

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

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедри ЕТС та ЕМ
канд. техн. наук., професор
_____Петро ПЛЕШКОВ
“ ____ ” _____ 2022 р.

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

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-21М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Денис ЛЕОНТЬЄВ
« ____ » _____ 2022 р.
Керівник роботи
канд. техн. наук, доцент
_____Василь ЗІНЗУРА
« ____ » _____ 2022 р.
Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва та транспорту

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ Плесков П.Г.

«____» _____ 2022 р.

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

Леонтєва Дениса Валерійовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Нечітка інтелектуальна система автоматичного регулювання напруги в розподільних електричних мережах

Fuzzy intelligent system of automatic voltage regulation in electrical distribution networks

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

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 01.12.2022 р

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Мета даної роботи - розробка САК режимами напруги розподільних мереж із використанням регулюючих пристроїв трансформаторів, що б забезпечувала одночасне приріст надійності робіт трансформаторів із РПН ще й з підвищенням якості регулювання U . Завдання роботи: 1. Провести огляд існуючих систем автоматичного керування трансформаторами з перемикачами РПН для виявлення їх дефектів. 2. Формалізувати завдання автоматичного регулювання режимів U розподільних мереж з силовими трансформаторами, обладнаними перемикачами відводів, для досягнення одночасного підвищення надійності та якості регулювання U . 3. Розробка структурних схем системи автоматичного регулювання режимів напруги розподільних електромереж, яке забезпечить одночасне підвищення надійності роботи електромереж та якості регулювання U . 4.

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>	4.10.22	
2	<i>Аналіз стану регулювання напруги в електричних мережах</i>		
3	<i>Загальна методика вирішення задачі САК в розподільних мережах</i>	14.10.22	
4	<i>Комп'ютерне моделювання нечіткої САК напруги в розподільних мережах</i>	5.11.22	
5	<i>Охорона праці</i>	5.11.22	
6	<i>Розрахунок економічної ефективності впровадження САК напруги в розподільних мережах</i>	18.11.22	
7	<i>Висновки</i>	21.11.22	
8	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	25.11.22	
9	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	29.11.22	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2022 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2022 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Леонт'єв Д. В. Нечітка інтелектуальна система автоматичного регулювання напруги в розподільних електричних мережах.

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет. – м. Кропивницький, 2022 р.

Метою даної роботи є розробка системи автоматичного керування режимами напруги розподільних мереж із використанням регулюючих пристроїв трансформаторів, що б забезпечувала одночасний приріст надійності роботи трансформаторів з пристроями регулювання напруги під навантаженням ще й з підвищенням якості регулювання напруги.

В роботі виконано аналіз основних видів регулювання напруги, який показав, що більш досконалим і розповсюдженим в електричних мережах є закон зустрічного регулювання. Реалізація цього закону дозволяє враховувати спади напруги у відхідних лініях і цим покращує якість напруги.

На основі апарату нечіткої логіки було розроблено алгоритм роботи та модель блоку визначення затримки сигналу перемикання пристрою регулювання напруги під навантаженням.

Комп'ютерне моделювання та техніко-економічні розрахунки засвідчили значну перевагу розробленої системи автоматичного керування над існуючими

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

THE SUMMARY

Leontiev D. Fuzzy intelligent system of automatic voltage regulation in electrical distribution networks.

Specialty 141 – "Electric power, electrical engineering and electromechanics". – "Electrical power consumption systems". – Central Ukrainian National Technical University. – Kropyvnytskyi, 2022

The purpose of this work is to develop a system of automatic control of voltage modes of distribution networks using transformer regulating devices, which would ensure a simultaneous increase in the reliability of transformers with voltage regulating devices under load, as well as an increase in the quality of voltage regulation.

The paper analyzed the main types of voltage regulation, which showed that the counter-regulation law is more perfect and widespread in electrical networks. Implementation of this law allows you to take into account voltage drops in outgoing lines and thus improves voltage quality.

On the basis of the fuzzy logic apparatus, an operation algorithm and a model of the unit for determining the delay of the switching signal of the voltage regulation device under load were developed.

Computer modeling and technical and economic calculations proved a significant advantage of the developed automatic control system over existing

Keywords: power transformer, fuzzy logic, automatic control system

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ	13
1.1 Види регулювання напруги в мережах	13
1.2 Регулювання напруги зміною коефіцієнта трансформації	18
1.2.1. Трансформатори з ПБЗ.....	20
1.2.2. Трансформатори з механічними РПН	21
1.2.3. Трансформатори з безконтактними РПН	30
1.3 Розгляд методів та пристроїв автоматизації зміни коефіцієнта трансформації	36
Висновки до розділу	39
РОЗДІЛ 2 ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ САК В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ.....	40
2.1 Постановка задачі САК в РЕМ за допомогою регулюючих пристроїв трансформаторів.....	40
2.2 Закони САК в РЕМ	42
2.3 Алгоритм роботи та математична модель блоку визначення адаптивної затримки часу спрацювання РПН.....	47
Висновки до розділу	57
РОЗДІЛ 3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕЧІТКОЇ САК НАПРУГИ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ.....	58
3.1 Математична модель автоматичного регулювання напруги в РЕМ.....	58
3.2 Комп'ютерне імітаційне моделювання САК напруги в РЕМ та визначення ефекту від застосування	63
Висновки до розділу	72
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ	74
4.1 Аналіз шкідливих та небезпечних факторів, заходи усунення	74
4.2 Розрахунок заземлення	74

РОЗДІЛ 5 РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

ВПРОВАДЖЕННЯ САК НАПРУГИ В

РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ.....78

5.1 Розрахунок капітальних витрат на САК.....78

5.2 Визначення річних витрат.....78

5.3 Розрахунок показників економічної ефективності.....82

Висновки до розділу83

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....84

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ87

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

РЕМ – розподільна електрична мережа

САК – система автоматичного керування

КІМ – комп’ютерне імітаційне моделювання

ПБЗ – пристрій перемикання без збудження силового трансформатора

ПЯЕ – показник якості електричної енергії

РПН – пристрій регулювання напруги під навантаженням силового трансформатора

ПЗНП – перетворювач змінної напруги в постійну

КТ – коефіцієнт трансформації

ΔU_1 – усталене відхилення трифазної напруги в РЕМ

ВСТУП

Актуальність роботи. Впровадження новітніх систем та сучасних технологій автоматизації у індустрії ставить нові вимоги до якості та надійності постачання енергії. Електроенергія розглянути як предмет споживання та продажу та зобов'язана відповідати нормам якості. До того ж для надання послуг електропостачання слід підтримувати показники (несиметрію, відхилення, частоту, несинусоїдність напруги та ін.) на потрібному рівні за допомогою спеціальних технічних засобів, тому що електроенергія є специфічним товаром, який споживається практично миттєво, відразу після виробництва.

Існує три групи методів (основні) підвищення якості електроенергії. По-перше, раціоналізація засобів електропостачання. До неї відносять живлення нелінійних споживачів підвищеною напругою, підвищення потужності мережі тощо. Друга передбачає удосконалення самих споживачів: використання багатофазних схем випрямлення, номінальне завантаження електродвигунів, введення до споживача коригувальних пристроїв тощо. Третя - застосовування пристроїв корекції якості регуляторів одного чи деяких параметрів електроенергії.

Найкращим сьогодні є третя група методів, тому що оновлення всіх споживачів або зміна структури мережі призведе до величезних витрат. Для забезпечення надійної роботи діючого обладнання необхідно розробити методи та засоби регулювання якості електроенергії.

Оскільки лінії електропередач від електростанцій до споживачів досить протяжні, а перетворення електроенергії відбувається в кілька ступенів, тим важливіше підтримувати стандарти якості електроенергії не на самих електростанціях, а безпосередньо на вході споживачів електроенергії. Вирішувати цю проблему необхідно саме на рівні збутової мережі. Більшості великих споживачів необхідно надійно підтримувати заданий рівень напруги на вході, оскільки інші критерії (форма напруги та частота) мають вплив на

втрати енергії на обладнанні підстанцій та в лініях електропередач, а тому постачальні організації зацікавлені в їх зниженні.

Найважливішим параметром якості електрики - це рівень напруги. Відхилення в бік падіння напруги, спричиняють збитки у всіх угодах. Втрати електроенергії в мережі також зростають із падінням напруги. В даний час в енергосистемі використовується велика кількість пристроїв для забезпечення підтримки стану напруги. В основному це трансформатори з регульованими за навантаженням коефіцієнтами трансформації, реактори, синхронні компенсатори, батареї статичних конденсаторів, генератори для електростанцій тощо. Ці пристрої оснащені регулятором напруги, який забезпечує підтримку напруги на певному рівні.

Основним засобом регулювання напруги в мережах є трансформатори з РПН. Ресурс механічних контактів РПН силового трансформатора порівняно невеликий, оскільки треба комутувати робочі струми. Ремонт РПН - операція трудомістка (потрібно зливати масло з бака трансформатора), а вартість такого ремонту чимала. Також, додаються збитки від припинення постачання споживачам. Все це призводить до того, що оперативний персонал підстанцій намагається якомога рідше виконувати перемикання розпаювачів силових трансформаторів. З цієї причини автоматичні стабілізатори напруги силових трансформаторів зазвичай вимикаються. Відповідно якість напруги знижується, а втрати збільшуються.

Тому дана задача удосконалення САК трансформаторами з РПН з метою одночасного підвищення надійності та якості регулювання напруги актуальна.

Мета і задачі дослідження. Мета даної роботи - розробка САК режимами напруги розподільних мереж із використанням регулюючих пристроїв трансформаторів, що б забезпечувала одночасне приріст надійності робіт трансформаторів із РПН ще й з підвищенням якості регулювання U .

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Провести огляд існуючих систем автоматичного керування трансформаторами з перемикачами РПН для виявлення їх дефектів.
2. Формалізувати завдання автоматичного регулювання режимів U розподільних мереж з силовими трансформаторами, обладнаними перемикачами відводів, для досягнення одночасного підвищення надійності та якості регулювання U .
3. Розробка структурних схем системи автоматичного регулювання режимів напруги розподільних електромереж, яке забезпечить одночасне підвищення надійності роботи електромереж та якості регулювання U .
4. Створити комп'ютерну модель САК режимом напруги електричних мереж на основі розроблених схем систем автоматичного керування.
5. Проаналізувати ефект від використання розроблених систем автоматизації завдяки комп'ютерному імітаційному моделюванню.
6. Запропонувати реалізацію розроблених САК режимами напруги РЕМ.

Об'єкт дослідження – проходження автоматичного регулювання напруги електричних мереж із регулюючими пристроями.

Предмет дослідження – система автоматичного керування режимом напруги електричних мереж у трансформаторах з РПН.

Методи досліджень. Вирішення задач роботи проходили за допомогою нечіткого керування та методів: нечіткої логіки, комп'ютерного імітаційного моделювання, теорії автоматичного керування, теорії електричних кіл та чисельних методів розв'язку задач.

Основні наукові результати роботи:

1. Обґрунтовано використання методу нечіткого керування для визначення затримки часу перемикання пристроєм РПН трансформатора, враховує поточний технічний стан трансформатора на основі даних, отриманих від системи моніторингу стану.

2. Розроблено комп'ютерну модель нечіткої системи керування режимами напруги електричних мереж, які містять силовий трансформатор з пристроєм РПН, яка дозволяє здійснювати аналіз режимів їх роботи.

Основні практичні результати.

- алгоритм визначення бази правил нечіткої системи керування, а саме блоку затримки сигналу перемикання РПН трансформатора, яка враховує його поточний технічний.

- комп'ютерна модель нечіткої системи керування режимами розподільних електричних мереж силовими трансформаторами, оснащеними пристроями РПН.

Загальна характеристика наукової роботи. Повний обсяг роботи складає 93 сторінки. Основна частина викладена на 78 сторінках друкованого тексту, містить 58 рисунків та 6 таблиць. Список використаних джерел містить 55 джерел та викладений на 7 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

1.1. Види регулювання напруги в мережах

Для підтримки рівня напруги на затискачах споживача в дозволених межах в різних точках електричної мережі проводиться регулювання напруги, яке може бути централізованим чи локальним (рис 1.1).

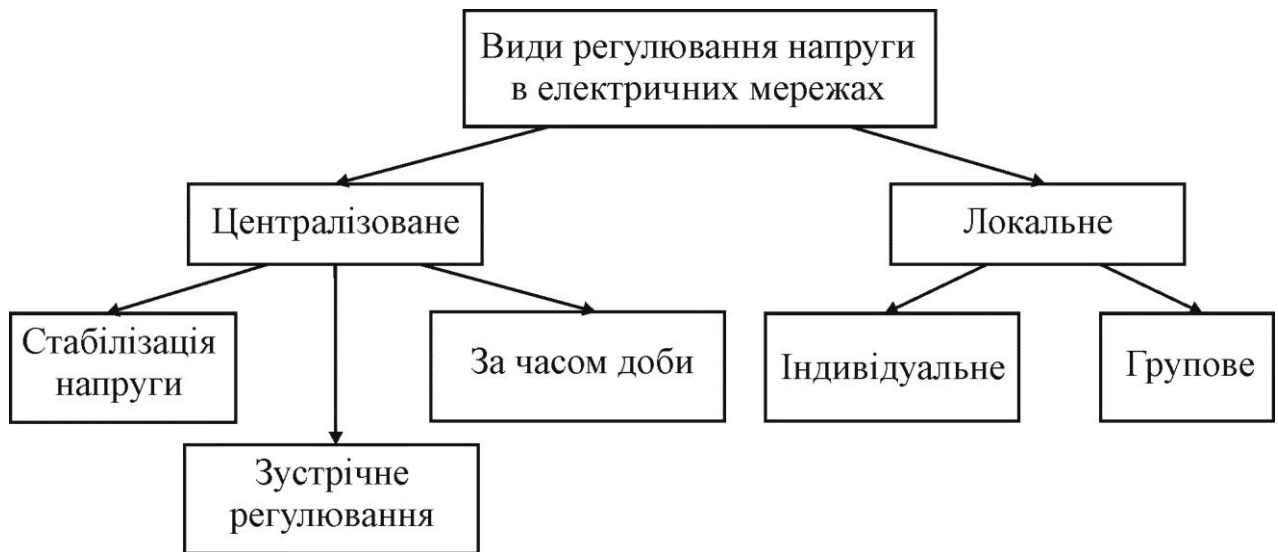


Рис. 1.1 Види регулювання напруги в РЕМ

Централізоване регулювання напруги застосовується у вузлах електричних мереж та при живленні великих споживачів (місто, великі підприємства). У регулюванні можна виділити три види підходів: стабілізація напруги, зустрічне регулювання напруги та двоступінчасте регулювання напруги.

Якщо графік навантажень споживача залишається практично не змінюється протягом доби (підприємства з тризмінним режимом роботи), то на затискачах електроспоживачів рівень напруги треба підтримувати постійним, тобто застосовується стабілізація напруги.



Рис. 1.2. Добовий графік споживачів з незмінним навантаженням

Регулювання напруги по часу (рис 1.3) доби побудоване на принципі програмного управління. Це регулювання напруги використовується у випадку, коли до мережі приєднані електроспоживачі, добовий графік навантаження залишається майже незмінним щодня (підприємства з однозмінним режимом роботи, з високим ступенем автоматизації технологічного процесу виробництва).

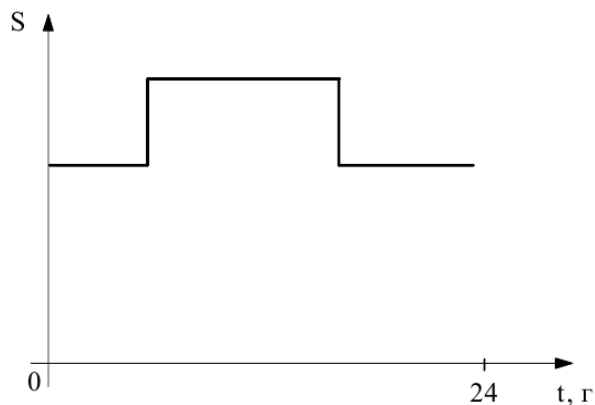


Рис. 1.3. Добовий графік підприємств однозмінний режим роботи

Зустрічне регулювання напруги використовується у випадку, коли навантаження споживача змінюється протягом доби. У такому випадку регулювання напруги треба проводити так, щоб забезпечити допустиме відхилення напруги не на центру шин живлення, а в певній віддаленій точці від центру живлення приєднання споживача до РЕМ (контрольній

точці). Для забезпечення регулювання необхідно враховувати струм навантаження споживачів.

