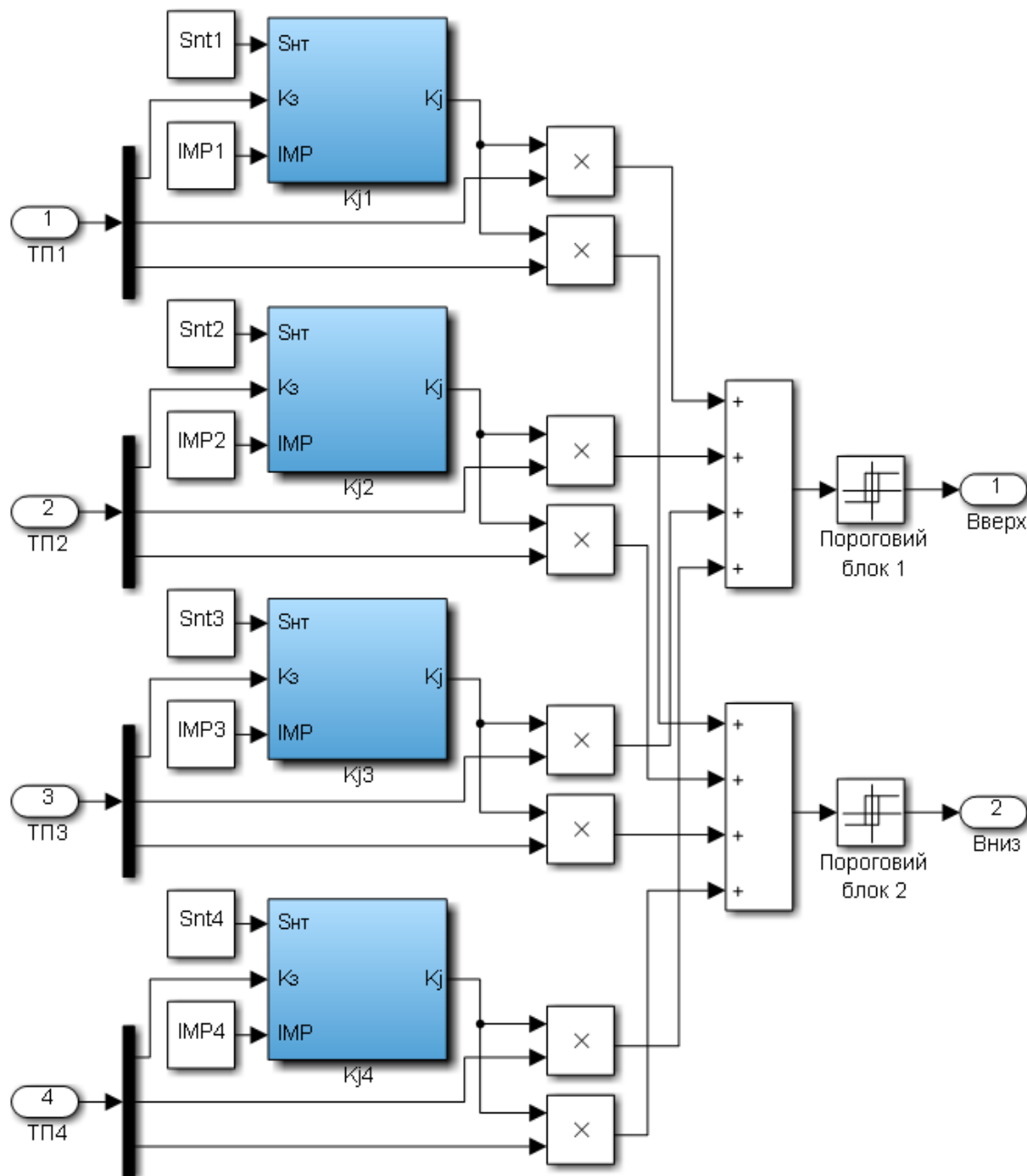


Рис. 3.8. Модель блоку прийняття керуючого рішення

Як видно з рис. 3.8, дана модель складається з чотирьох аналогічних каналів керування, в яких визначаються значення вагових коефіцієнтів K_j для кожної з підстанцій ТП1 – ТП4. Після знаходження їх суми (в блоках суматорів) відбувається порівняння отриманих результатів із пороговими значеннями коефіцієнту K_n . Виходами даного блоку є логічні сигнали, які визначають необхідність та напрям спрацювання механічного пристрою РПН.

На рис. 3.9 наведено модель блоку визначення вагового коефіцієнту підстанції нижнього рівня.

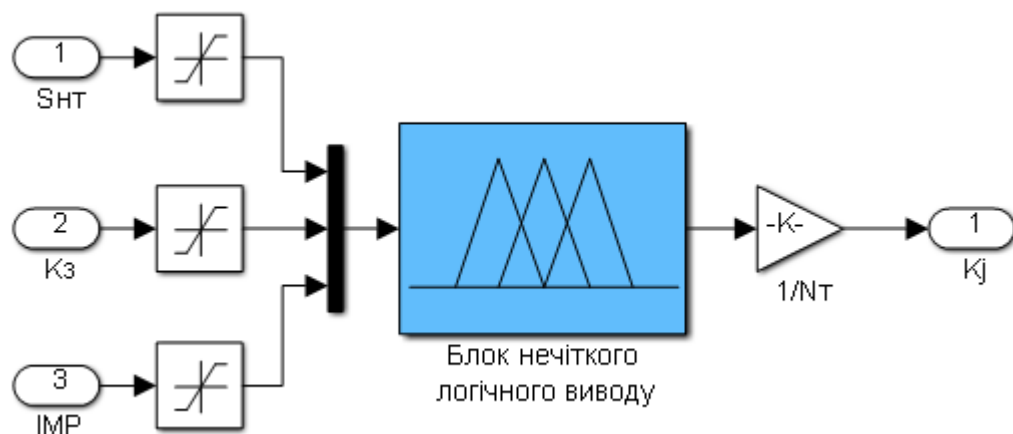


Рис. 3.9. Модель блоку визначення вагового коефіцієнту підстанції нижнього рівня

Як видно з рис. 3.9, вхідними сигналами цього блоку є значення номінальної потужності трансформатора, його коефіцієнт завантаження та коефіцієнт важливості. Дані сигнали через блоки обмеження надходять до блоку нечіткого логічного виводу, алгоритм роботи якого детально описано в розділі 2.

На рис. 3.10 наведено модель підстанції нижнього рівня з трансформаторами номінальною напругою 10/0,4 кВ, оснащеними безконтактними пристроями РПН.

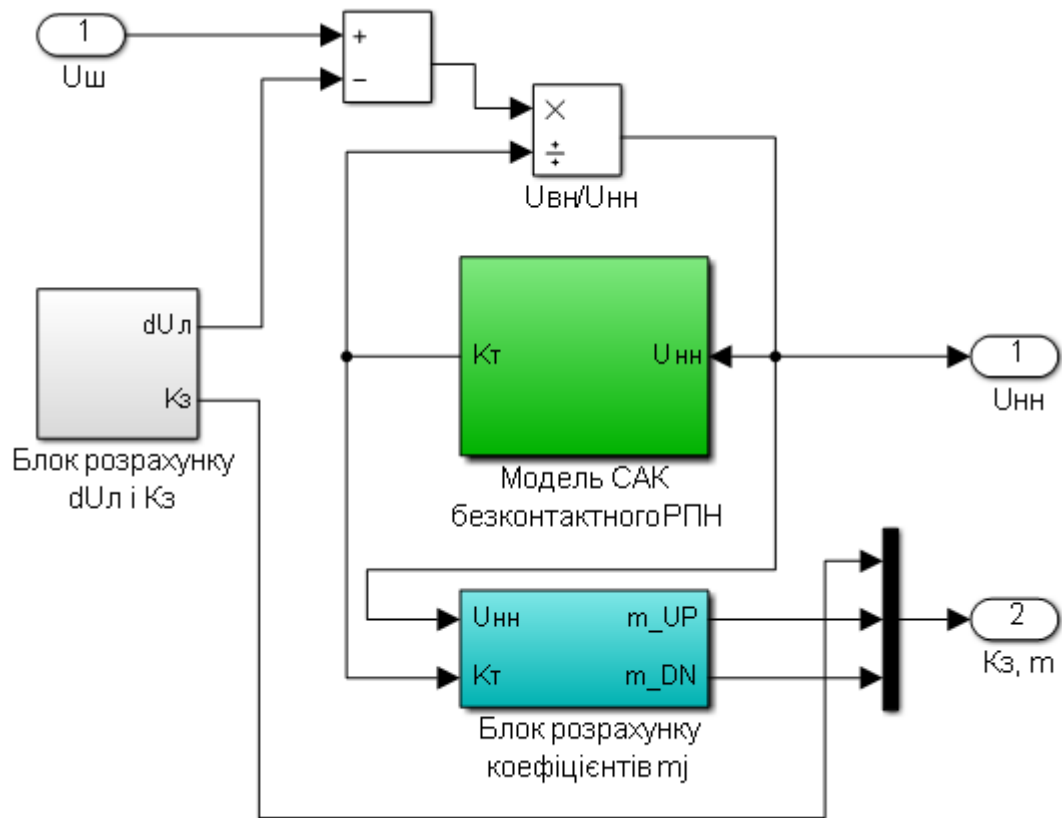


Рис. 3.10. Модель підстанції нижнього рівня з трансформаторами номінальною напругою 10/0,4 кВ

Як видно з рис. 3.10 основними елементами даної моделі є такі блоки:

- «Модель САК безконтактного РПН» – модель САК підстанцією нижнього рівня, що реалізує закон автоматичного керування (2.3);
- «Блок розрахунку коефіцієнтів m_j » – блок визначення коефіцієнтів m_j згідно з виразами (2.7);
- «Блок розрахунку $dU_{\text{л}}$ і K_3 » – модель блоку розрахунку спаду напруги в лінії $\Delta U_{\text{л}}$ та коефіцієнта завантаження K_3 трансформатора підстанції нижнього рівня (модель блоку струмової компенсації).