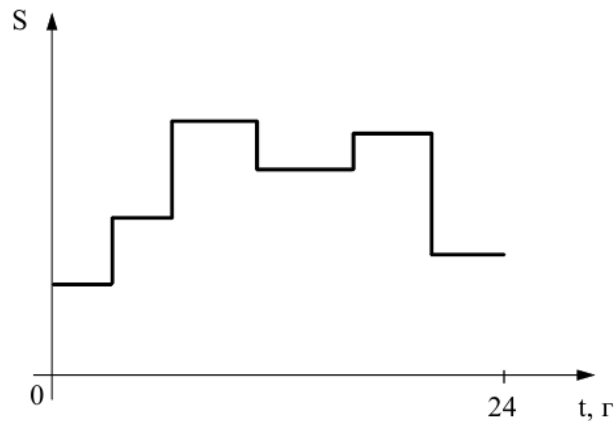


Рис. 1.4. Добовий графік із змінним навантаженням (споживачів)

Для розглядання зустрічного регулювання напруги розглянемо схему, подану на рис. 1.5, а саме де трансформатор представлений опором трансформатора та ідеальний коефіцієнт трансформації n . Рис. 1.4, а позначення: U_1 – напруга центра живлення; $U_{2В}$ – висока напруга (ВН) районної підстанції; $U_{2Н}$ – напруга низька (НН) районної підстанції; U_3 – напруга у споживачів.

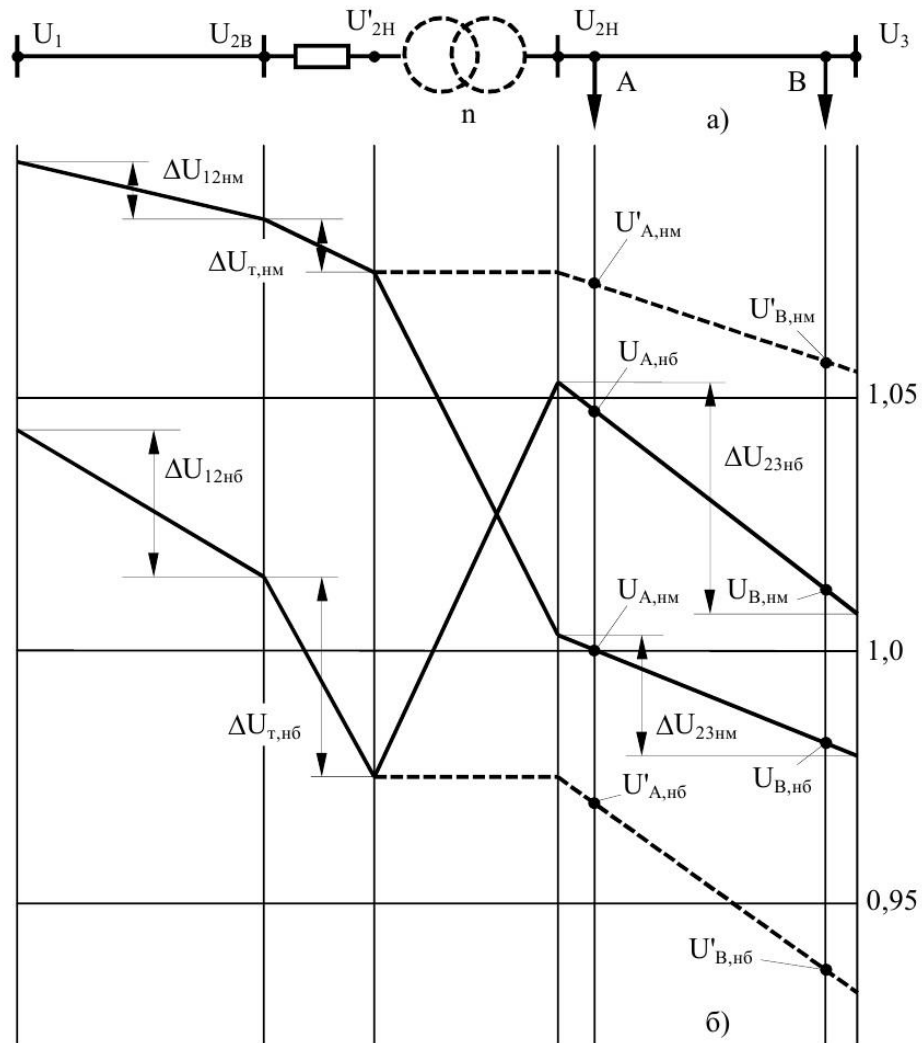


Рис. 1.5. Зустрічне регулювання напруги:
а – схема заміщення; б – епюри напруг

Напруга на шинах ВН підстанції визначається формулою

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

де ΔU_{12} – падіння напруги в лінії 12.

Напруга на шинах ВН і НН відрізняється на величини втрат напруги в трансформаторі ΔU_T , та, крім того, в ідеальних трансформаторах напруга знижується у відповідності до коефіцієнта трансформації, який треба враховувати під час вибору регулювального відгалуження.

З Рис. 1.5, б представлений графік зміни напруги для режимів: найменших та найбільших навантажень. По осі абсцис прокладені втрати напруги, а по ординат – відхилень напруги.

На рис. 1.5, б (штрихи), при $n = 1$ у режимі мінімальних навантажень напруга у споживача буде вище, а в режимах максимальних навантажень – нижче за допустимі значення (відхилення U більші допустимих). При цьому приймачі електроенергії, що з'єднані з мережею НН (в точках А і В), працюватимуть у недопустимих умовах. Корегуючи коефіцієнт трансформації трансформатора підстанції n , змінюють U_{2H} , а саме регулюють напругу у споживачів (суцільна лінія на рис. 1.5, б).

У режимі найменших навантажень збільшують коефіцієнт трансформації n , зменшуючи вторинну U_{2H} напругу до значення, ближчого до $1,0U_{ном}$. У даному режимі обирають найбільше стандартне значення n , щоб така умова виконувалась:

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

У режимі найбільших навантажень знижують n , підвищуючи напругу U_{2H} до значення, ближчого до $1,05U_{ном}$. У цьому режимі обирають таке найбільше стандартне n , щоб виконувалась умова:

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

Отже , напруга на затискачах споживача як віддаленого, так і близько розташованого вводиться у допустимі межі. При такому регулюванні у режимах найбільших навантажень напруга нижча та вона підвищується, а в режимі найменших - напруга вища і вона понижується. Саме тому таке регулювання називають зустрічним.

Локальне регулювання напруги виконується на затискачах споживача. Оскільки це регулювання напруги потребує більших капіталовкладень в РЕМ, тому воно використовується лише для споживачів з підвищеними вимогами (потужних) до якості електричної енергії (потужні двигуни, електротехнологічні установки та ін.). В залежності від кількості споживачів, що приєднані до шин, на котрих проводиться локальне регулювання напруги, виділяють два види: індивідуальне і групове.

Класифікація основних методів регулювання U на рис. 1.6.

1.2. Регулювання напруги зміною коефіцієнта трансформації

У сучасних РЕМ використовується велика кількість пристроїв, що гарантують нормально допустимі рівні відхилення U шляхом змін коефіцієнту трансформації силових трансформаторів. Всі сучасні трансформатори мають обмотки із регулюючими відгалуженнями, що виводяться на пристрій перемикання різної конструкції. Треба зазначити, що більш доцільною є монтаж таких пристроїв на стороні високої напруги трансформатора. В такому випадку протікання менших струмів, не зважаючи на більшу високу напругу, пристрої перемикання - більш економічніші та надійні у порівнянні з пристроями перемикання на стороні низької напруги трансформатора.

За конструктивним виконанням ПП (пристрої перемикання) регулюючих відгалужень обмоток трансформаторів можна поділити на групи:

1. Пристрої, у яких перемикання регулюючих відгалужень проводиться без збудження, тобто при відключеннях обмоток ВН та НН трансформатора від мережі (трансформатори з ПБЗ).

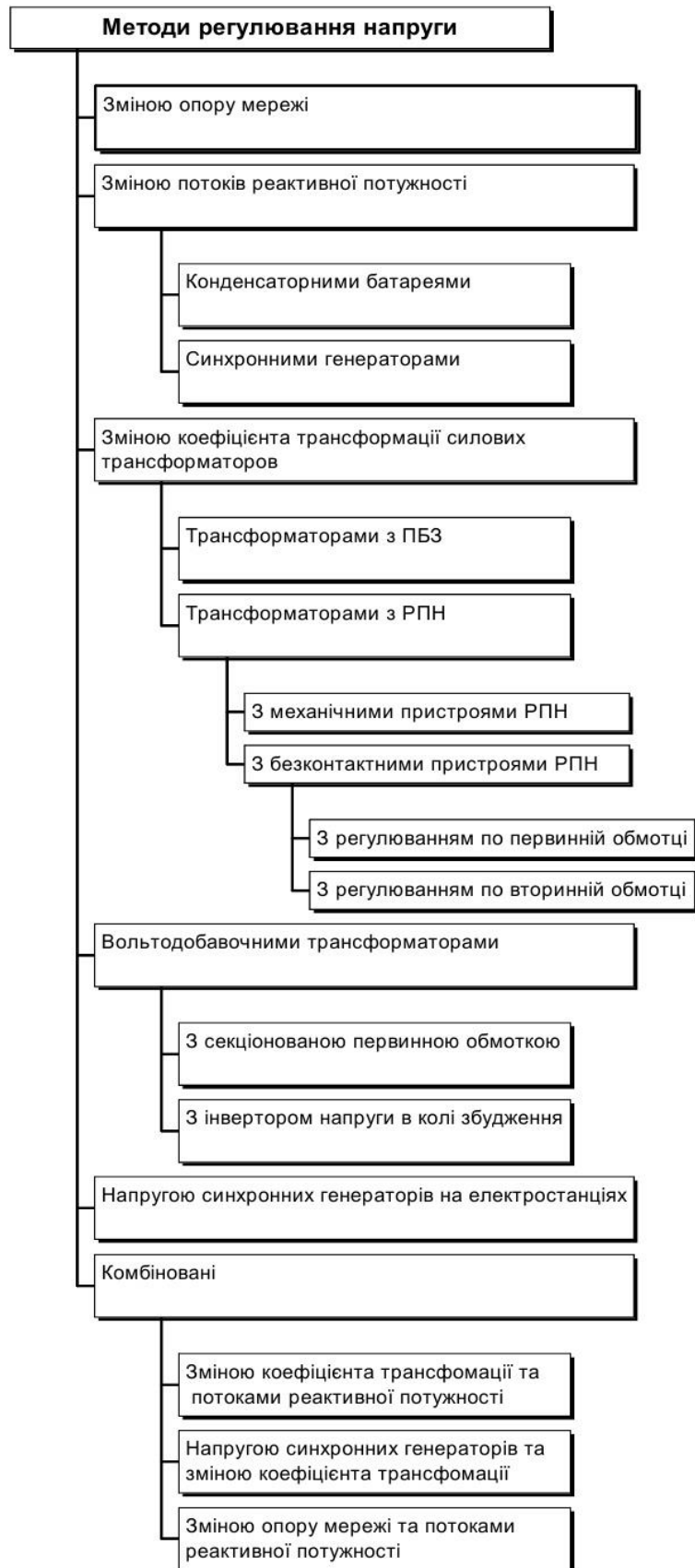


Рис. 1.6. Класифікація методів регулювання напруги в мережах

2. Пристрої, що здійснюють перемикання регулюючих відгалужень під час навантаження без відключення обмоток трансформатора від мережі (трансформатори з РПН).

1.2.1. Трансформатори з ПБЗ. Нині трансформатори з ПБЗ конструюють з одним основним і чотирма додатковими відгалуженнями. Принципова схема приведена на рис. 1.7.

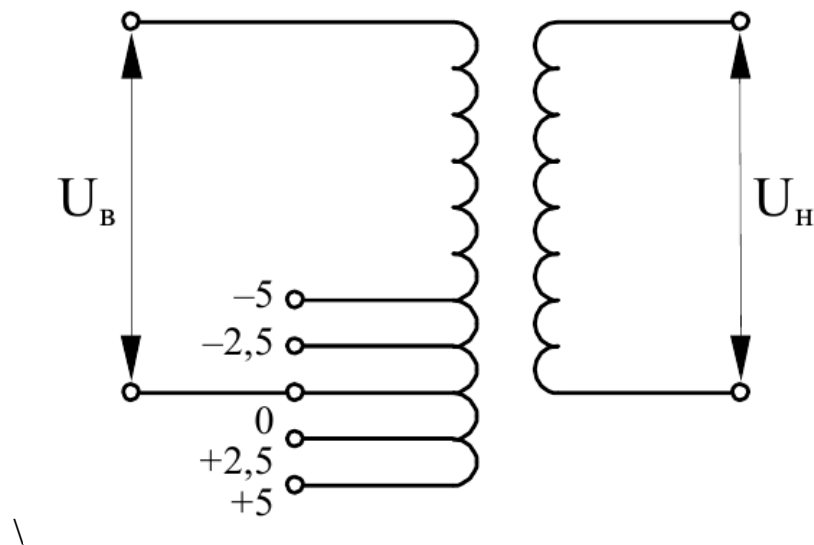


Рис. 1.7. Схема принципова трансформатора з ПБЗ

Основне відгалуження має напругу, що рівна номінальній напрузі мережі, згідно якій приєднується трансформатор (6, 10, 20 кВ). При основному відгалуженні КТТ (коефіцієнт трансформації трансформатора) називають номінальним, а при чотирьох додаткових відгалужень – КТТ відрізняється від номінального на +5%, +2,5%, -2,5% і -5%.

Для того щоб здійснити перемикання регулювального відгалуження, треба відключити трансформатор від мережі. Таке перемикання виконуються рідко, лише при сезонній зміні навантажень. Саме тому у режимі найбільших і найменших навантажень протягом доби (приклад, вдень і вночі) трансформатор із ПБЗ, що працює на одному регулювальному відгалуженні й відповідно з тим же КТТ. При всьому цьому неможливо виконати умови

зустрічного регулювання, що є основними недоліками трансформаторів з ПБЗ.

1.2.2. Трансформатори з механічними РПН. Трансформатори із регулюванням напруги під час навантаження, з вбудованим пристроєм РПН (рис. 1.8, а) різняться від трансформаторів з ПБЗ - наявністю перемикаючого пристрою, також збільшеним числом ступенів регулювальних відгалужень та діапазоном регулювання.

З рис. 1.8, б зображено принципова схема ТН з РПН. ВН даного ТН складається з регульованої та нерегульованої. У регульованій частині - ряд відгалужень до нерухомих контактів 1-4. 1-2 відповідають частині витків, що ввімкнуті погоджено з витками основної обмотки (напрямок струму указаний на рис. 1.8, б стрілками). При вмиканні 1-2 КТТ збільшується. 3-4 відповідають частині витків, що з'єднані зустрічно до відношення витків основної обмотки, але їх вмикання зменшує КТТ, адже компенсує дію частини витків ОО (основної обмотки). Основним виводом обмотки високої напруги трансформатора є точка 0. Кількість витків, діючих узгоджено і зустрічно з іншими витками ОО, може бути неоднаковим.

В регульованій частині є перемикаючий пристрій, що складається з контактів a та z , контакторів $K1$ і $K2$ і реактора P . Середина обмотки P з'єднана із нерегульованою частиною обмотки трансформатора. В сучасних пристроях РПН натомість реактора використовують активні опори. У нормальному режимі І навантаження обмотки ВН розподіляється рівномірно між половинами обмотки реактора. Саме тому магнітний потік малий та втрати напруги в реакторі малі.

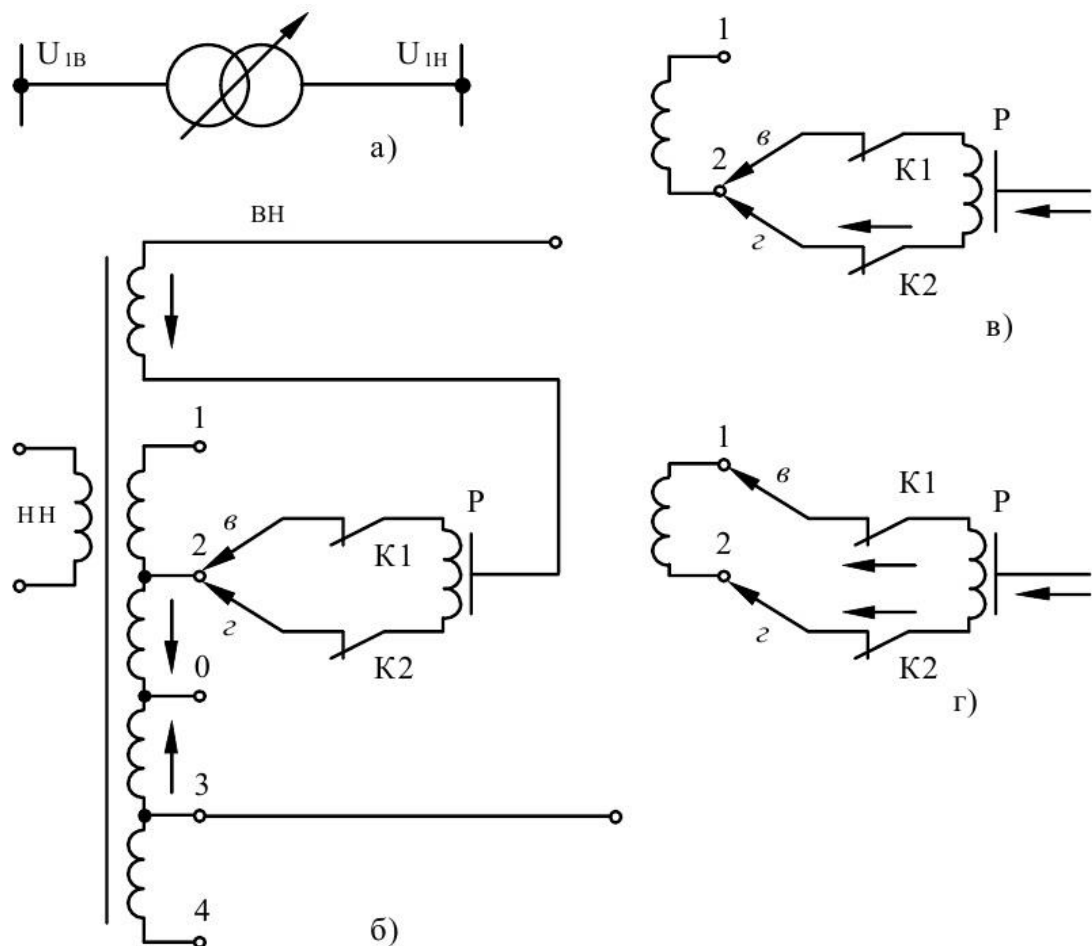


Рис. 1.8. Трансформатор з РПН:

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

Допустимо, що необхідно переключити пристрій із відгалуженням 2 на відгалуження 1. При усьому цьому вимикають К1 (рис. 1.8, в), переводять на відгалуження 1 і знов вмикають К1 (рис.1.8,г). Тому, секція 1-2 виявляється замкнутою на обмотку Р. Значна індуктивність Р обмежує урівнюючий струм, що виникає унаслідок напруги на секції 1-2. Після вимикають К2, переводять контакт *z* на відгалуження 1 та вмикають К2.

За допомогою РПН є можливість перемикати відгалуження, змінюючи коефіцієнт трансформації, під навантаженням, впродовж доби. При цьому можна вибрати у режимах найбільших та найменших навантажень необхідні

відгалуження та заокруглити їх до найближчих значень, щоб виконувалась вимога зустрічного регулювання.

Мінусами трансформаторів з РПН - висока вартість та обмежена кількість перемикачів, яке знижує якість регулювання.

У запропоновано трансформатор, що має дві гілки грубого регулювання та одну тонкого регулювання. Зміна U проводиться з'єднанням (послідовно-паралельно) у різних комбінаціях регулювальних гілок. Цей спосіб регулювання U технічно реалізувати складніше, тому що для отримання різних комбінацій з'єднань регулювальних гілок треба встановлювати складний пристрій перемикачів.

Дуже часто трансформатори з РПН комплектуються автоматичними регуляторами, які реалізують закон регулювання напруги.

Найпростіший закон регулювання напруги - регулювання за її відхиленням. Пристрій для регулювання напруги на трансформаторі, що реалізує цей закон регулювання. Функціональна схема пристрою показана на рис. 1.9.

При перевищенні напруги верхньої межі зони нечутливості регулятор подає сигнал "Зменшити" на електропривод 10 для перемикачів трансформатора на зниження напруги. При виході U за нижню межу зони нечутливості P подає сигнал "Збільшити" на підвищення U . Сигнал "Зменшити" (або "Збільшити") надходить на реле запам'ятовування циклу, перемикачів "Зменшити" 8 (чи реле запам'ятовування циклу перемикачів "Збільшити" 7), що продовжує подавати команду на привод до закінчення процесу перемикачів.

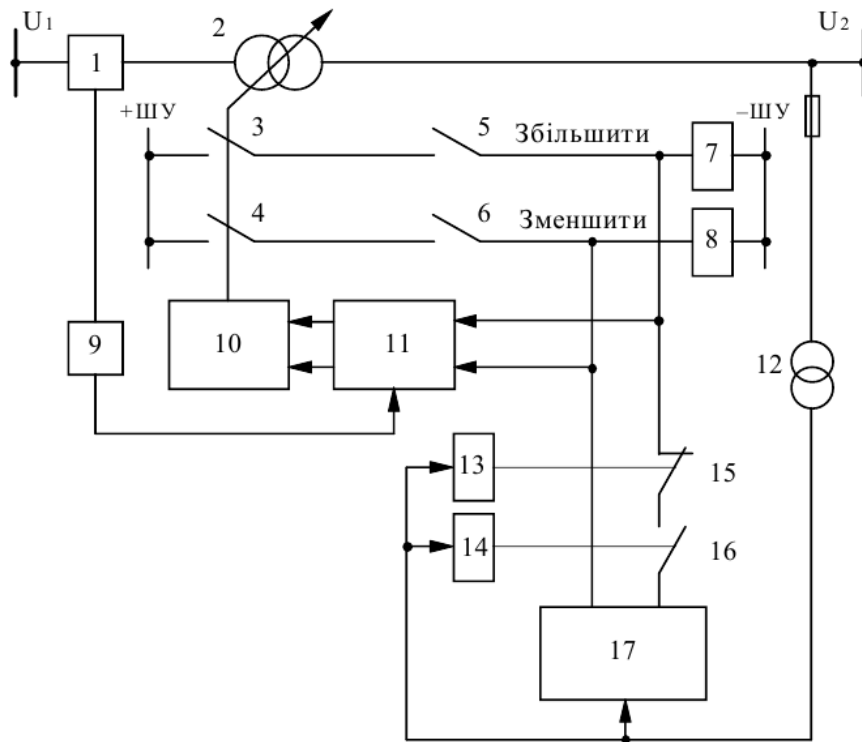


Рис. 1.9. Схема функціональна пристрою регулювання напруги силового трансформатора

Цей пристрій також реалізує блокування приводу при виникненні надструмів у силовому трансформаторі 2 у час перемикання за допомогою реле Імакс (1) та блокуючого елементу (11). Після зникнення надструмів знімається блокування і проходить завершення початого перемикання. При значних пониженнях U сигнал "Збільшити" блокується й перемикач не приходить до руху.

Даний пристрій для регулювання напруги трансформаторів не враховує навантаження споживачів, саме тому за допомогою нього неможливо використати закон зустрічного регулювання напруг.

Пристрій для автоматичного регулювання U вузла електричної мережі, що дає змогу врахувати навантаження споживачів. Функціональна схема пристрою приведена на рис. 1.10.

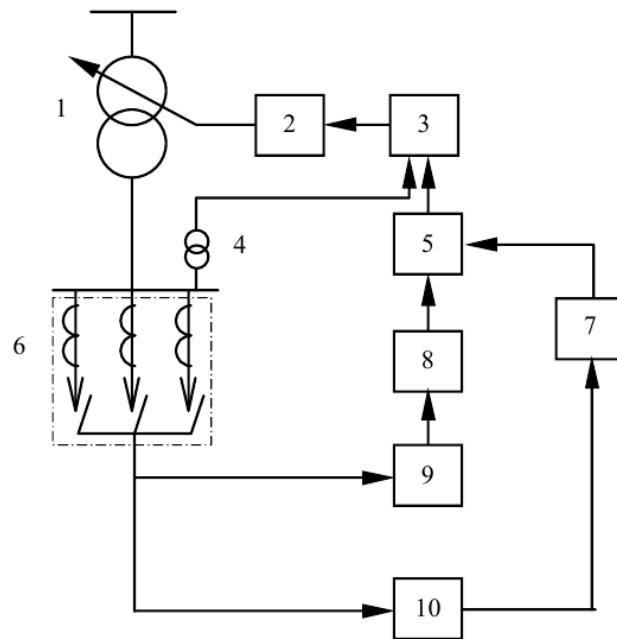


Рис. 1.10. Схема функціональна пристрою для автоматичного регулювання напруги вузла електричної мережі

Постійна складова струму навантаження, що виділяється фільтром 9 й проходить через функціональний перетворювач 8, постачає оптимальну напругу в центрі живлення за умов найменшої кількості споживаної електроенергії за допустимим діапазоном зміни U . Зміна складова з блоків струмової компенсації 6, що виділяється фільтром 10 та проходить через підсилювач 7, проводить зміну напруги у центрі живлення при коливанні навантажень у споживачів. Складові додаються один до одного в суматорі 5 та сума поступає на блок регулювання напруги 3. На блок поступає значення U вторинної обмотки трансформатора, що вимірюється датчиком U 4.

Хоч пристрій враховує зміну навантажень споживачів, та при частих коливаннях навантаження кількість перемикачів РПН 2 буде досить великою, яке доведе до швидкого спрацювання ресурсів контактів пристрою РПН.

Відомо також спосіб регулювання U трансформатора, в якому для зменшення зон нечутливості регулятора (P) передбачається після перемикачів блокувати команди на перемикач у протилежну сторону, доти не буде видимої тенденції регульованої U до зміни в сторону

попереднього Р. На рис. 1.11 приведена схема пристрою, який реалізує спосіб регулювання напруги.

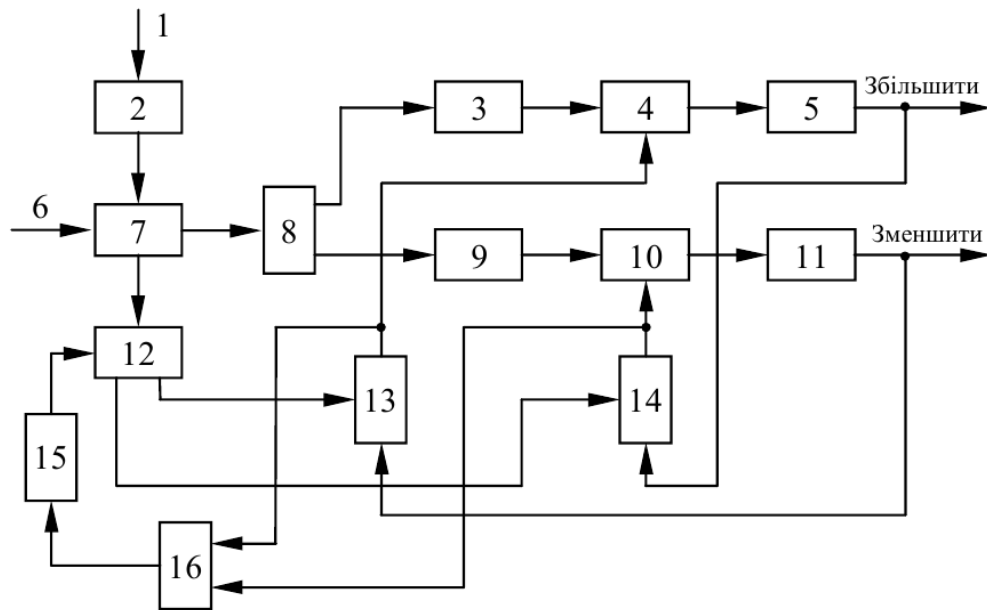


Рис. 1.11. Пристрій для регулювання напруги трансформатора

У даному пристрої по закінченню перемикачів блок контролю зміни регульованої U 12 починає відслідковувати напрям зміни напруги та, якщо напруга має тенденції до зменшення (або збільшення), тому блок 12 подає сигнал скиду на БП (блок пам'яті) 14 (або 13), дозволяючи перемикач у зворотній бік. Логічний елемент "АБО" 16 та елемент часової затримки 15 потрібний для відключення блока 12 на t перемикачів пристрою РПН, який забезпечує стійкий алгоритм роботи.

У даному способі регулювання U на трансформаторі не враховується напрям зміни U після виходу за межі зони нечутливості, яке призводить до зайвих перемикачів РПН.

У підстанціях широко використовують пристрої автоматичного регулювання трансформатору під навантаження типу АРТ-1Н, перевага яких - підвищення стійкості регулювання U за рахунок затримок сигналів на перемикач на деякий час. Цим самим досягається уникнення реакцій системи на короточасні коливання U , саме тому підвищується надійність системи в цілому. Ще даний пристрій дає змогу провести оперативну

дистанційну зміну уставки, які нерідко використовується у різних системах регулювання U , побудованих на цьому регуляторі. Хоча даний пристрій не відслідковує напрямки зміни напруги й тим самим нерідко виконує лишні перемикання пристрою РПН, який негативно відображається на ресурсах останнього. АРТ-1Н не може швидко рреагувати на значні відхилення U , що знижуватиме якість регулювання U .

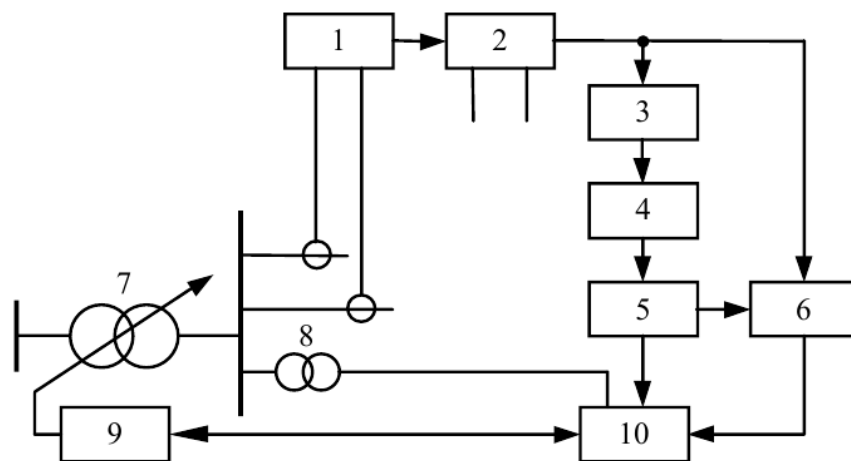


Рис. 1.12. Схема функціональна пристрою регулювання напруги силового трансформатора

У даному пристрої пусковий орган (3) порівнює сумарну U струмової компенсації з максимально допустимою та при перевищенні подається сигнал через часовий блок затримки 4 на виконавчий орган 5, що видає команди на зміну уставки блоку автоматичного регулювання 10 та блокування струмової компенсації на елементі блокування струмової компенсації 6. Загальна кількість датчиків струму 1 і 2, кожен з них має два струмових входи, та може бути довільною (у залежності від кількості змінних регулювань). При зменшенні сумарної U струмової компенсації до значення, меншого від максимально допустимого, апарат повертає блок регулювання 10 до нормального режиму роботи.