Внутрішню структуру перерахованих блоків показано на рис. 3.11 – 3.13.

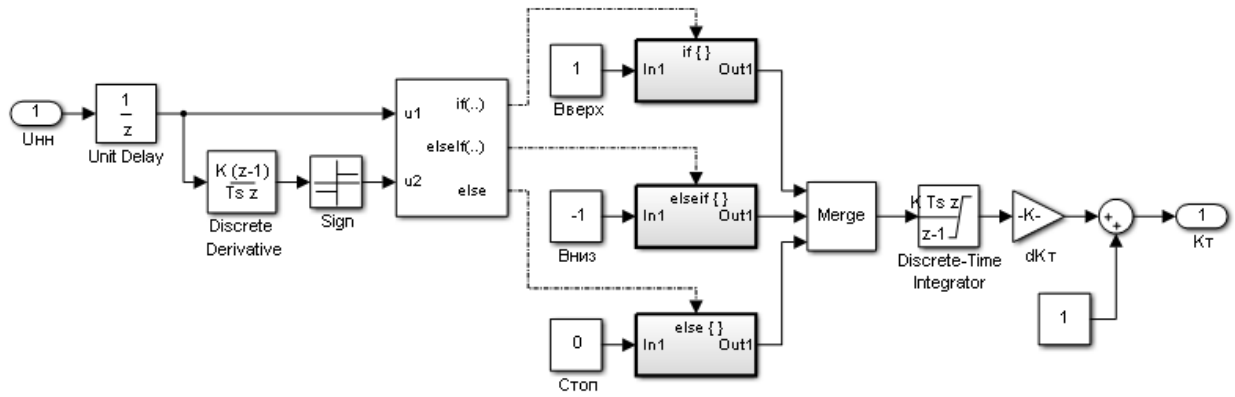


Рис. 3.11. Модель блоку САК безконтактного пристрою РПН

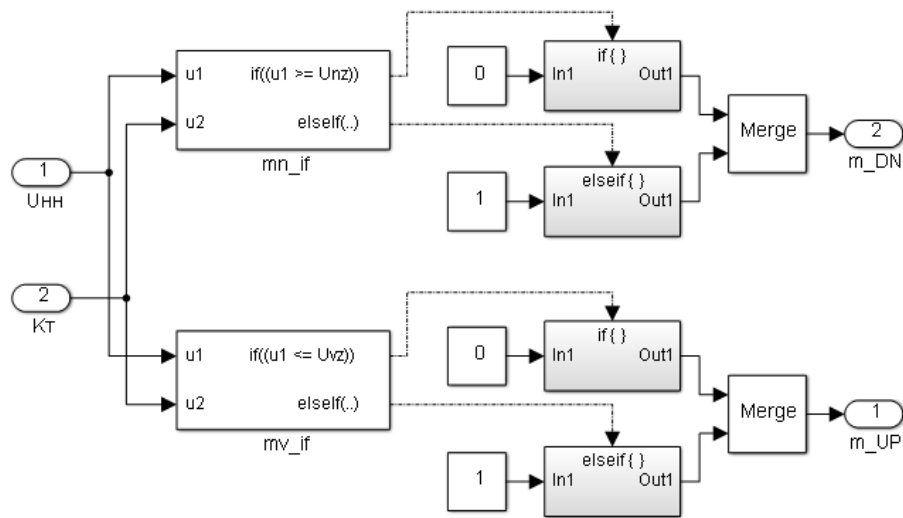


Рис. 3.12. Модель блоку визначення коефіцієнтів m_j згідно співвідношень (2.7)

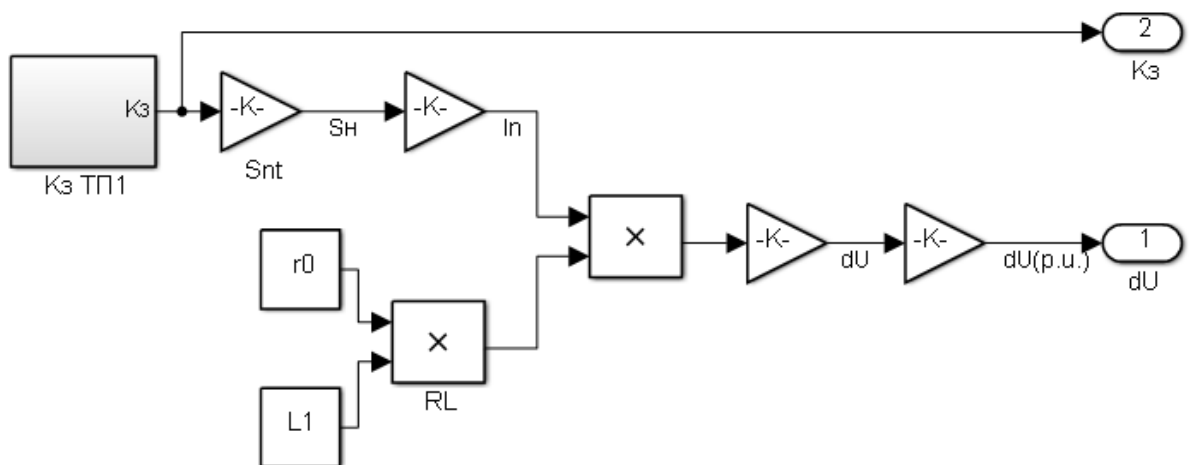


Рис. 3.13. Блок розрахунку ΔU_L і K_3

Модель блоку визначення статистичних показників усталеного відхилення трифазної напруги $V, \%$ наведена на рис. 3.14.

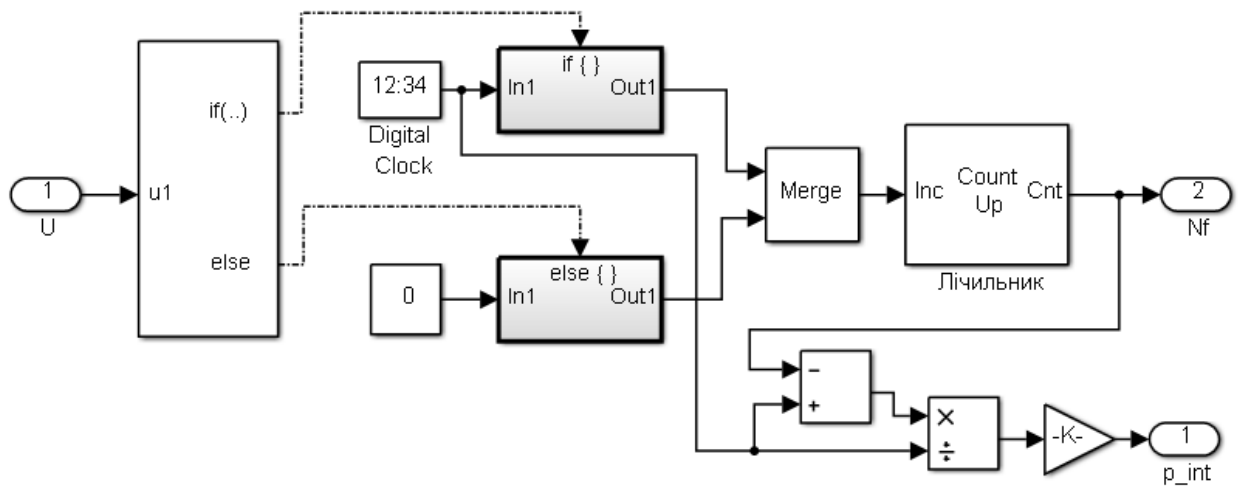


Рис. 3.14. Модель блоку визначення статистичних показників усталеного відхилення трифазної напруги $V, \%$

3.2 Аналіз ефекту від застосування розробленої дворівневої нечіткої системи автоматичного регулювання напруги

Визначення аналізу ефекту від застосування розробленої САК режимами напруг РЕМ найдоцільніше провести шляхом застосування методу комп'ютерного імітаційного моделювання.