Даний прилад у режимі мінімальних навантажень проводить регулювання U за усередненими відхиленнями напруги, та при збільшенні навантажень до $\max$ - відбувається перехід до регулювань граничними відхиленнями напруги у вузлах електричних мереж із мінімізацією споживання неякісної енергії. Ця якість регулювання U на споживачах розподільчої мережі збільшується за рахунок зниження кількості енергії, що споживається за допустимим діапазоном зміни U , при зміні навантаження у широких межах.

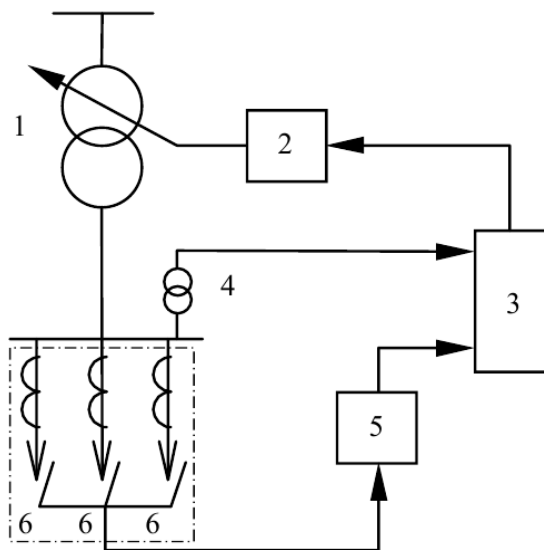


Рис. 1.13. Схема функціональна пристрою для автоматичного регулювання напруги вузла електричної мережі

Описані вище пристрої регулювання U змінюють уставку типового регулятора U АРТ-1Н, саме тому мають ті самі обмеження.

Є спосіб регулювання U за критерієм економічних збитків через відхилення U від нормованого значення. У описаний пристрій автоматичного регулювання U вузла мережі за КЕЗ (критерієм економічних збитків) від неякісного енергопостачання, схема якого приведена рис. 1.14.

З датчиків U , активної та реактивної потужностей через аналогово-цифрові перетворювачі, відповідно проводиться паралельне

програмно-синхронне уведення параметрів режиму, що змінюються в часі – U , P і Q у мікроконтролер 9, за заданою програмою вираховують:

– відхилення поточного значення напруги від номінального

$$v = U - U_n; \quad (1.4)$$

– економічну характеристику вузла навантаження електричної мережі

$$y(v) = \alpha v_2 + \beta v + c, \quad (1.5)$$

де α , β і c – коефіцієнти, які залежать від режиму роботи і складу обладнання в даному вузлі

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

– функцію приналежності нечіткого обмеження відхилень напруги

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

де a і b – значення граничних допустимих величин відхилень напруги; $\max : y(v_i)$, $\min : y(v_i)$ – максимальне і мінімальне значення функції економічних збитків в діапазоні допустимих значень відхилень напруги;

– оптимальне значення відхилення напруги для даного вузла навантаження

$$v_{\text{опт}} = \text{opt } M(v); \quad (1.8)$$

- гістограму відхилень напруги від номінального значення як густину розподілу ймовірностей $P(v)$;
- значення нечіткого інтегралу від функції приналежності нечіткого обмеження за імовірнісною мірою $P(v)$ як

$$F = f M(v). \quad (1.9)$$

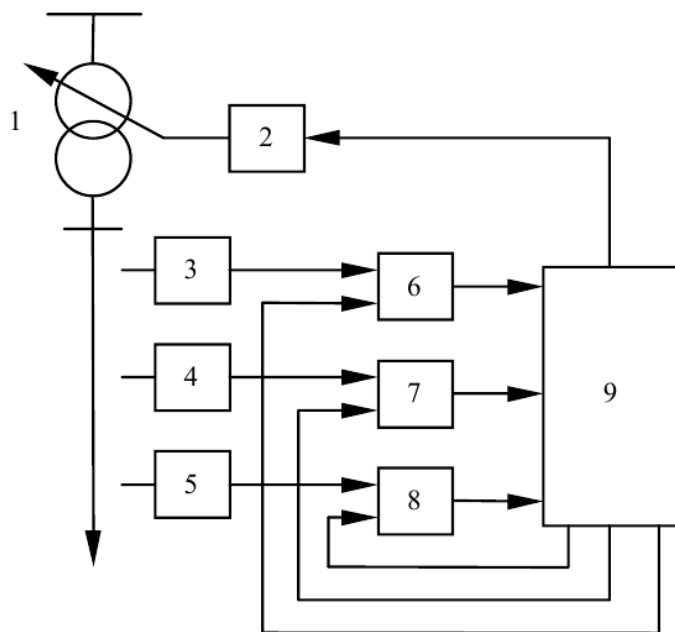


Рис. 1.14. Функціональна схема пристрою для автоматичного регулювання напруги вузла електричної мережі

Перемикання проводиться лише у випадку, коли приведе до значного зменшення втрат від неякісної електроенергії, зменшуючи кількість перемикань РПН.

1.2.3. Трансформатори з безконтактними РПН. РПН є елементом з обмеженим ресурсом перемикань. Час перемикання відпайки ≥ 5 с. Цих недоліків не мають безконтактні РПН, в яких використовують напівпровідникові силові ключі. Трансформатори, які обладнані такими пристроями мають t перемикання відпайки ≥ 10 мс, а перемикання не

супроводжується появою вищих гармонік, тому поліпшується динамічна стійкість системи регулювання U .

Пристрій для регулювання змінної напруги на рис. 1.15.

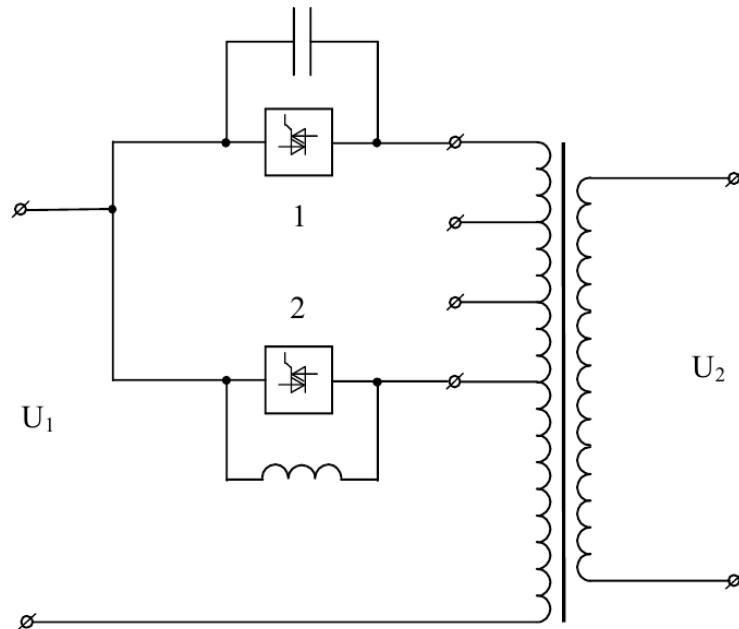


Рис. 1.15. Функціональна схема пристрою для регулювання змінної напруги

Пристрій не забезпечує захист ключів від струмів КЗ, тому в проміжних режимах роботи мережі з'являються вищі гармоніки.

При нормальній роботі, система керування подає імпульси на один з ключів, вмикаючи їх. При виникненні КЗ датчик посиляє системі керування сигнал. Остання зупиняє подачу імпульсів керування, працюючий ключ вимикається, варистор пропускає струм, живлячи формувач, який дає сигнал на ключ і пропускає через себе аварійний струм. Після ліквідації короткого замикання система керування вступає в роботу.

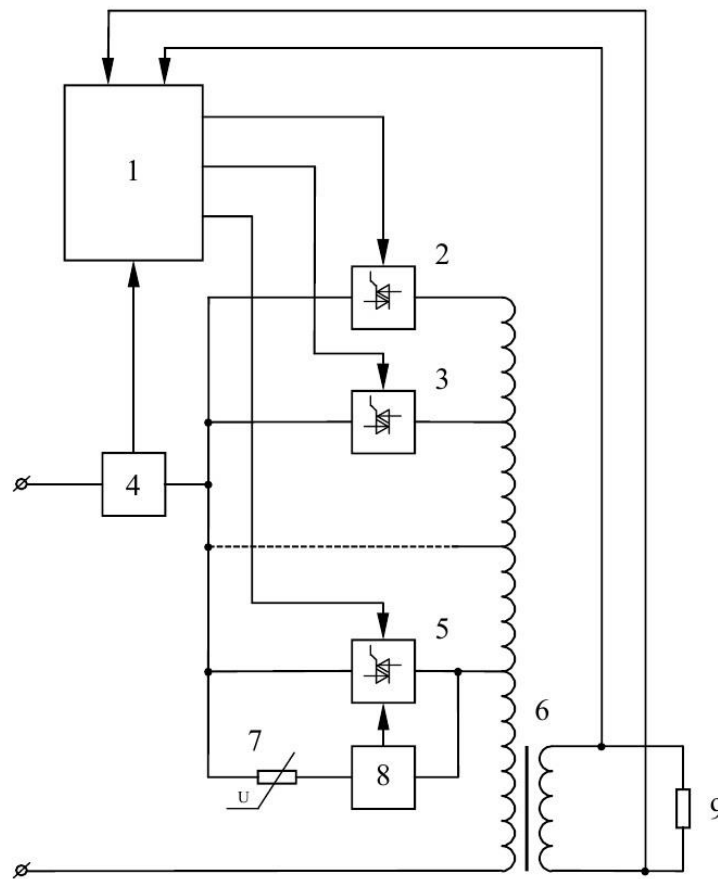


Рис. 1.16. Схема функціональна пристрою для перемикання відгалужень силового трансформатора

Недоліком пристрою, що в процесі регулювання не береться в облік струмова компенсація.

У пристрої для регулювання змінної U первинна обмотка трансформатора містить дві паралельні групи обмоток, кожна секціонована. Комутація проведена за допомогою тиристорних ключів. Функціональна схема пристрою на рис. 1.17,

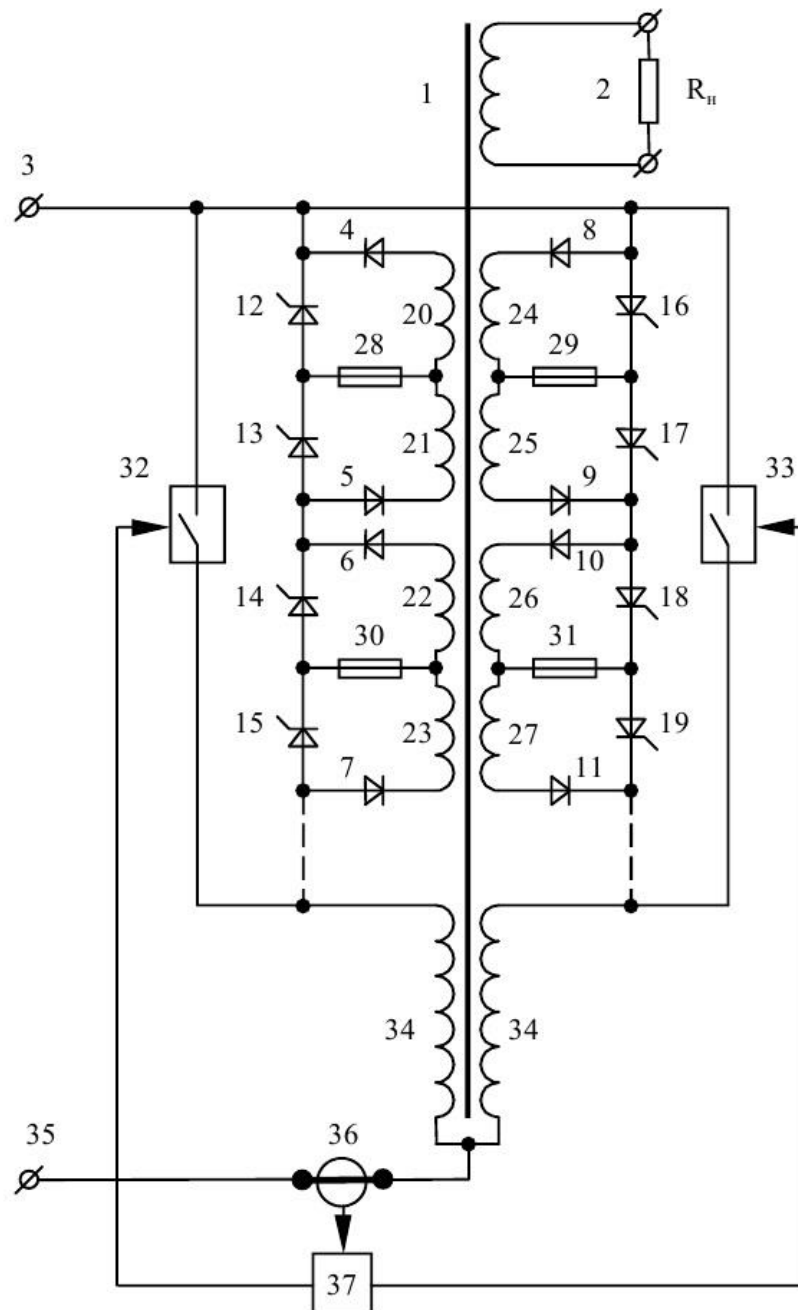


Рис. 1.17. Пристрій для регулювання змінної напруги

Для підвищення U на навантаженні 2 вмикають в довільний момент t відповідного напівперіоду тиристори, що приводить до шунтування регулювальної секції в додатний напівперіод і секції у від'ємний напівперіод. Для підвищення вихідної напруги ще на один ступінь додатково вмикають в

довільний момент часу відповідного напівперіоду тиристори. При цьому в кожній групі обмоток трансформатора шунтуються вже по дві регульовальні секції.

Максимальна вихідна напруга буде тоді, коли включені тиристори. При цьому регульовальні секції виявляються зашунтованими, а напруга прикладена лише до основної обмотки.

В разі пробою діоду запобіжник захистить від виникнення аварійного режиму. При виникненні КЗ в колі навантаження по сигналу амплітудного дискримінатора, пов'язаного з датчиком струму, спрацьовують швидкодіючі вакуумні контактори, захищаючи діоди та тиристори від ушкодження внаслідок різкого зростання струму навантаження.

Недолік пристроя - це застосування двох груп обмоток, що працюють в різні напівперіоди, що призводить до збільшення вартості трансформатора.

Також пристрій для перемикання відгалужень регулюючої обмотки трансформатора під навантаженням, у якого два вакуумних вимикачі, коло розвантаження з тиристорною комутацією, контактори. Це дає змогу зменшити знос контактів, але має високу вартість.

Спосіб регулювання напруги, що передбачає зміну коефіцієнта трансформації трансформатора курсом зміни кількості витків вторинної обмотки. Для комутації відпайок запропоновано використовувати тиристорні ключі.