В якості базової моделі для порівняння було обрано стандартну САК режимами напруги РЕМ, яка являє собою сукупність незалежних регуляторів пристрою РПН для підстанцій вищого та нижчого рівня. Узагальнена структурна схема моделі базової САК наведена на рис. 3.15. Структурна схема моделі регулятора підстанції вищого рівня для випадку базової САК наведена на риос. 3.16.

Фактично базова САК відрізняється від розробленої лише відсутністю блоку прийняття керуючого рішення та блоку визначення коефіцієнтів m_j .

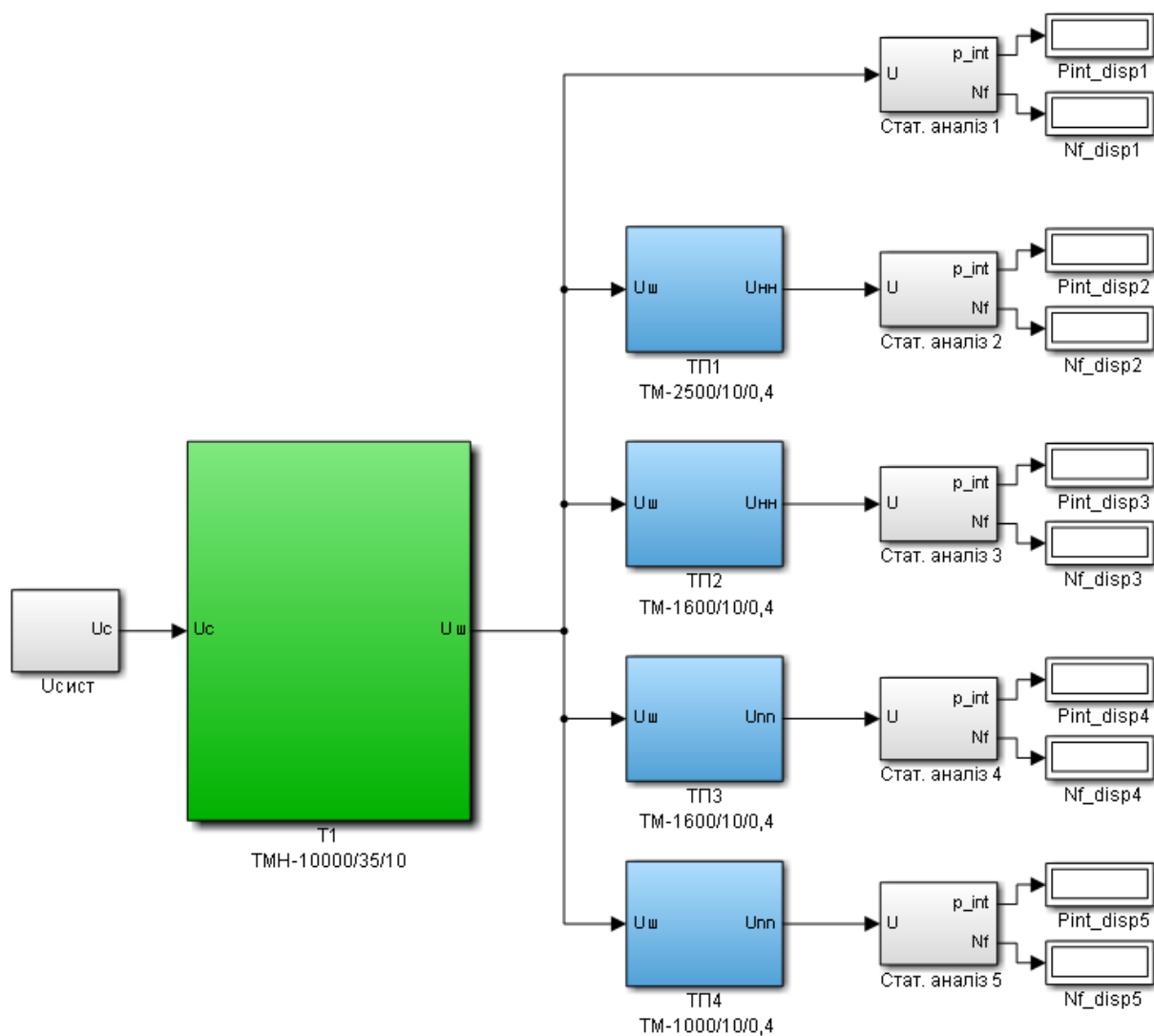


Рис. 3.15. Узагальнена структурна схема моделі базової САК

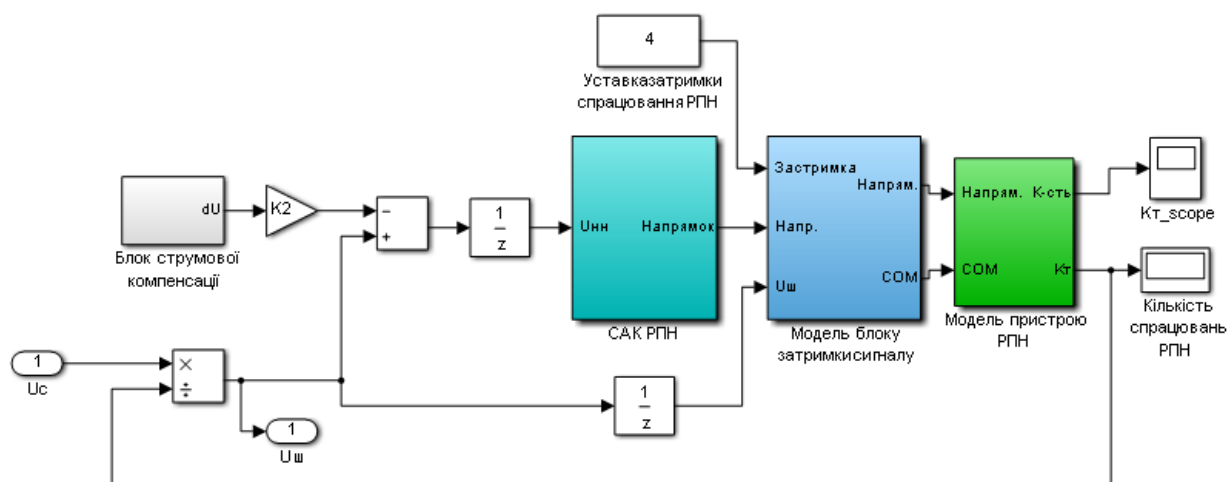


Рис. 3.16. Структурна схема моделі регулятора підстанції вищого рівня для випадку базової САК

Вихідні дані для моделювання, а саме номінальні потужності силових трансформаторів ТП1-ТП4, марки та довжини повітряних ліній, а також значення коефіцієнту важливості ІМР наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Вихідні дані до моделювання

№ ТП	Номінальна потужність тр-ра, $S_{\text{ном}}$, МВА	Марка ПЛ	Довжина ПЛ, км	Значення коефіцієнту важливості, ІМР
ТП1	2,5	АС-50/18	3,95	0,90
ТП2	1600	АС-35/6,2	6,10	0,80
ТП3	1600	АС-35/6,2	6,40	0,70
ТП4	1000	АС-35/6,2	8,10	0,30

Навантаження для кожної з підстанцій ТП1 – ТП4 моделювалось з допомогою графіку зміни коефіцієнта завантаження трансформатора. Приклад такого графіка для підстанції ТП3 наведено на рис. 3.17.

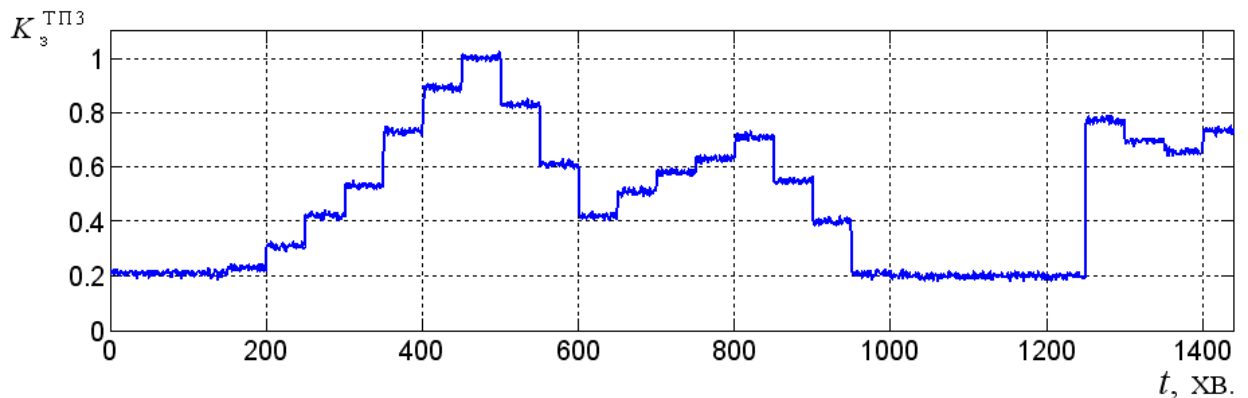


Рис. 3.17. Графік зміни коефіцієнта завантаження силового трансформатора для підстанції ТП3.

Результати комп'ютерного моделювання режимів роботи РЕМ для випадку розробленої та базової САК наведено на рис. 3.18 – 3.25 та у табл. 3.2.

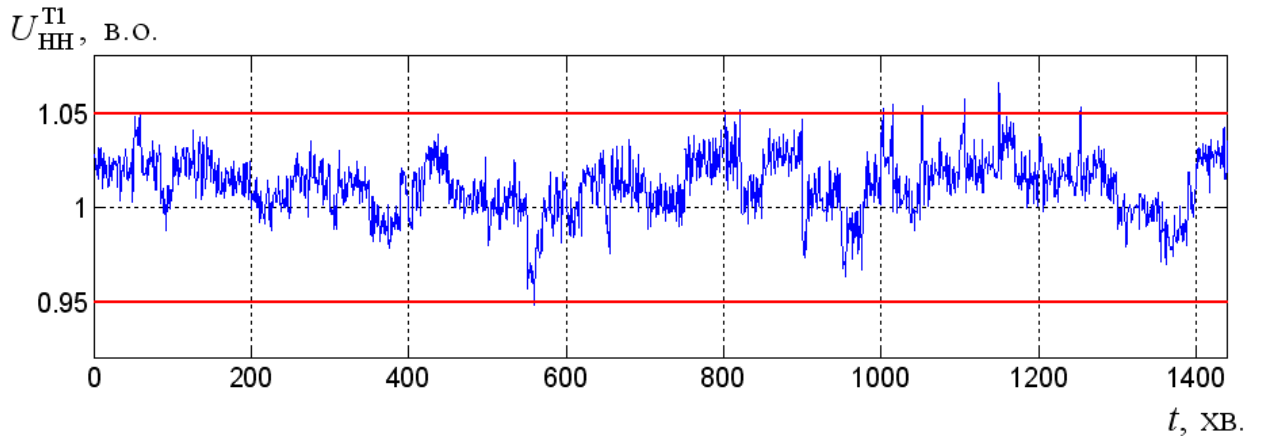


Рис. 3.18. Графік зміни напруги на стороні НН силового трансформатора ТМН-10000/35 для випадку базової САК (в.о.)

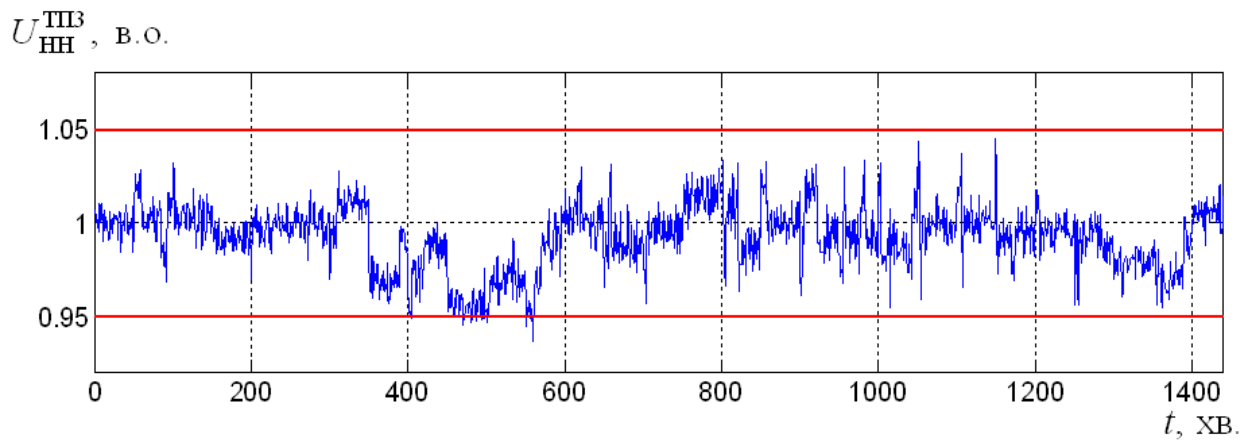


Рис. 3.19. Графік зміни напруги на стороні НН силового трансформатора ТПЗ для випадку базової САК (в.о.)

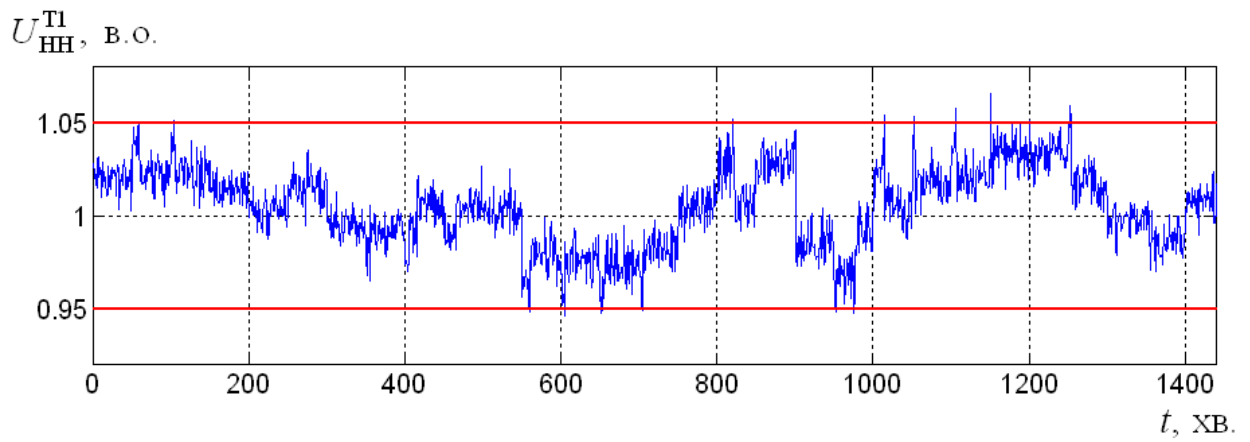


Рис. 3.20. Графік зміни напруги на стороні НН силового трансформатора ТМН-10000/35 для випадку розробленої САК (в.о.)

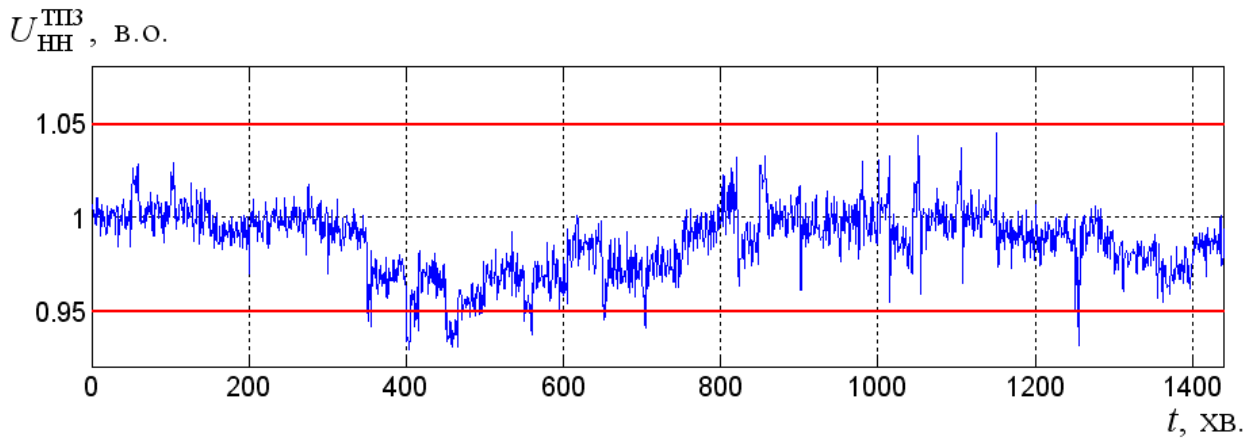


Рис. 3.21. Графік зміни напруги на стороні НН силового трансформатора ТПЗ для випадку розробленої САК (в.о.)