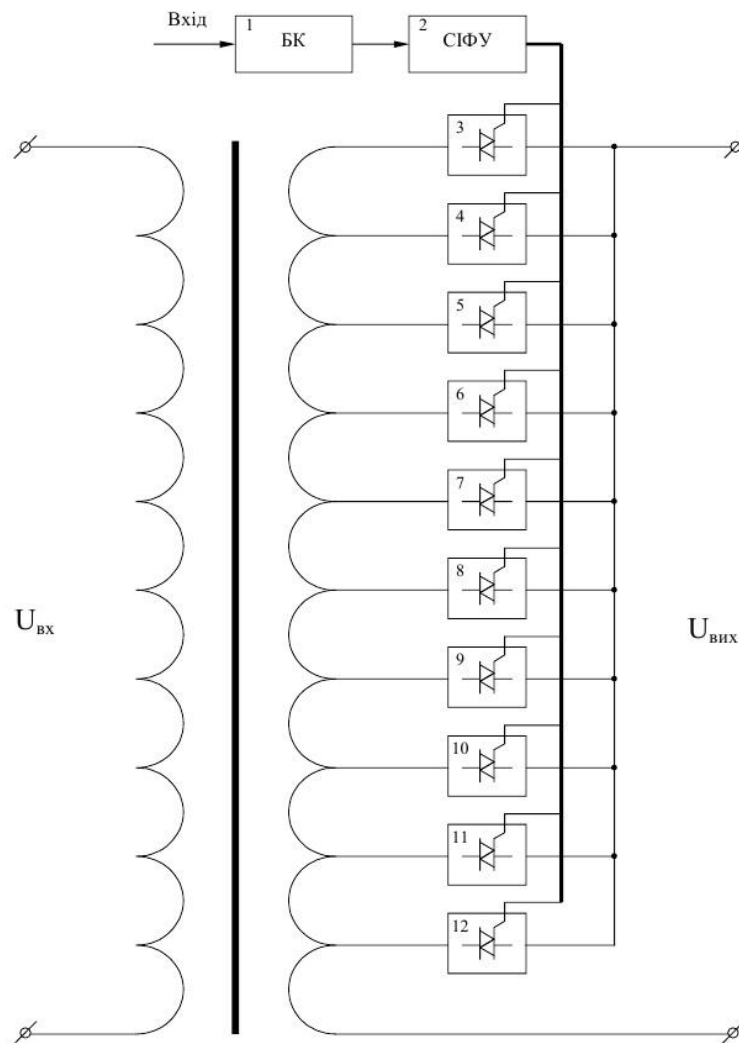


Рис. 1.18. Схема функціональна пристрою регулювання напруги трансформатора з тиристорним пристроєм РПН

На блок керування 1 надходить сигнал, під необхідну величину напруги на навантаженні. Блок формує пропорційний сигнал для блока СІФУ, який формує і подає на один з блоків імпульси, що вмикають відповідний ключ. З метою уникнення міжвиткових КЗ необхідно, щоб лише один ключ був відкритий, саме тому відкриття наступного ключа відбувається після закриття попереднього. Коли працює блок 8, вторинна напруга дорівнює номінальному значенню. При підключенні інших ключів значення напруг: 0,9; 0,92; 0,94; 0,96; 0,98; 1,02; 1,04; 1,06; 1,08, відповідно включенню блоків.

Схожий пристрій з перемиканням відпайок вторинної обмотки трансформатора. Недоліком способу, який реалізують два вищезаначені пристрої, що комутація проводиться по вторинній стороні трансформатора, де при значній потужності струми досягають декількох тисяч ампер. Тому кожен ключ складений з декількох паралельних тиристорів, що є не вигідним.

1.3 Розгляд методів та пристроїв автоматизації зміни коефіцієнта трансформації

Найпростіший закон регулювання напруги за його відхиленням.

Пристрій, що реалізує закон регулювання напруги за її відхиленням зображено на рис. 1.19:

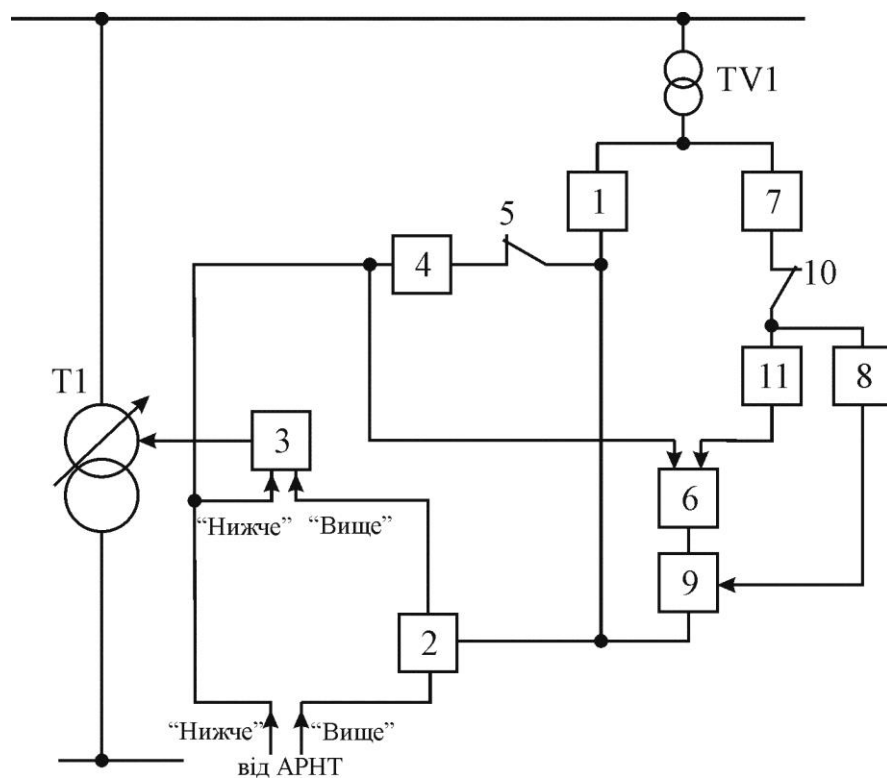


Рис. 1.19. Схема функціональна пристрою регулювання напруги

Недоліком є неврахування струму споживачів, через що неможливо реалізувати зустрічне регулювання U . Також спосіб регулювання напруги не передбачає пофазної зміни коефіцієнтів трансформації.

Більш досконалим є регулювання напруги за відхиленням з урахуванням спадів U у елементах мережі від струму навантаження (зустрічне регулювання напруги).

Найпоширенішим пристроєм, що реалізує закон зустрічного регулювання U є АРТ-1Н, схема зображена на рис. 1.20.

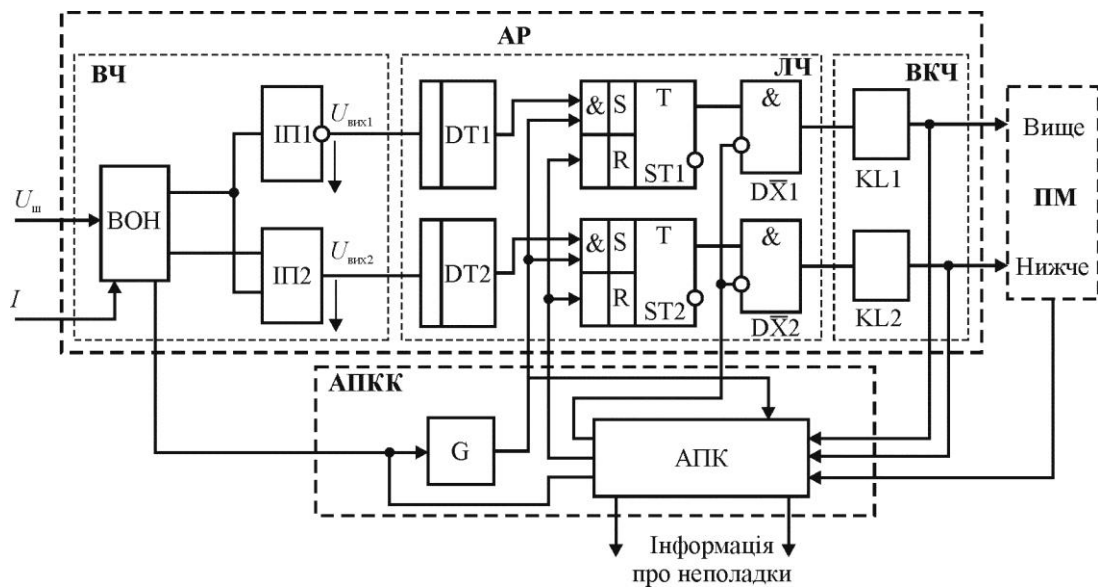


Рис. 1.20. Функціональна схема автоматичного регулятора типу АРТ-1Н

Недолік даного пристрою, що не відслідковує напрямок зміни напруги, спричиняючи зайві перемикання. Крім цього АРТ-1Н не може відпрацьовувати різкі відхилення напруги, що спричиняє зниження якості.

Провівши аналіз алгоритмів роботи пристроїв було встановлено, на частоту перемикань контактів РПН впливає не лише значення відхилення U від номінальної, але й затримка перемикань РПН. Введення часової затримки дає можливість уникнути зайвих перемикань при появі різких коливань U . Очевидно, що кількість перемикань прямо пропорційно цієї

часової затримки: чим більша, тим рідше виконуються перемикання, що, забезпечує подовження ресурсу роботи РПН. Але з зростанням часової затримки знижується якість регулювання.

Перспективним видається підхід до побудови САК пристроєм РПН, величина затримки є змінна, та залежить від кількості здійснених за певний період перемикань. Побудова такої САК з РПН ускладнюється суттєвою нелінійністю залежності величини затримки від кількості спрацювань РПН. Така САК повинна належати до класу нелінійних.

З огляду на неможливість знаходження математичної моделі залежності величини часової затримки перемикань РПН від кількості спрацювань, найбільш доцільним є застосування САК, робота якого базується на нечіткій логіці.

Висновки до розділу

1. Виконаний аналіз основних видів регулювання U показав, що більш досконалим і розповсюдженим в РЕМ - закон зустрічного регулювання. Реалізація закону автоматичного регулювання U дозволяє враховувати спади напруги у відхідних лініях і цим покращує якість U на затискачах споживачів.

2. Виконаний аналіз технічних засобів регулювання зміною коефіцієнта трансформації засвідчив, що найрозповсюдженішим засобом є механічний РПН трансформатора. Хоча, суттєвим недоліком даного пристрою є відносно низька надійність через зношуваність механічних контактів, які комутують номінальні струми.

3. Проведений аналіз існуючих пристроїв для автоматичного регулювання U трансформаторів з РПН показав, що всі пристрої вирішують лише одну з головних задач - регулювання U або підвищують якість U на споживачах, через що збільшується кількість перемикань РПН або

підвищують надійність постачання за рахунок зниження якості U . В останньому випадку несприятливими є режими, в яких існують суттєві відхилення напруги від номінальних значень, здебільшого що призводить до тривалого живлення користувачів напругою низької якості.

РОЗДІЛ 2

ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ САК В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

Головним недоліком РПН силового трансформатора - низька надійність. Зниження надійності роботи РПН якої прямо пропорційне кількості спрацювань, що пов'язано, зі зношенням контактів, які комутують Іном. Найперспективнішим шляхом вирішення цієї наукової проблеми – це удосконалення САК трансформаторами з механічними РПН, використання яких забезпечить зменшення кількості перемикань РПН без зниження якості напруги.

Для вирішення наукової задачі необхідно:

- сформулювати постановку задачі автоматичного керування режимом напруги в РЕМ;
- розробити закони регулювання напруги в РЕМ за допомогою РПН;
- вибрати математичного апарату, найбільш слушного для вирішення задачі автоматизації керування режимом напруги в РЕМ;
- створити алгоритм автоматичного керування регулювань напруги в РЕМ та математичну модель.

Вирішенню задач і присвячений другий розділ роботи.

2.1 Постановка задачі САК в РЕМ за допомогою регулюючих пристроїв трансформаторів

Одна з головних причин зниження надійності РЕМ – це вихід з ладу РПН трансформатора.

Для здійснення синтезу системи автоматичного керування необхідно мати математичну модель об'єкту. Схема фрагменту РЕМ на рис. 2.1.

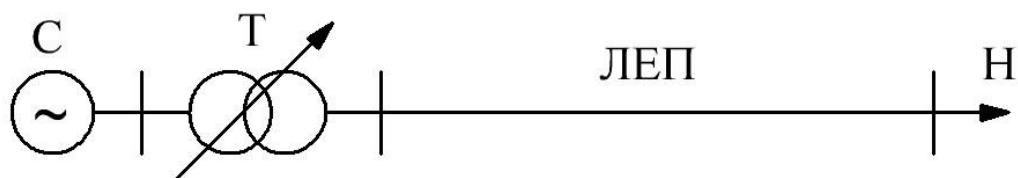


Рис. 2.1. Схема принципова фрагменту РЕМ

Н – навантаження; ЛЕП – повітряна лінія електропередачі;

С – енергосистема; Т – силовий трансформатор з пристроєм РПН.

Схема САК, що впроваджує закон зустрічного регулювання U в РЕМ на рис. 2.2.

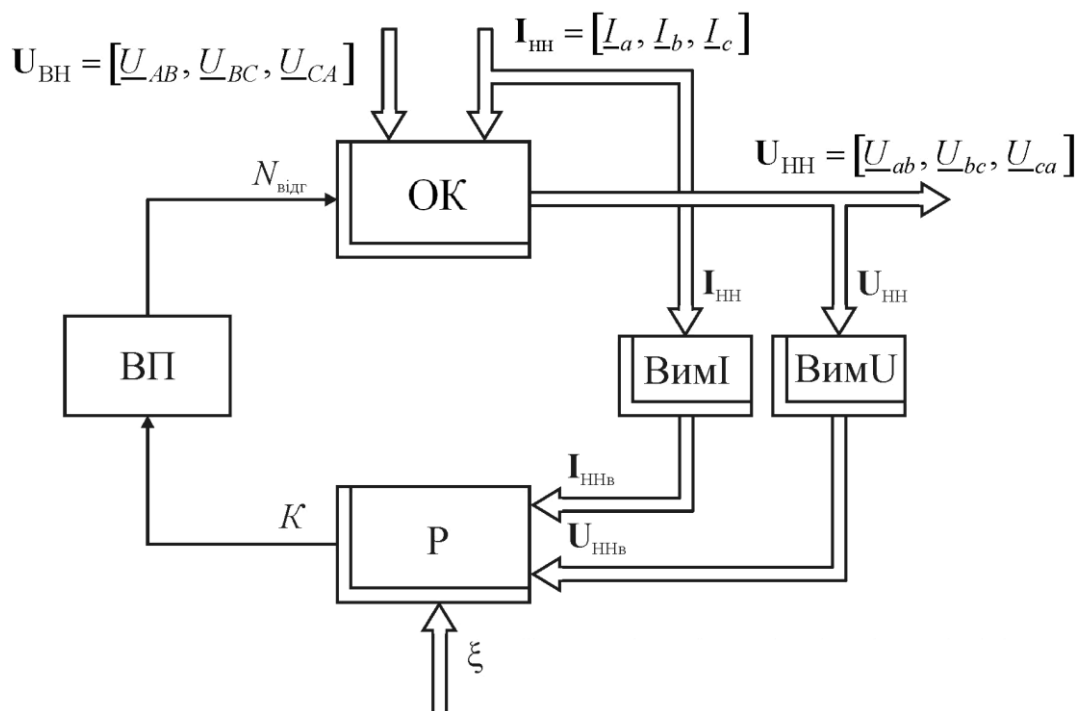


Рис. 2.2. Схема структурна САК з РПН, що реалізує закон зустрічного регулювання напруги

Тому, для досягнення мети дослідження сформульоване наступне з завдання: за відомими діапазоном та кроком регулювання РПН, а також вимірними значеннями струмів та напруг на стороні НН визначити алгоритм роботи регулятора, котрий в масштабі реального часу підбирав такі значення КТ (коефіцієнту трансформації) та значення часових затримок (t) спрацювання РПН, які створюють мінімальні значення усталеного відхилення U та мінімальні значення кількості спрацювань РПН.

Для вирішення завдання необхідно розробити ЗАК напруги в РЕМ.

2.2 Закони САК в РЕМ

На вузлових підстанціях мережі реалізується закон зустрічного регулювання U (напруги), згідно якого на шинах підстанції підтримується номінальна напруга при мінімальних навантаженнях, зі зростом навантаження для компенсації втрат U в елементах мережі цю U підвищують до $1,05U_{\text{ном}}$. Для ступінчатого регулювання РПН такий закон можна записати:

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

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

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

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

В умовах експлуатації намагаються зменшити кількість перемикачів відгалужень трансформатора, ідучи на зниження якості регулювання, але збільшуючи надійність. З цією метою закон синтезують нечутливим до короткочасних коливань U і орієнтують тільки на відпрацювання відхилень, яке досягається впровадженням у вираз 2.1 часової затримки і логічної умови, що перетворюють вираз до виду:

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

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

де τ_3 – час затримки сигналу.