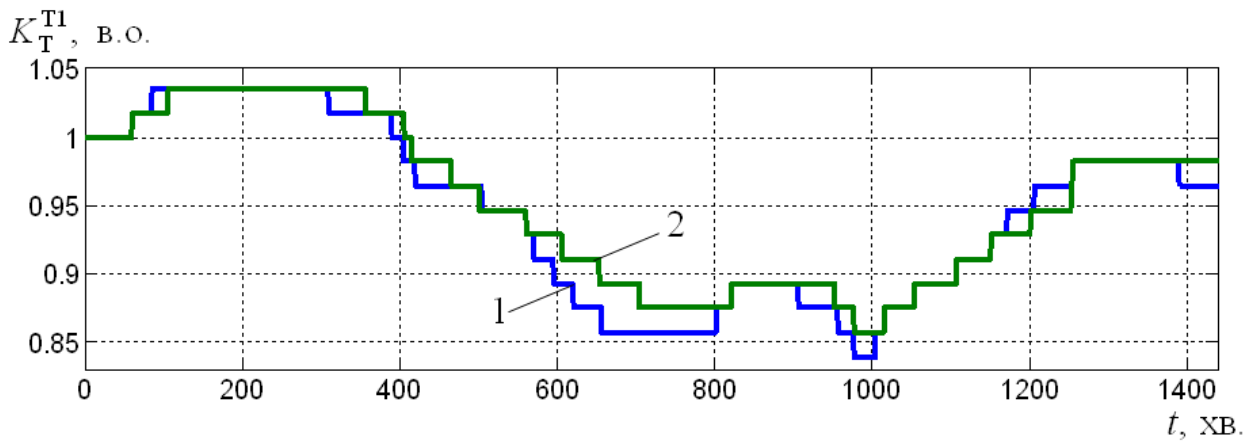


Рис. 3.22. Графік зміни коефіцієнтів трансформації силового трансформатора ТМН-10000/35 для випадку базової (1) та розробленої (2) САК

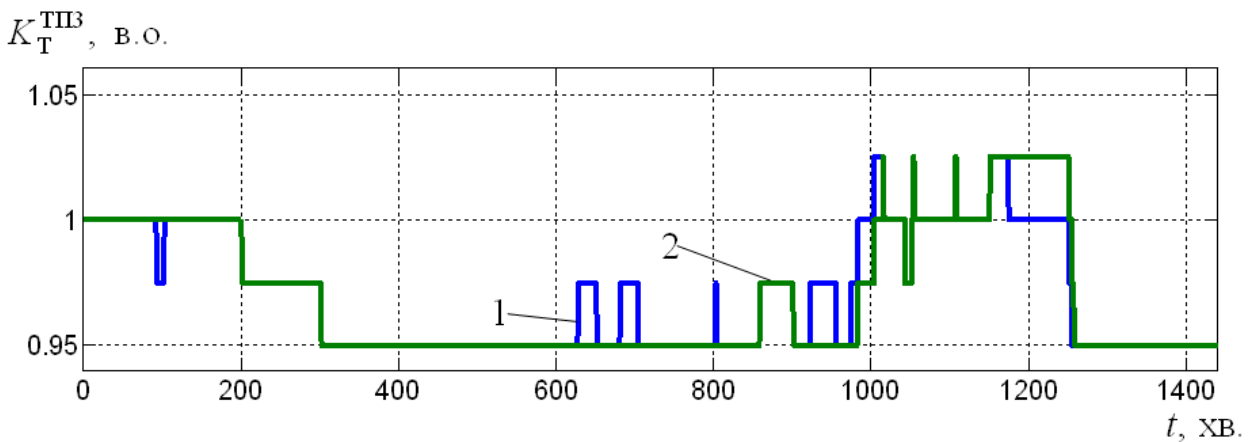


Рис. 3.23. Графік зміни коефіцієнтів трансформації силового трансформатора ТПЗ з безконтактним пристроєм РПН для базової (1) та розробленої (2) САК

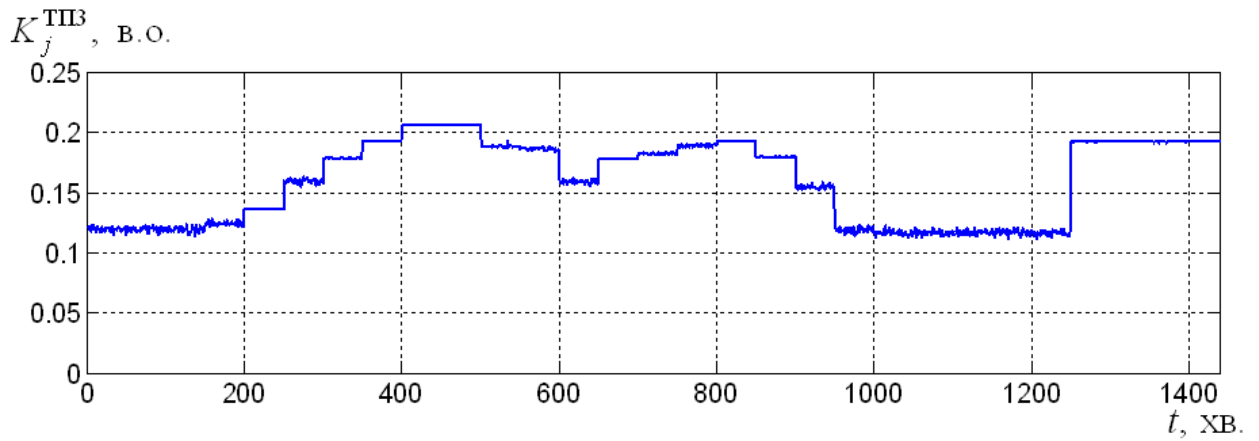


Рис. 3.24. Графік зміни вагового коефіцієнту K_j трансформаторної підстанції нижнього рівня ТПЗ (вихідний сигнал блоку визначення K_j для ТПЗ)

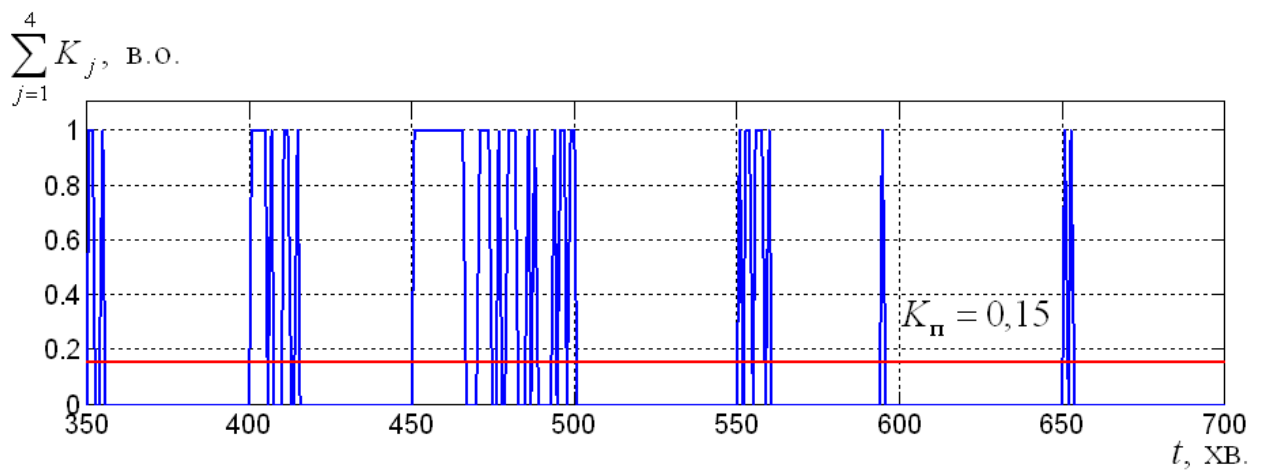


Рис. 3.25 Графік зміни сумарного значення вагових коефіцієнтів ΣK_j (вихідний сигнал блоку прийняття керуючого рішення)

Як видно з результатів комп'ютерного моделювання (рис. 3.18 – 3.25) та їх статистичної обробки (табл. 3.2), при використанні як базової системи, так і розробленої дворівневої нечіткої системи, значення усталеного відхилення напруги задовольняють діючим нормативним вимогам відносно даного показника якості. Проте, у випадку застосування розробленої у роботі САК кількість перемикачів механічного пристрою РПН виявилась на 19,20 % меншою є її суттєвою перевагою. Цей ефект забезпечується за рахунок поєднання САК напруги на підстанціях вищого та нижчого рівнів в єдину САК.