Щоб підвищити стійкість регулювання, в закон ввели додаткову логічну умову, на основі врахувань знаку похідної огинаючої регульованої напруги $U(t)$. Дана умова дає можливість не проводити перемикачів відгалужень трансформатора, коли регульований параметр знаходиться за межами нечутливості регулятора, а саме під впливом зовнішніх факторів - сам прямує до зони. Закон запишеться:

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

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

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

Проте вищевказаний закон не запобігає швидкої реакції регулятора напруги на значне відхилення контрольованої U , в результаті чого напруга на навантаженні тривалий час перебуває на ненормальному значенні через затримку сигналу керування. У результаті спосіб ведення бізнесу споживачами змінився, що призвело до дефіциту продукції, зниження якості, а іноді й до виробничих дефектів. Тому пропонується доповнити закон керування (2.4) додатковою умовою, що дала можливість перемикан РПН без затримки часу, коли значення контрольованої напруги істотно відрізняється від $U_{ном}$. Враховуючи це, закон матиме такий вигляд:

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

Пристрій РПН, який вичерпав свій ресурс, потрібно перемикаати рідше, ніж пристрій РПН, який щойно був представлений. Не існує чіткого зв'язку між тривалістю роботи та категорією (наприклад, «нові» та «старі»), оскільки багато параметрів, які аналізуються під час експлуатації.

У загальному вигляді залежність сигналу включення пристрою РПН від часу затримки має вигляд::

$$\tau_s = f(I_n, \tan \delta, W, C, CO_2, C_n H_n, R) \tag{2.6}$$

Існує досить багато систем контролю стану трансформаторів з РПН, які дозволяють отримувати дані для значень, що містяться у виразі (2.6).

Прикладом системи моніторингу є «ESMDU-TRANS» виробництва «Запоріжтрансформатор». Зовнішній вигляд наведено на рис. 2.3, а програмного забезпечення – рис. 2.4.

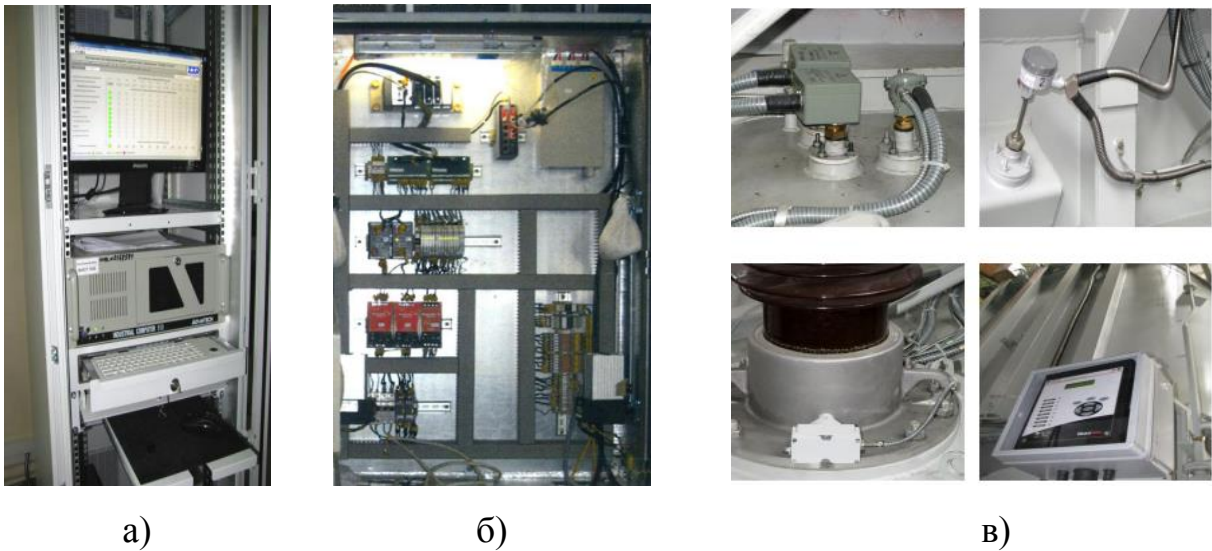


Рис. 2.3. Обладнання системи моніторингу стану трансформатора «ESMDU-TRANS»:

- а) шафа автоматизованого робочого місця ESMDU-TRANS
- б) шафа моніторингу стану трансформатора
- в) первинні вимірювальні перетворювачі системи моніторингу

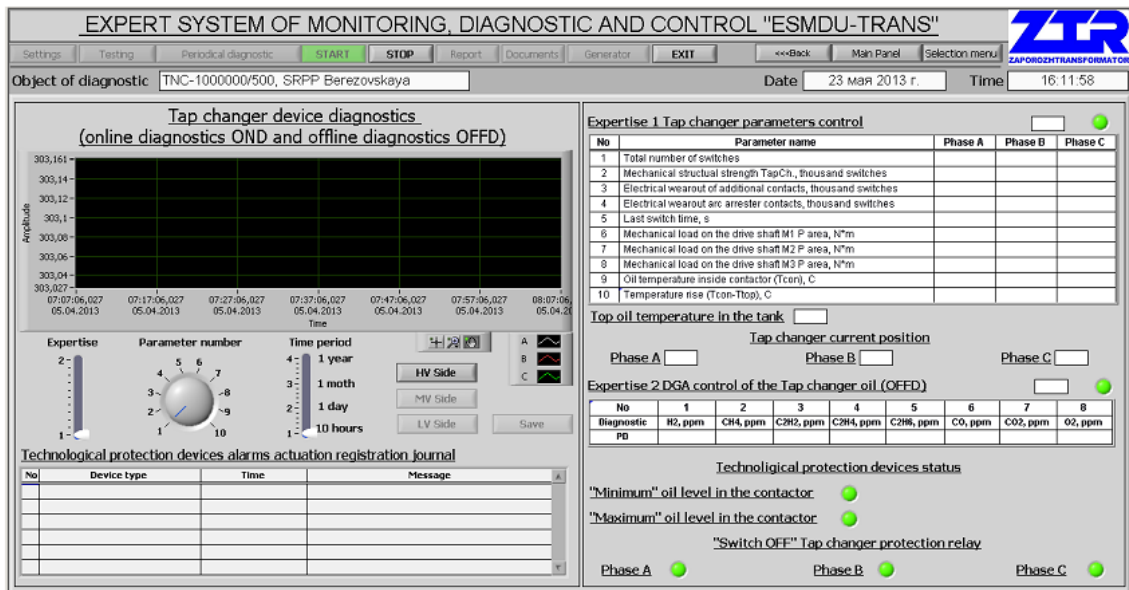


Рис. 2.4. Програмне забезпечення системи моніторингу стану трансформатора «ESMDU-TRANS»

Залежність (2.6) є убільшості нелінійною. Тому треба провести вибір математичного апарату, застосування котрого найадекватніше оцінюватиме залежність.

2.3 Алгоритм роботи та математична модель блоку визначення адаптивної затримки часу спрацювання РПН

Найбільшу складність при розробці закону викликає визначення адаптивної затримки часу спрацювання РПН. У випадку застосування апарату нечіткої логіки залежність має вигляд:

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

де *fuzzy* – оператор нечіткого логічного виводу; I_d – струм електродвигуна приводу; $\text{tg } \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат трансформаторного масла; W – вміст вологи в маслі; C – ємність масла; $C_n H_m$ – вміст розчинених газів CO_2 , C_2H_4 , C_2H_2 (найбільше змінюється вміст в процесі зносу пристрою РПН); R – перехідний опір контактів.

Створимо математичну модель, яка основана на методах нечіткої логіки, що дозволила б визначати значення τ_3 .

Перший етап побудови моделі: треба визначити можливий діапазон зміни параметрів, які впливають на визначення τ_3 , і проаналізувати їх. Вихідним сигналом моделі - затримки часу спрацювання τ_3 .

Враховуючи зазначених зауважень вхідні параметри моделі та лінгвістична оцінка занесена в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Вхідні параметри каналу визначення стану РПН та їх
лінгвістична оцінка

№ з/п	Параметр	Назва	Діапазон значень	Терми
Вхідні змінні				
1	I	Струм електродвигуна привода, А	1,0...2,5	Низький (L), середній (M), вище середнього (HM), великий (H)
2	tgD	Тангенс кута діелектричних втрат, %	2,0...4,2	Низький (L), середній (M), вище середнього (HM), великий (H)
3	W	Вміст вологи в маслі, г/т	10...25	Низький (L), середній (M), вище середнього (HM), великий (H)
4	C	Ємність масла, пФ	8...16	Низька (L), середня (M), велика (H)
5	CO ₂	Вміст розчиненого CO ₂ , мкл/л	1800...4000	Низький (L), середній (M), великий (H)
6	CnHm	Вміст розчинених вуглеводнів, мкл/л	45...180	Низький (L), середній (M), вище середнього (HM), великий (H)
7	R	Перехідний опір контактів, мкОм	16...20	Низький (L), середній (M), великий (H)
Вихідна змінна				
8	t	Затримка часу перемикавання, в.о.	0...1	Мінімальна (MIN) Дуже низька (VL), Низька (L), Нижче середнього (LM), Середня (M), Вище середнього (HM) Висока (H), Дуже висока (VH)

Задача визначення τ_3 , в тому, щоб кожній комбінації вхідних параметрів підібрати одне із значень затримки часу САК трансформатором, якою враховується ресурс РПН.

Користуючись введеними термами, створено табл. 2.2.

Таблиця 2.2. Нечітка база знань блоку визначення
адаптивної затримки часу τ_3

№ з/п	Вхідні змінні							Вихідна змінна
	I	tgD	W	C	CO2	CnHm	R	t
1	L	L	L	L	L	L	L	MIN
2	L	L	M	L	M	L	L	MIN
3	L	L	M	L	M	M	L	VL
4	L	M	M	M	M	M	M	VL
5	M	M	M	M	M	M	M	L
6	M	M	HM	M	M	M	M	LM
7	M	HM	HM	M	M	HM	M	M
8	M	H	HM	M	M	HM	M	HM
9	HM	H	HM	M	M	HM	M	H
10	HM	H	HM	H	H	HM	H	VH
11	HM	H	HM	H	H	H	H	VH
12	H	H	H	H	H	H	H	VH

Схема нечіткого блоку визначення τ_3 приведена на рис. 2.11.

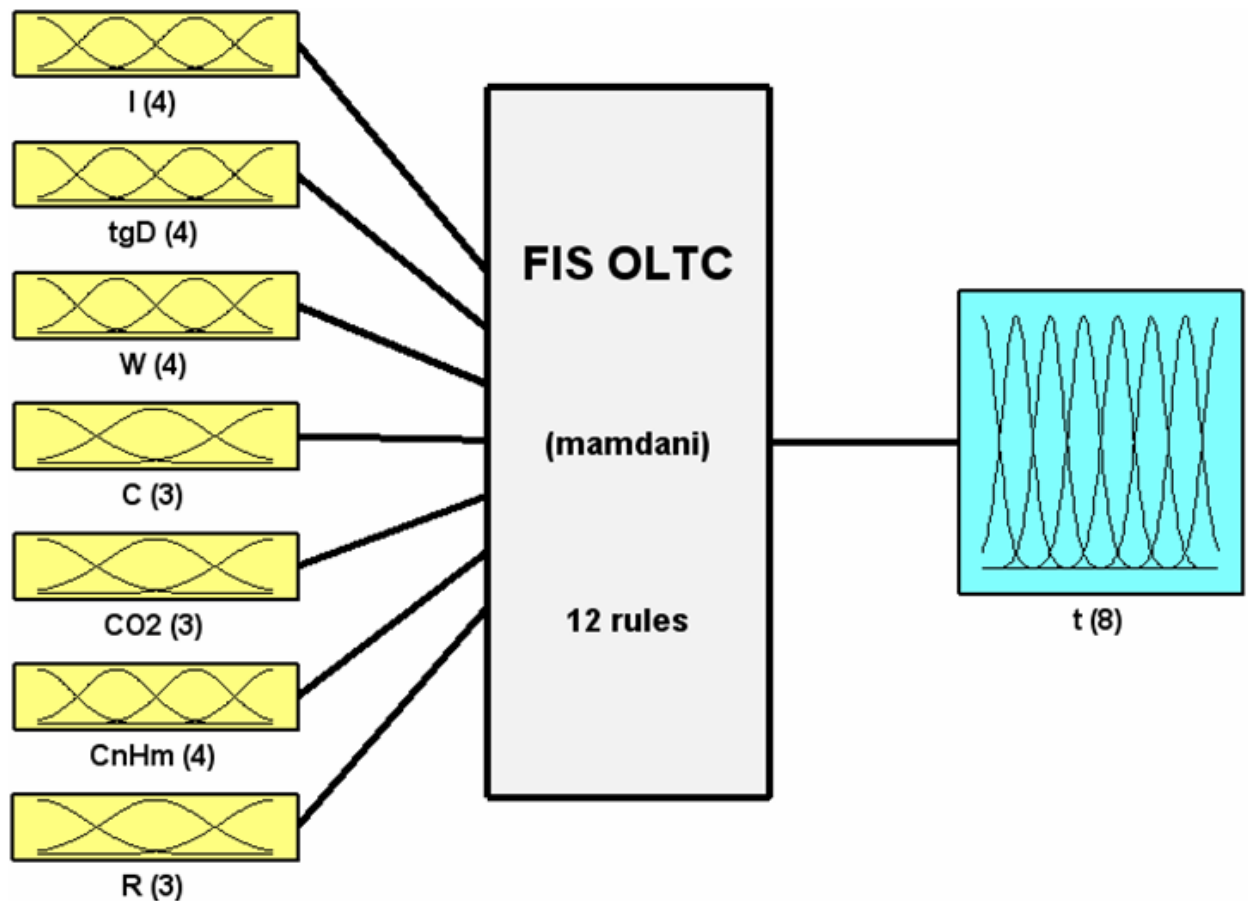


Рис. 2.11. Схема структурна нечіткого блоку визначення адаптивної затримки часу τ_3

Для вирішення задачі керування в якості алгоритму був обраний алгоритм Мамдані. Вибір обумовлено тим, що нечіткий алгоритм – це найбільш простий для програмування, також володіє простотою і наочністю всіх складових.

При розробці моделі блоку прийняття рішень було застосовано функції Гауса, що відповідає закону розподілу належності вхідної величини до вибраних термів:

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

де b – координата максимуму; c – коефіцієнт концентрації-розтягу.

Графічне відображення функцій приналежності, а також числові характеристики на рис. 2.12 – 2.19.

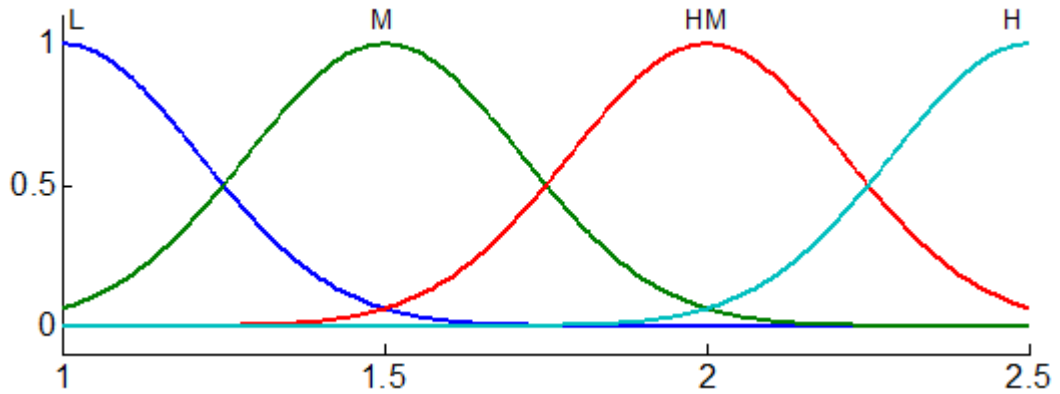


Рис. 2.12. Нечіткі значення змінної «I»

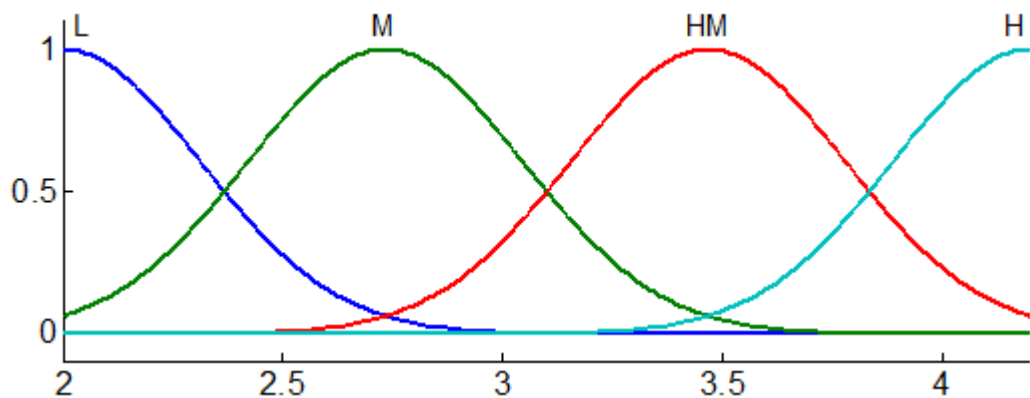


Рис. 2.13. Нечіткі значення змінної «tgD»

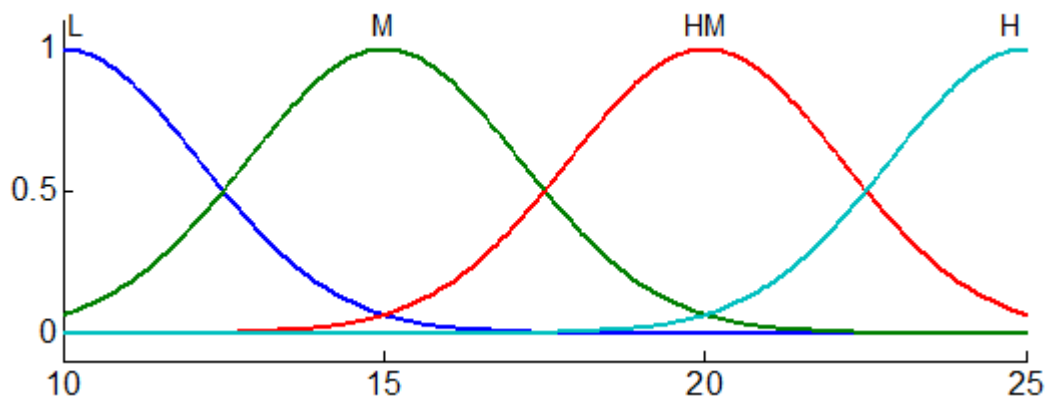


Рис. 2.14. Нечіткі значення змінної «W»

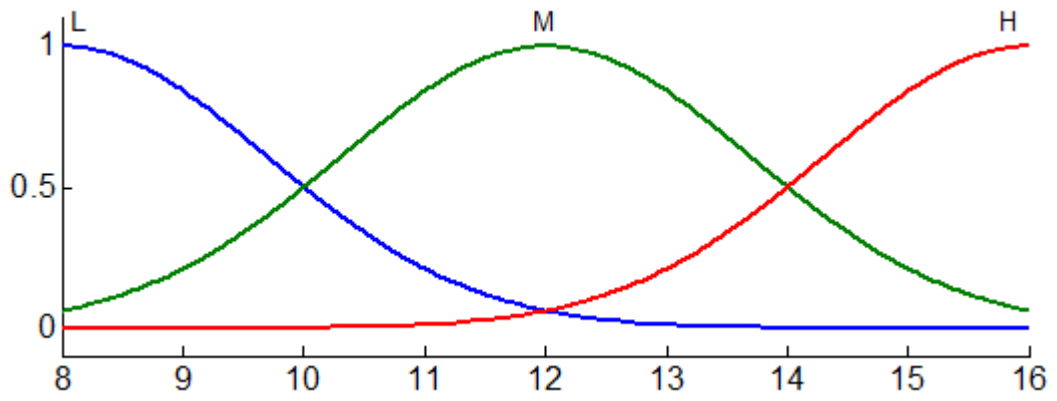


Рис. 2.15. Нечіткі значення змінної «С»

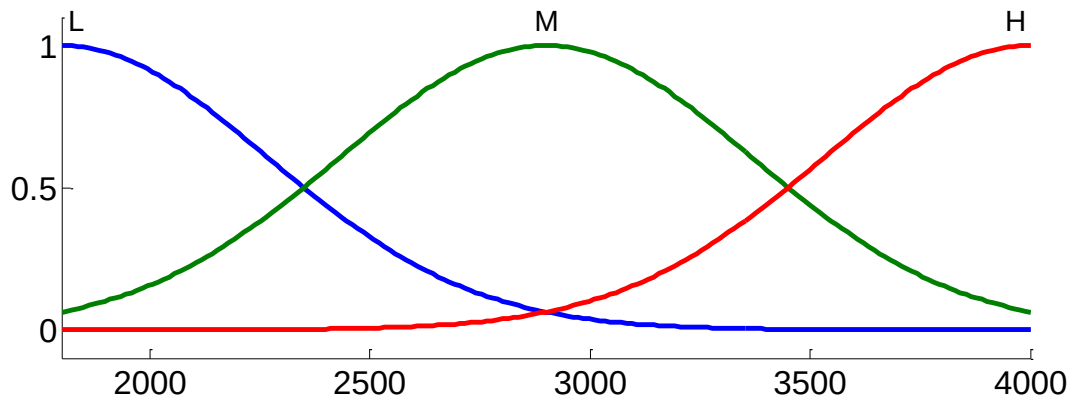


Рис. 2.16. Нечіткі значення змінної «C02»

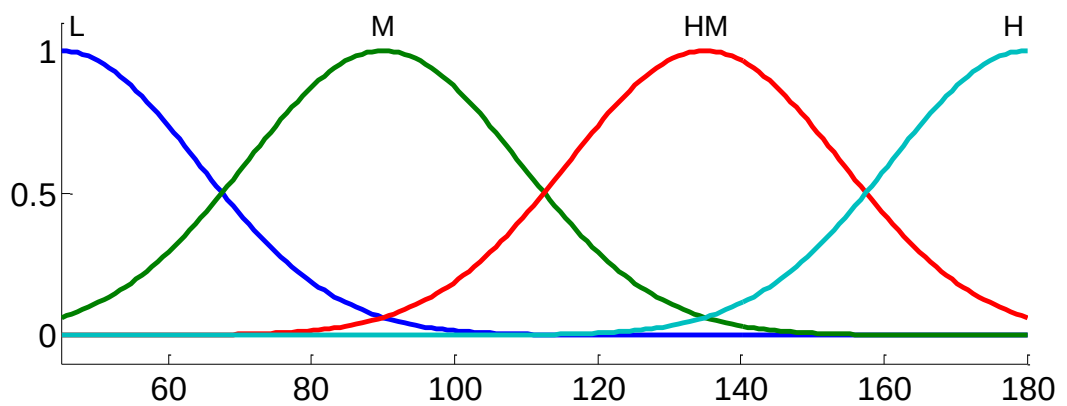


Рис. 2.17. Нечіткі значення змінної «CnHm»

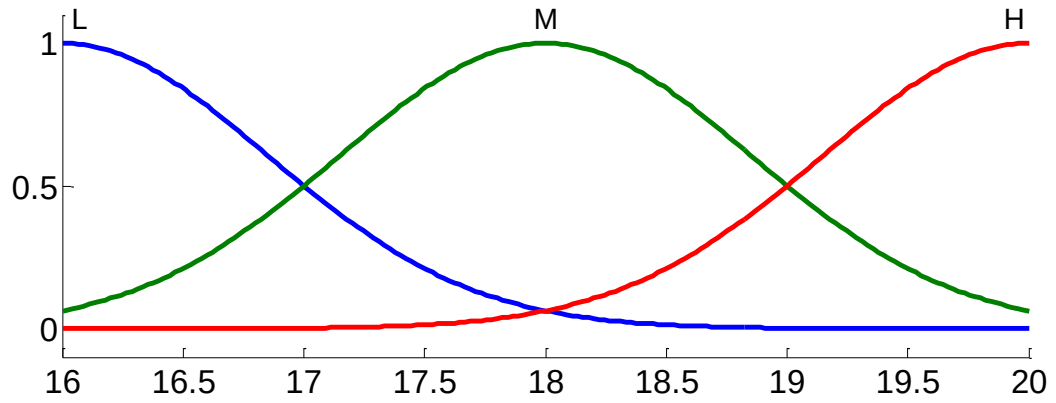


Рис. 2.18. Нечіткі значення змінної «R»

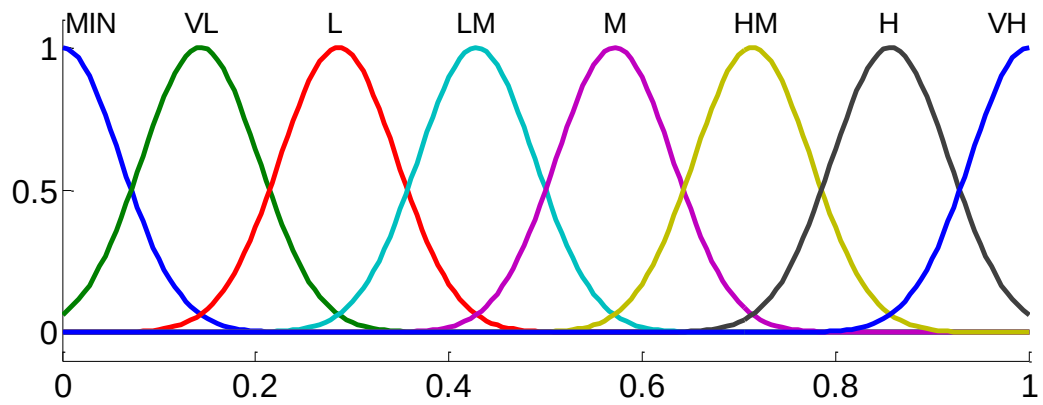


Рис. 2.19. Нечіткі значення вихідної змінної «t»

Графічні залежності у вигляді тривимірних поверхонь, що відображають зміну вихідного від вхідних параметрів наведено на рис. 2.20 – 2.23.