Таблиця 3.2. Статистична обробка результатів моделювання

№ з/п	Точка вимірювання напруги	Матем. очікув., $M[U]$, в.о.	СКВ, σ , %	К-сть непотр., $N_{н.п.}$, шт.	Інтегральна ймовірність, $p(V \leq V_{н.д.})$, в.о.	К-сть спрацюв. РПН, $N_{РПН}$, шт.
Базова САК						
1	НН Т1	1,011	0,015	10	0,993	26
2	ТП1	0,992	0,017	18	0,987	30
3	ТП2	0,992	0,017	14	0,990	30
4	ТП3	0,991	0,018	37	0,974	28
5	ТП4	0,997	0,013	1	0,999	27
Розроблена САК						
1	НН Т1	1,005	0,020	16	0,988	21
2	ТП1	0,986	0,017	43	0,970	20
3	ТП2	0,987	0,017	41	0,971	20
4	ТП3	0,984	0,018	56	0,961	18
5	ТП4	0,993	0,014	9	0,993	22

Висновки до розділу

1. Для визначення ефекту від використання запропонованої в роботі дворівневої нечіткої системи регулювання напруги в РЕМ шляхом імітаційного моделювання було створено комп'ютерні моделі САК в середовищі «Matlab/Simulink». В основу даних моделей покладено розроблені в роботі закони автоматичного регулювання і нечіткий алгоритм функціонування блоку прийняття керуючого рішення.

2. Статистична обробка результатів комп'ютерного моделювання показала, що при застосуванні як базової, так і розробленої САК значення

усталеного відхилення напруги лежать в допустимих межах. Але, у випадку застосування розробленої САК кількість перемикань механічного пристрою РПН виявилась на 19,20 % меншою, що є її суттєвою перевагою.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз небезпечних факторів, та заходи по їх усуненню

Одним із заходів, що забезпечують безпечну експлуатацію електроустановок є захисне заземлення.

Захисне заземлення – це навмисне електричне з'єднання з землею металічних неструмоведучих частин, що можуть опинитися під дією напруги внаслідок замкнення на корпус та по іншим причинам.

Призначення захисного заземлення – усунення небезпеки ураження струмом у випадку доторкання до корпусу електроустановки та до інших металевих частин, що опинилися під напругою.

Перед початком робіт в електроустановках персоналом даної електроустановки повинні бути виконані заходи, які забезпечують безпеку робіт:

1. Вимкнення обладнання, яке виводиться в ремонт.
2. Встановлення тимчасових огорож.
3. Приєднання переносного заземлення до шини та перевірка відсутності напруги на струмопровідних частинах.
4. Огородження робочого місця та вивішування інформаційних плакатів, які дозволяють працювати.

4.2 Розрахунок параметрів контуру заземлення

Розрахунок зводиться до визначення вертикальних заземлювачів та довжини з'єднувальної смуги.

1. Визначимо норму на опір заземлення R_3^H .

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

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

Так як сумарна потужність приймачів більш 100 кВА то значення R_3 повинно бути не більше 4 Ом. Приймаємо опір $R_3 = 4 \text{ Ом}$.

2. Визначимо розрахунковий питомий опір ґрунту:

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

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

ψ – підвищуючий коефіцієнт, $\psi = 1,4$.

3. Визначаємо опір одинарного вертикального заземлювача:

$$\begin{aligned} R_0 &= 0,366 \frac{\rho_{\text{розр}}}{l} \left[\lg \left(\frac{2l}{d} \right) + \frac{1}{2} \lg \left(\frac{4t+l}{4t-l} \right) \right] = \\ &= 0,366 \cdot \frac{350}{5} \cdot \left[\lg \left(\frac{2 \cdot 5}{2,5} \right) + \frac{1}{2} \lg \left(\frac{4 \cdot 3 + 5}{4 \cdot 3 - 5} \right) \right] = 20,361 \text{ Ом}, \end{aligned}$$

де l – довжина заземлювача, $l = 5 \text{ м}$;

d – діаметр заземлювача $d = 250 \text{ мм}$).

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

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

Приймаємо електроди прокладені по контуру згідно плану та визначаємо орієнтовну кількість заземлювачів:

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

де η_t – коефіцієнт використання ряду заземлювачів.

4. Визначаємо довжину горизонтальної з'єднувальної смуги:

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

5. Визначаємо 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.

6. Необхідний опір вертикальних заземлювачів:

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

Схема прокладки заземлюючого контуру наведена на рис.4.1.

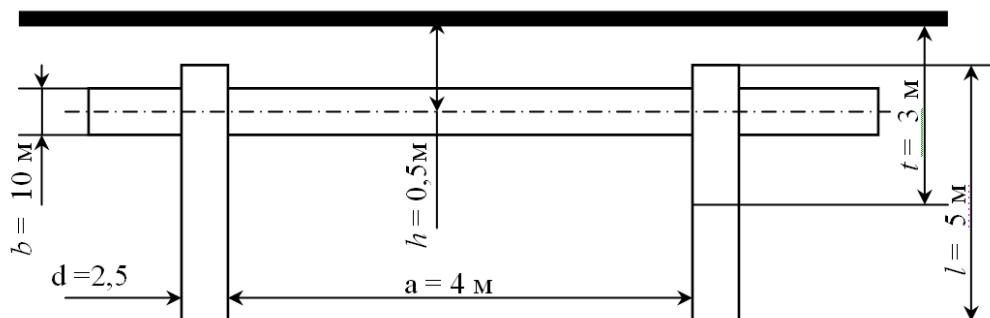


Рис.4.1. Схема прокладки заземлення

7. Визначаємо остаточну кількість заземлювачів:

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

8. Проводимо перевірку опору заземлювача і порівнюємо отримане значення з нормативним:

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

Дійсний опір заземлюючого пристрою з восьма заземлювачами не перевищує нормуючого значення.

Висновки до розділу

1. В результаті проведеного аналізу небезпечних та шкідливих факторів, що можуть виникнути при експлуатації елементів РЕМ визначено найсуттєвіші з них а також запропоновано заходи по їх усуненню.

2. В результаті проведеного розрахунку захисного заземлення згідно з відповідними вихідними даними було встановлено, що кількість заземлювачів, за якої їх опір не перевищує нормативний, дорівнює восьми.

РОЗДІЛ 5

РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ДВОРІВНЕВОЇ НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Для визначення економічної ефективності розробленої САК необхідно провести розрахунок капітальних витрат на провадження розробленої САК, визначення річних експлуатаційних витрат для базової та розробленої САК. Вирішенню зазначених завдань і присвячений даний розділ магістерської роботи.

5.1 Розрахунок капітальних витрат на провадження розробленої САК

Для впровадження розробленої САК, необхідно затратити матеріальні, трудові і грошові ресурси. Сукупність цих витрат називається капітальними вкладеннями. Вони утворюються з витрат на підготовку, вартості обладнання, монтажних робіт та ін.

Капіталовкладення на заміну базової САК розраховується за формулою:

$$K = K_{\text{обл}} + K_{\text{д}} + K_{\text{зб}}, \quad (6.1)$$

де $K_{\text{обл}}$ – капіталовкладення на придбання обладнання, грн;

$K_{\text{дод}}$ – вартість доставки елементів схеми, грн;

$K_{\text{зб}}$ – вартість збирання схеми САК, грн;

Результати розрахунків капіталовкладень в розроблену САК зводимо у таблицю 5.1.

Таблиця 5.1. Результати розрахунків капіталовкладень

№ п/п	Елемент схеми	Назва елемента схеми	Кількість, шт	Вартість, грн.	
				Одиниці	Всього
1	DD1	Мікропроцесор Atmega162	1	120	120
2	DD2	Мікросхема ADE7758	1	30	30
3	LCD1	Рідкокристалічний екран WH1602B	1	140	140
4	R1	Резистор 10 кОм	1	25	25
5	R2-R5	Резистор 5 кОм	4	9	36
6	R6-R13	Резистор 330 Ом	8	8	64
7	R14-R20	Резистор 1 МОм	7	25	175
8	C1-C2	Конденсатор 20 пФ	2	14	28
9	C3,C7,C9	Конденсатор 0,1 мкФ	3	15	45
10	C5,C6	Конденсатор 22 пФ	2	17	51
11	C4,C8	Конденсатор 10 мкФ	2	35	70
12	ZQ1,ZQ2	Кварцовий резонатор 10 МГц	2	11	22
13	VT1,VT2	Транзистор КТ 315	2	5	10
14	SB1- SB15	Кнопка	15	22	330
Загальна вартість покупки обладнання, грн					1146
Витрати на доставку обладнання (10% від вартості обладнання), грн					115
Витрати на збирання схеми САК (60% від вартості обладнання), грн					688
Загальні капіталовкладення на впровадження розробленої САК, грн					1949

5.2 Визначення річних експлуатаційних витрат

Пристрій РПН силового трансформатора з базовою САК в середньому за день спрацьовує 30 разів. Визначимо кількість спрацювань за рік:

$$N_{\text{річ}} = 365 \cdot n_{\text{доб}} = 365 \cdot 30 = 10950$$

В паспортних даних пристрою РПН вказано що після кожних 5000 спрацювань потрібно перевіряти масло в баці РПН на забруднення, а після кожних 20000 - 25000 спрацювань робити його заміну. Контакти РПН розраховані на 10-12 тис. спрацювань, після цього вони підлягають заміні.

Щорічні витрати пов'язані з обслуговуванням пристрою РПН силового трансформатора для випадку базової САК визначаються за формулою:

$$Z_{\text{б}} = Z_{\text{м}} + Z_{\text{к}} + Z_{\text{дод}} , \quad (6.3)$$

де $Z_{\text{б}}$ – річні витрати на обслуговування РПН для випадку базової САК;

$Z_{\text{м}}$ – річні витрати пов'язані із заміною масла;

$Z_{\text{к}}$ – річні витрати пов'язані із заміною контактів РПН;

$Z_{\text{дод}}$ – додаткові витрати пов'язані із обслуговуванням РПН

Додаткові витрати включають в себе: витрати на заробітну плату для ремонтних робітників, вартість експлуатаційних матеріалів, а також інші витрати пов'язані з утриманням системи.

Основна та додаткова заробітна плата ремонтних робітників з відрахуваннями в соціальні фонди розраховується за формулою:

$$Z_{\text{р}} = Q_{\text{р}} l_{\text{сп}} K_{\text{д}} \left(1 + \frac{H_{\text{соц}}}{100} \right) = 44 \cdot 28 \cdot 1,25 \cdot \left(1 + \frac{22}{100} \right) = 1878,8 \text{ грн}$$

де Q_p – річна трудомісткість ремонтних робіт РПН для трансформатора ТДН-10000;

l_{cp} – середньогодинна тарифна ставка ремонтних робітників, грн./год. (орієнтовно 28-35 грн.);

K_d – коефіцієнт додаткової заробітної плати, який враховує премії та усі види грошових доплат. Може бути прийнятий на рівні 1,25-1,35.

$H_{соц}$ – норматив єдиного соціального внеску, $H_{соц} = 22 \%$.

Вартість експлуатаційних матеріалів може бути орієнтовно прийнята в розмірі 25% від Z_p :

$$Z_{e.m} = 0,25 \cdot Z_p = 0,25 \cdot 1878,8 = 469,7 \text{ грн.}$$

Інші витрати на утримання системи можуть бути прийняті в розмірі 20% від Z_p :

$$Z_{утр} = 0,2 \cdot Z_p = 0,2 \cdot 1878,8 = 375,8 \text{ грн.}$$

Додаткові витрати пов'язані із обслуговуванням РПН становлять:

$$Z_{дод} = Z_p + Z_{e.m} + Z_{утр} = 1868,8 + 469,7 + 375,8 = 2713,6 \text{ грн.}$$

Вартість заміни масла:

$$Z_m = m \cdot C_m = 150 \cdot 38 = 5700 \text{ грн.,}$$

де $m = 150$ л. – нормована кількість масла для РС-4;

$C_m = 38$ грн/л – вартість 1 л масла для РПН.

Так як масло замінюється 1 раз на 2 роки то річні витрати на заміну масла становлять:

$$З_{\text{м.річ}} = \frac{З_{\text{м}}}{2} = \frac{5700}{2} = 2850 \text{ грн.}$$

Вартість заміни контактів :

$$З_{\text{к}} = n_{\text{р}} C_{\text{р}} + n_{\text{нр}} C_{\text{нр}} = 6 \cdot 250 + 12 \cdot 120 = 2940 \text{ грн.}$$

де $C_{\text{р}}$ – вартість одного рухомого контакта;

$n_{\text{р}}$ – кількість рухомих контактів;

$C_{\text{нр}}$ – вартість одного нерухомого контакта;

$n_{\text{нр}}$ – кількість нерухомих контактів.

Щорічні витрати пов'язані з обслуговуванням РПН трансформатора:

$$З_{\text{б}} = З_{\text{м}} + З_{\text{к}} + З_{\text{дод}} = 2850 + 2940 + 2714 = 8504 \text{ грн.}$$

Оскільки розроблена система керування РПН дозволяє зменшити кількість спрацювань на 19,2%, то її впровадження дозволить зменшити щорічні витрати з обслуговування РПН на 19,2%. Таким чином, щорічні витрати пов'язані з обслуговуванням РПН трансформатора у випадку розробленої САК становлять:

$$З_{\text{р}} = З_{\text{б}} \cdot \frac{100 - 19,2}{100} = 8503 \cdot \frac{100 - 19,2}{100} = 6870 \text{ грн.}$$

5.3 Розрахунок показників економічної ефективності

Економічна ефективність системи автоматичного контролю РПН трансформатора визначається за такими основними показниками, як приведені затрати, економічний ефект та термін окупності.

Приведені витрати для кожного з варіантів визначаються за формулою:

$$Z_i = E_n K_i + I_{o,i} \quad (6.4)$$

E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень, 1/рік;
для запропонованої методики приймається $E_i = 0,12$;

K_i – капіталовкладення в i -й варіант;

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

Результати розрахунку показників ефективності впровадження САК режимами напруги РЕМ наведені в табл. 5.2.

Таблиця 5.2. Результати розрахунку показників ефективності впровадження розробленої САК

№ з/п	Показники	Одиниці виміру	Базовий варіант	Проектний варіант
1	Капіталовкладення:	грн.	-	1949
2	Витрати пов'язані із обслуговуванням РПН	грн./рік	8503	6868
3	Приведені затрати	грн./рік	8503	7104
4	Економічний ефект	грн./рік	1467,1	
5	Термін окупності	роки	1,15	

Річний економічний ефект:

$$E = Z_6 - Z_n = 8503 - 7104 = 1399 \text{ грн./рік}$$

Термін окупності додаткових капітальних вкладень за рахунок зниження експлуатаційних витрат становить:

$$T_{\text{ок}} = \frac{\Delta K}{E} = \frac{1949}{1399} = 1,39 \text{ року.}$$

Висновки до розділу

В результаті проведеного техніко-економічного порівняння базової та розробленої САК виявлено, що впровадження розробленої дворівневої нечіткої системи автоматичного регулювання напруги в розподільних електричних мережах є економічно обґрунтованим. Величина економічного ефекту від розроблених заходів складає 1399 грн., а термін окупності капіталовкладень виявився меншим за нормативне значення (8 років) і складає 1,39 роки.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Виконані у роботі дослідження дозволяють сформулювати такі висновки:

1. Проведений аналіз технічних засобів регулювання напруги засвідчив, що найбільш розповсюдженим технічним засобом є механічний пристрій РПН трансформатора. Але, суттєвим недоліком цього пристрою є його низька надійність спричинена значною зношуваністю механічних контактів, які комутують номінальні струми.

2. Проведений аналіз існуючих пристроїв регулювання напруги силових трансформаторів з РПН показав, що вони вирішують лише одну із задач регулювання напруги: або підвищують якість напруги на затискачах споживачів, через що збільшується кількість спрацювань пристроїв РПН трансформаторів, або підвищують рівень надійності електропостачання за рахунок зниження рівня якості напруги. В останньому випадку особливо важкими є режими, за яких мають місце значні відхилення напруги від номінального значення. Це, в результаті призводить до тривалого живлення споживачів електроенергії напругою низької якості.

3. Запропоновано закон автоматичного регулювання напруги трансформатора верхнього рівня, за якого перемикання не відбувається, поки визначена пороговим коефіцієнтом кількість пристроїв регулювання нижнього рівня забезпечує входження значень напруги на затискачах споживачів в заданих межах. Цим досягається зниження кількості перемикань механічного РПН.

4. На основі нечіткої логіки було створено математичну модель і алгоритм роботи блоку формування вагового коефіцієнту підстанції нижнього рівня. В якості алгоритму нечіткого виводу було застосовано алгоритм Мамдані, що володіє вісною простотою та наочністю.

5. Для визначення ефекту від використання запропонованої в роботі дворівневої нечіткої системи регулювання напруги в РЕМ шляхом

імітаційного моделювання було створено комп'ютерні моделі САК в середовищі «Matlab/Simulink». В основу даних моделей покладено розроблені в роботі закони автоматичного регулювання і нечіткий алгоритм функціонування блоку прийняття керуючого рішення.

6. Статистична обробка результатів комп'ютерного моделювання показала, що при застосуванні як базової, так і розробленої САК значення усталеного відхилення напруги лежать в допустимих межах. Але, у випадку застосування розробленої САК кількість перемикачів механічного пристрою РПН виявилась на 19,20 % меншою, що є її суттєвою перевагою.

7. В результаті проведеного техніко-економічного порівняння базової та розробленої САК виявлено, що впровадження розробленої дворівневої нечіткої системи автоматичного регулювання напруги в розподільних електричних мережах є економічно обґрунтованим. Величина економічного ефекту від розроблених заходів складає 1399 грн., а термін окупності капіталовкладень виявився меншим за нормативне значення (8 років) і складає 1,39 роки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ГОСТ 13109-87. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения. – Взамен ГОСТ 13109-67; Введ. 16.12.87. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 20 с.
2. Говоров Ф.П. К вопросу о регулировании напряжения в городских электрических сетях // Энергетика и электрификация. – 1993. - №4. – С. 42-44.
3. Ермаков В.Ф. Обобщенный метод дифференцированной оценки влияния выбросов и провалов напряжения на различное электрооборудование // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 1996. – №1. – С. 164–167.
4. Ермаков В.Ф., Черепов В.И. Обобщенный метод дифференцированной оценки влияния колебаний напряжения на различное электрооборудование // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки [Изв. вузов. Сев.-Кавк. науч. центра высш. шк. Техн. н.]. – 1996. – №2. – С. 178–180.
5. Розанов Ю.К., Рябчинский М.В. Современные методы улучшения качества электроэнергии (аналитический обзор) // Электротехника. – 1998. - №3. – С. 10-17.
6. Скороходов В.А., Митрясов П.Ф. Обеспечение энергосбережения при повышении качества электрической энергии // Научные основы создания энергосберегающей техники и технологий: Тезисы докладов Всесоюзной конференции. – Москва. – 1990. – С. 254-256.
7. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 168 с.
8. Жежеленко И.В., Рабинович М.Л., Божко В.М. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. – К.: Техніка, 1981. – 160 с.

9. Поспелов Г.Е., Сыч Н.М. Потери мощности и энергии в электрических сетях. / Под ред. Г.Е. Поспелова. – М.: Энергоиздат, 1981. – 216 с.

10. Яндульский Н.М., Головатюк Н.Ф., Хлыстов В.М., Велигоцкий Г.П., Кот А.Г. О потреблении активной мощности электроприемников при отклонении напряжения // Национальный университет Украины "КПИ". – Киев, 1996. – 15 с. Деп. в ГНТБ Украины 12.06.96 г., №1437–Ук96.

11. Орлов В.С. Дополнительные потери мощности и энергии при отклонении напряжения и частоты // Изв. вузов. Сер. Энергетика. – 1985. – №6. – С. 19–23.

12. Веников В.А., Идельчик В.И., Лисеев М.С. Регулирование напряжения в электроэнергетических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 216 с.

13. Электрические системы и сети / Н.В. Буслова, В.Н. Винославский, Г.И. Денисенко и др.; под. ред. Г.И. Денисенко. – К.: Вища шк., головное изд-во, 1986. – 584 с.

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

15. Рэнси Р. Трансформаторы с переключением под нагрузкой // Мировая энергетика. – 1996. - №4. - С. 27–33.

16. Порудоминский В.В. Устройства переключения трансформаторов под нагрузкой. – изд. 2-е, перераб. и исправ. – М.: "Энергия", 1974. – 288 с.

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

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

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

20. Устройство для регулирования напряжения на силовом трансформаторе: А.с. 729810 СССР, МКИ Н 02 Р 13/06 / Н.М. Балдин (СССР). – №2468831/24-07; Заявл. 23.03.77; Опубл. 25.04.80, Бюл. №15.

21. Устройство для автоматического регулирования напряжения узла электрической сети: А.с. 1598044 СССР, МКИ Н 02 J 3/12 / Е.Ю. Линькова, А.В. Лужнов, Ф.Н. Рассказов (СССР). – № 4447584/24-07; Заявлено 12.05.88; Опубл. 07.10.90, Бюл. №37.

22. Способ регулирования напряжения в электрической сети: А.с. 1757015 СССР, МКИ Н 02 J 3/12 / В.Г. Васильев (СССР). – №4921817/07; Заявл. 29.01.91; Опубл. 23.08.93, Бюл. №31.

23. Устройство автоматического регулирования трансформаторов под нагрузкой типа АРТ-1Н. Техническое описание и инструкция по эксплуатации устройства АРТ-1Н. – Рига: РОЗ "Энергоавтоматика", 48 с.

24. Регулирование напряжения силовых трансформаторов подстанций энергосистемы по каналам телемеханики / Н.С. Круть, В.А. Ерощенко. // Электрические станции. – 1989, №6. – С.81-89.

25. Яндульский Я.С., Головатюк Н.Ф., Хлыстов В.М. Вопросы регулирования напряжения в электрических сетях // Энергетика и электрификация. – 1996, №4. – С. 36-38.

26. Способ регулирования напряжения в электрической сети: А.с. 1473003 СССР, МКИ Н 02 J 3/12 / В.М. Слодарж (СССР). – №4033802/24-07; Заявл. 06.03.86; Оpubл. 15.04.89, Бюл. №14.

27. Устройство для автоматического регулирования напряжения узла электрической сети: А.с. 1171901 СССР, МКИ Н 02 J 3/12 / К.В. Киреев, Ф.Н. Рассказов (СССР). – №3468435/24-07; Заявл. 14.07.82; Оpubл. 07.08.85, Бюл. №29.

28. Немцев Г.А., Некряченко Г.П. Регулирование напряжения в системах электроснабжения с учетом ущерба от его отклонения // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: Тезисы докладов Всероссийской межвузовской научно-технической конференции. – Чебоксары. – 1996. - С. 22-24.

29. Способ автоматического регулирования напряжения узла электрической сети: А.с. 1654917 СССР, МКИ Н 02 J 3/12 / Г.Г. Трофимов, О.М.. Ройзман, Р.Д. Абилов (СССР). – №4498743/07; Заявл. 25.10.88; Оpubл. 07.06.91, Бюл. №21.

30. Устройство для автоматического регулирования напряжения узла электрической сети: А.с. 1312676 СССР, МКИ Н 02 J 3/12 / С.П. Гнипа, Ф.Н. Рассказов (СССР). – №3864626/31-07; Заявл. 11.03.85; Оpubл. 23.05.87, Бюл. №19.

31. Способ регулирования напряжения в центре питания распределительной сети: А.с. 1562960 СССР, МКИ Н 02 J 3/12 / В.И. Идельчик, В.Н. Ковалевич, Ю.Г. Кононов, Ф.А. Сбитнев (СССР). – №4292551/24-07; Заявл. 30.07.87; Оpubл. 07.05.90, Бюл. №17.

32. Устройство автоматического регулирования напряжения в электрических сетях: А.с. 1288816 СССР, МКИ Н 02 J 3/12 / В.И. Зак, Н.С. Маркушевич (СССР). – №3904043/24-07; Заявл. 30.04.85; Оpubл. 07.02.87, Бюл. №5.

33. Устройство автоматического регулирования напряжения компенсирующими устройствами и отпайками трехобмоточного

трансформатора в центре питания: А.с. 1474793 СССР, МКИ Н 02 J 3/12 / И.В. Жежеленко, Ю.В. Слепов, Р.Д. Абилов, В.С. Хиора (СССР). – № 4231861/24-07; Заявлено 20.04.87; Оpubл. 23.04.89, Бюл. №15.

34. Способ регулирования напряжения электрической подстанции: А.с. 782037 СССР, МКИ Н 02 J 3/12, Н 02 Р 13/04 / Л.В. Росман (СССР). – №2705650/24-07; Заявл. 04.01.79; Оpubл. 23.11.80, Бюл. №43.

35. Україна, МКИ Н 02 J 3/12. Спосіб регулювання напруги електричної підстанції: Пат. 42222А Україна, МКИ Н 02 J 3/12 / П.П. Говоров (Україна); Харківська академія міського господарства. – № 2000116702; Заявл. 27.11.2000; Оpubл. 15.10.2001.

36. Устройство для автоматического регулирования напряжения электрического узла, имеющего двигательную нагрузку: А.с. 166904 СССР, МКИ Н 02 J 3/12 / В.В. Прокопчик, В.А. Белоусов (СССР). – № 4695569/07; Заявлено 15.03.89; Оpubл. 07.08.91, Бюл. №29.

37. Способ регулирования напряжения электрической сети: А.с. 1480013 СССР, МКИ Н 02 J 3/12 / А.Д. Веселов, С.Н. Макаровский, Л.В. Росман (СССР). – № 426266/24-07; Заявлено 15.06.87; Оpubл. 15.05.89, Бюл. №18.

38. Регулятор напряжения для силовых трансформаторов: А.с. 1140094 СССР, МКИ Н 02 Р 13/06. / Б.И. Мокин, Н.А. Головатюк, А.Г. Маладыка (СССР). – №3529866/24-24; Заявл. 24.12.82; Оpubл. 15.02.85, Бюл. №6.

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

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

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

ДОДАТКИ