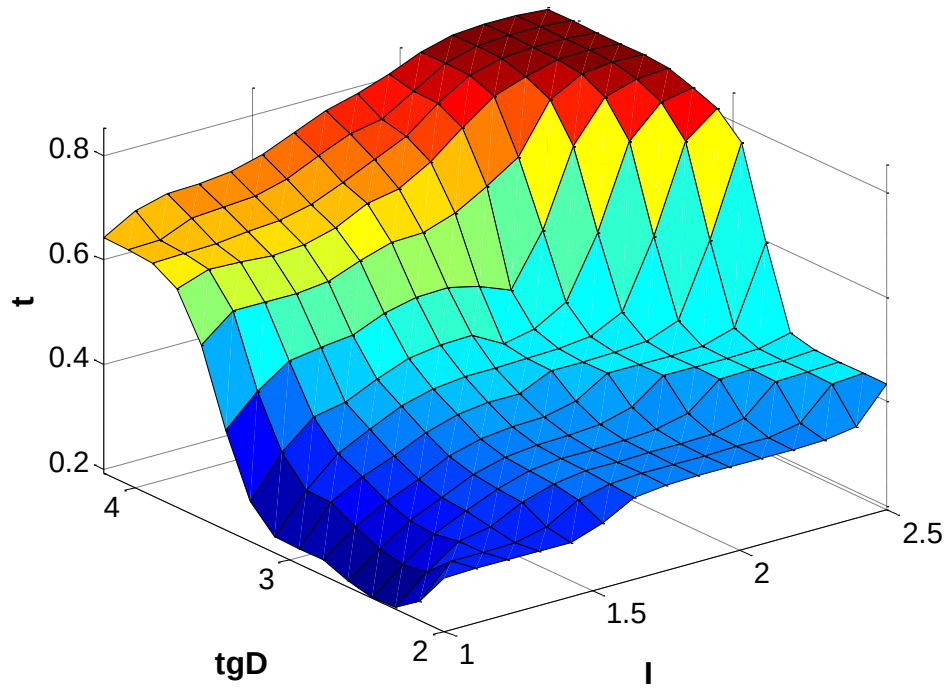


Рис. 2.20. Графік поверхні $t = f(I, \text{tgD})$

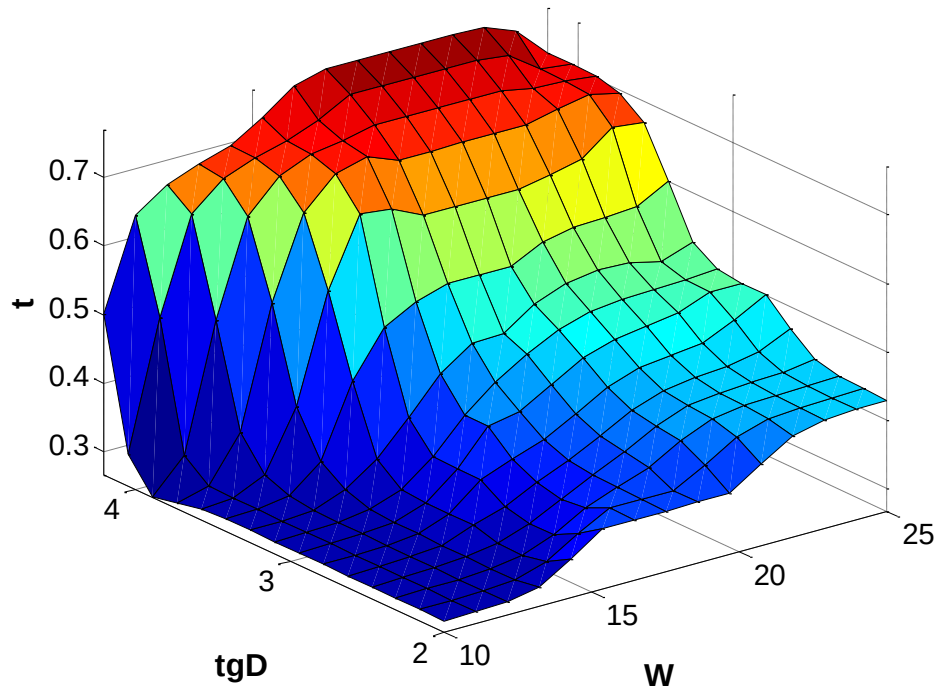


Рис. 2.21. Графік поверхні $t = f(W, \text{tgD})$

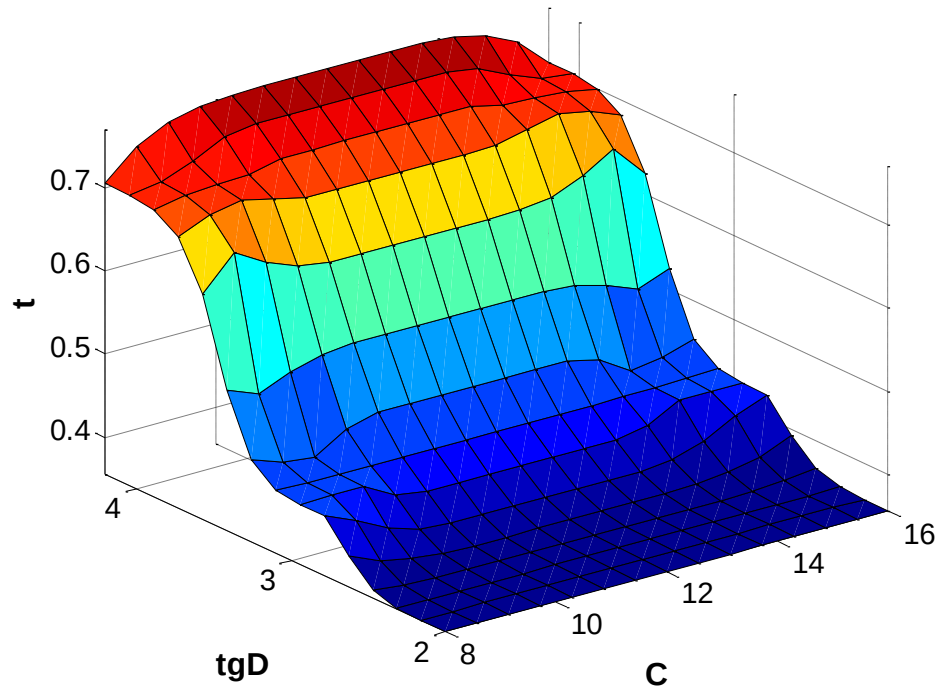


Рис. 2.22. Графік поверхні $t = f(C, \text{tgD})$

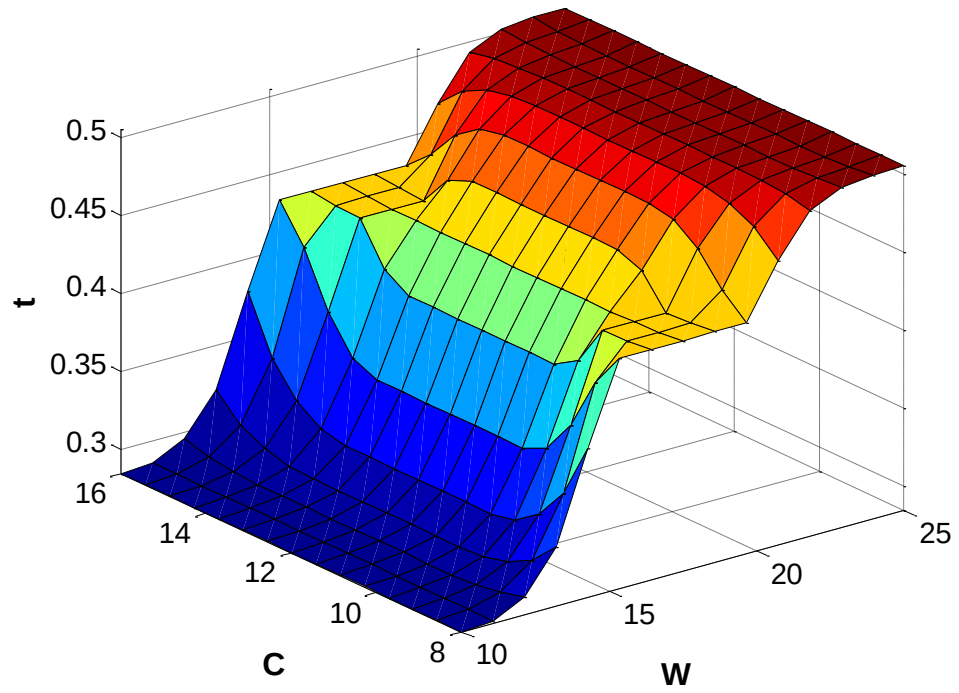


Рис. 2.23. Графік поверхні $t = f(W, C)$

Як видно з графіків, які зображені на рис. вище, поверхні мають достатньо «плавний» характер, а саме відсутні різкі зміни значень вихідної величини при зміні будь-якої з вхідних величин. Це свідчить про низьку чутливість вихідного параметру, що є досить позитивним явищем, тому що низька чутливість вихідного параметру блоку τ_3 позитивно впливає на стійкість роботи системи автоматичного керування в цілому.

Результати моделювання показали, що для зведення до чіткості отриманих нечітких значень τ_3 (для дефазифікації отриманих в результаті нечіткого виводу значень виходу моделі) найдоцільніше скористатись центроїдним методом (методом визначення центру ваги).

Ілюстрація роботи розробленої моделі вагового визначення K_j на рис. 2.24.

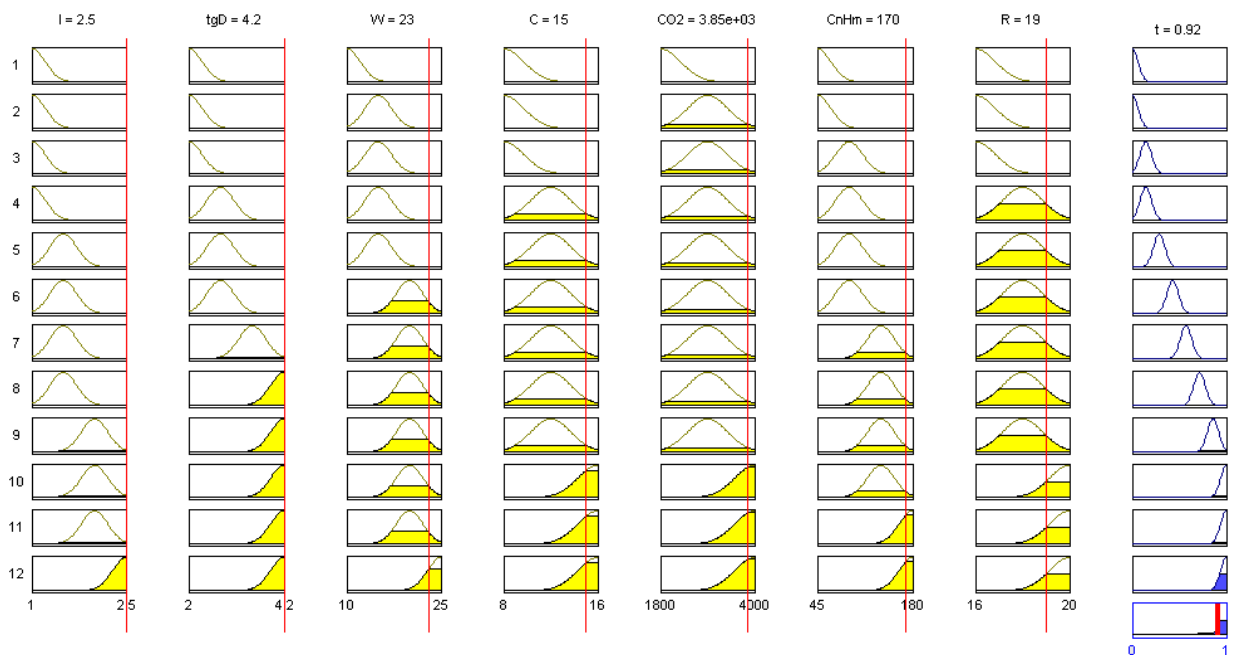


Рис. 2.24. Ілюстрація роботи розробленої нечіткої моделі визначення затримки сигналу перемикання пристрою РПН

Для перевірки працездатності розробленої системи автоматичного керування режимами напруги РЕМ, та для визначення ефекту від застосування найдоцільніше скористатись КІМ (комп'ютерним імітаційним моделюванням).

Висновки до розділу

1. У результаті аналізу існуючих САК режимами У розподільної електричної мережі встановлено, що для зменшення кількості перемикачів РПН без суттєвого погіршення якості енергії на його затискачах треба передбачити в системі автоматичного керування адаптивну затримку сигналу перемикачів відгалуження РПН.

2. Дані дослідження показали, що на величину затримки перемикачів РПН повинна враховувати зношеність контактів пристрою. Для реалізації підходу доцільно враховувати значення параметрів, які надходять від системи моніторингу стану трансформатора.

3. У результаті дослідження з вибору математичного апарату, придатного для вирішення поставленої задачі автоматичного керування, встановлено, що для вирішення найскладнішої частини задачі, а саме визначення залежності затримки сигналу перемикачів РПН від параметрів, які надходять від системи моніторингу стану трансформатора, найдоцільніше використати математичний апарат нечіткої логіки.

4. На основі апарату нечіткої логіки було розроблено алгоритм роботи та модель блоку визначення затримки сигналу перемикачів РПН. В якості алгоритму нечіткого виводу найкраще застосувати алгоритм Мамдані. Вибір обумовлено тим, що алгоритм - найбільш простий для програмування, а також простий і володіє наочністю всіх його складових.

РОЗДІЛ 3

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕЧІТКОЇ САК НАПРУГИ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

Для перевірки розробленої САК режимами напруги РЕМ, та для визначення ефекту від застосування треба використати метод (КІМ) комп'ютерного імітаційного моделювання.

Треба вирішити наступні задачі:

- створити математичну модель нечіткої САК напруги в РЕМ;
- Взятих за основу математичних моделей розробити КІМ САК напруги в РЕМ та нечітку модель блоку розрахування затримки сигналу спрацювання τ_3 ;
- за допомогою розроблених КІМ провести аналіз ефекту від використання розробленої системою автоматичного керування режимами напруги РЕМ.

Вирішенню завдань і присвячено третій розділ роботи.

3.1 Математична модель автоматичного регулювання напруги в РЕМ

Відомо, що дослідження САК можливо спростити, якщо описати основні процеси, які проходять в системі, диференційними рівняннями, а саме розробити її математичну модель, котра повинна адекватно показувати фізичну сутність процесів та бути досить простою. В переважній більшості випадків натомість диференційних рівнянь більш комфортно користуватись передаточними функціями, що отримуються з рівнянь їх перетворенням по Лапласу, до того ж схема із проходжуваними процесами перетворюється в структурну, кожній ланці котрої відповідає своя передаточна функція. При створенні математичної моделі САК необхідно врахувати лише ланки функціональної схеми, які бувають участь у перетворенні вхідного сигналу у вихідний.

Наведено принципову схему РЕМ рис. 3.1, за прикладом якого здійснювалась оцінка роботи розробленої САК режимами напруги в РЕМ.

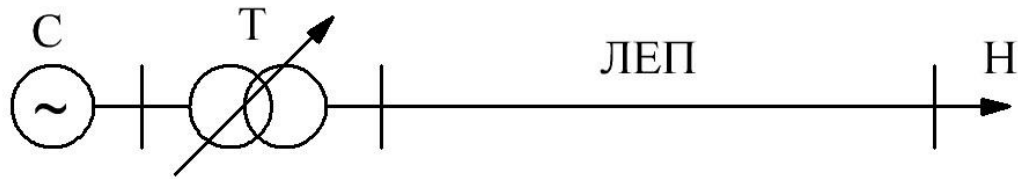


Рис. 3.1. Схема принципова фрагменту РЕМ

Н – навантаження $S_N = 10$ МВА, $\cos \varphi$ змінювався в межах $0,7 \dots 1$.

ЛЕП – повітряна лінія електропередачі марки АС-70 з параметрами:

$r_0 = 0,46$ Ом/км, $x_0 = 0,34$ Ом/км, довжина $L = 30$ км

Т – силовий трансформатор марки ТДН-10000/110 з наступними технічними параметрами: $S_N = 10$ МВА, $U_{ВН} = 115$ кВ, $U_{НН} = 11$ кВ,

$\Delta P_{K3} = 22$ кВт, $U_K = 10,5$ %.

С – енергосистема нескінченної потужності;

Для створення математичної моделі САК напруги силового трансформатора скористаємося функціональною схемою, яка показана на рис. 3.2.

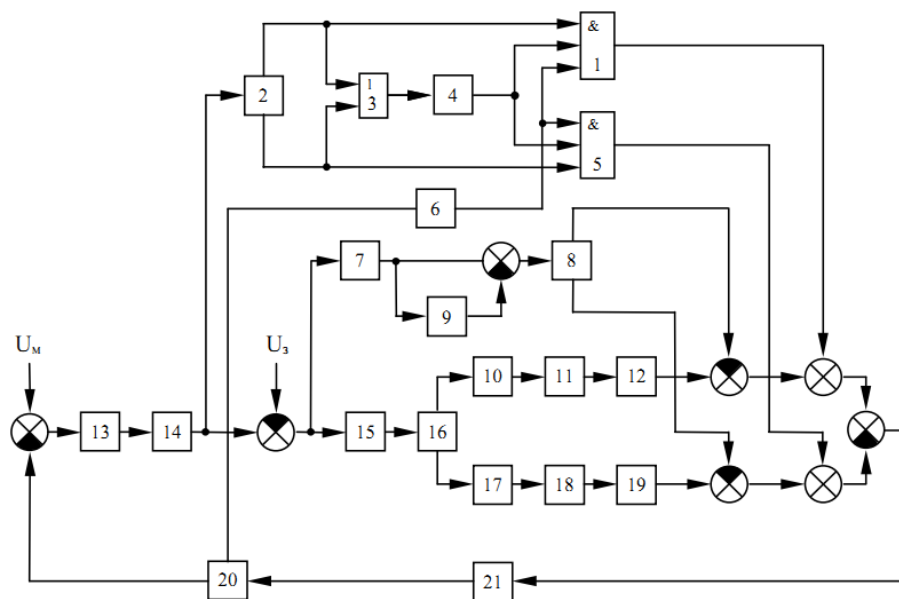


Рис. 3.2. Схема функціональна системи автоматичного регулювання напруги трансформатора

Запишемо передаточні функції для кожного блоку.

Призначення блоків часової затримки в тому: через деякий час після подачі вхідного сигналу відтворити на виході той же сигнал без спотворення і підсилення. Такий блок описується рівнянням виду:

$$x_{\text{вих}}(t) = x_{\text{вх}}(t - \tau), \quad (3.1)$$

причому $t > \tau$.

Передаточна функція такого блоку:

$$W(p) = e^{-p\tau}, \quad (3.2)$$

де τ – час затримки сигналу.

Електропривод РПН має власний час перемикання від 3 до 12 с в залежності від типу. Тому функція електропривода має вид:

$$W(p) = e^{-pT_d}, \quad (3.3)$$

де T_d – час, за який електропривод перемикає силове коло трансформатора з одного відгалуження на інше.

Пристрій РПН описується залежністю, що має в основі нелінійний характер:

$$u_{\text{ст}} = \begin{cases} u_0, & \text{якщо } x < 0, \\ -u_0, & \text{якщо } x > 0, \\ 0, & \text{якщо } x = 0, \end{cases} \quad (3.4)$$

де u_0 – напруга ступені перемикання.

Імпульсні елементи виконують амплітудо-імпульсну модуляцію та описуються:

$$W_{ie}(p) = \frac{1 - e^{-p\tau}}{p} . \quad (3.5)$$

Порогові блоки, що характеризують першу і другу зони нечутливості системи, виду:

$$y = \begin{cases} 0, & \text{якщо } -\Delta \leq u_{\pm} \leq \Delta, \\ k(u_{\pm} + \Delta), & \text{якщо } u_{\pm} < -\Delta, \\ k(u_{\pm} - \Delta), & \text{якщо } u_{\pm} > \Delta, \end{cases} \quad (3.6)$$

де Δ – значення зони нечутливості;

k – тангенс кута нахилу характеристики порогового блоку.

Опір мережі має активно-реактивний характер, що приводить до появи перехідних процесів при перемиканні відгалужень РПН. Згідно Г-подібної схеми заміщення, передаточна функція мережі має вид

$$W_{em}(p) = \frac{1}{LCp^2 + RCp + 1} , \quad (3.7)$$

де L , C , R – відповідно індуктивність, ємність і активний опір лінії електропередачі.

В залежності від співвідношення L , C і R мережі перехідні процеси можуть мати характер як аперіодичний, так і коливальний.

Логічний елемент "І":

$$W_{\text{"Г"}} = \begin{cases} y > 0, & \text{якщо } \begin{cases} x_1 > 0, \\ x_2 > 0, \\ x_3 > 0, \end{cases} \\ y \leq 0, & \text{якщо } x_1 \leq 0, \\ y \leq 0, & \text{якщо } x_2 \leq 0, \\ y \leq 0, & \text{якщо } x_3 \leq 0, \end{cases} \quad (3.8)$$

де x_1, x_2, x_3 – вхідні сигнали;

y – вихідний сигнал.

Передаточна функція логічного елемента "АБО":

$$W_{\text{"АБО"}} = \begin{cases} y \leq 0, & \text{якщо } \begin{cases} x_1 \leq 0, \\ x_2 \leq 0, \end{cases} \\ y > 0, & \text{якщо } x_1 > 0, \\ y > 0, & \text{якщо } x_2 > 0, \end{cases} \quad (3.9)$$

Перетворювачі імпульсного сигналу в потенційний представляють собою інтегратори та мають вид:

$$W_{\pi}(p) = \frac{1}{p} \quad (3.10)$$

Вимірювальний трансформатор напруги:

$$W_{\text{ВН}}(p) = \frac{k_{\text{T}}(T_1 p + 1)}{(T_2 p + 1)} \quad (3.11)$$

де k_{T} – коефіцієнт трансформації,

T_1, T_2 – постійні часу вимірювального трансформатора.

Отримані вирази функцій САК режимами напруги РЕМ і являють математичну модель об'єкту керування, на основі чого можливо розробити комп'ютерні імітаційні моделі.

3.2 Комп'ютерне імітаційне моделювання САК напруги в РЕМ та визначення ефекту від застосування

На рис. 3.3. узагальнена КІМ нечіткої САК напруги в РЕМ.

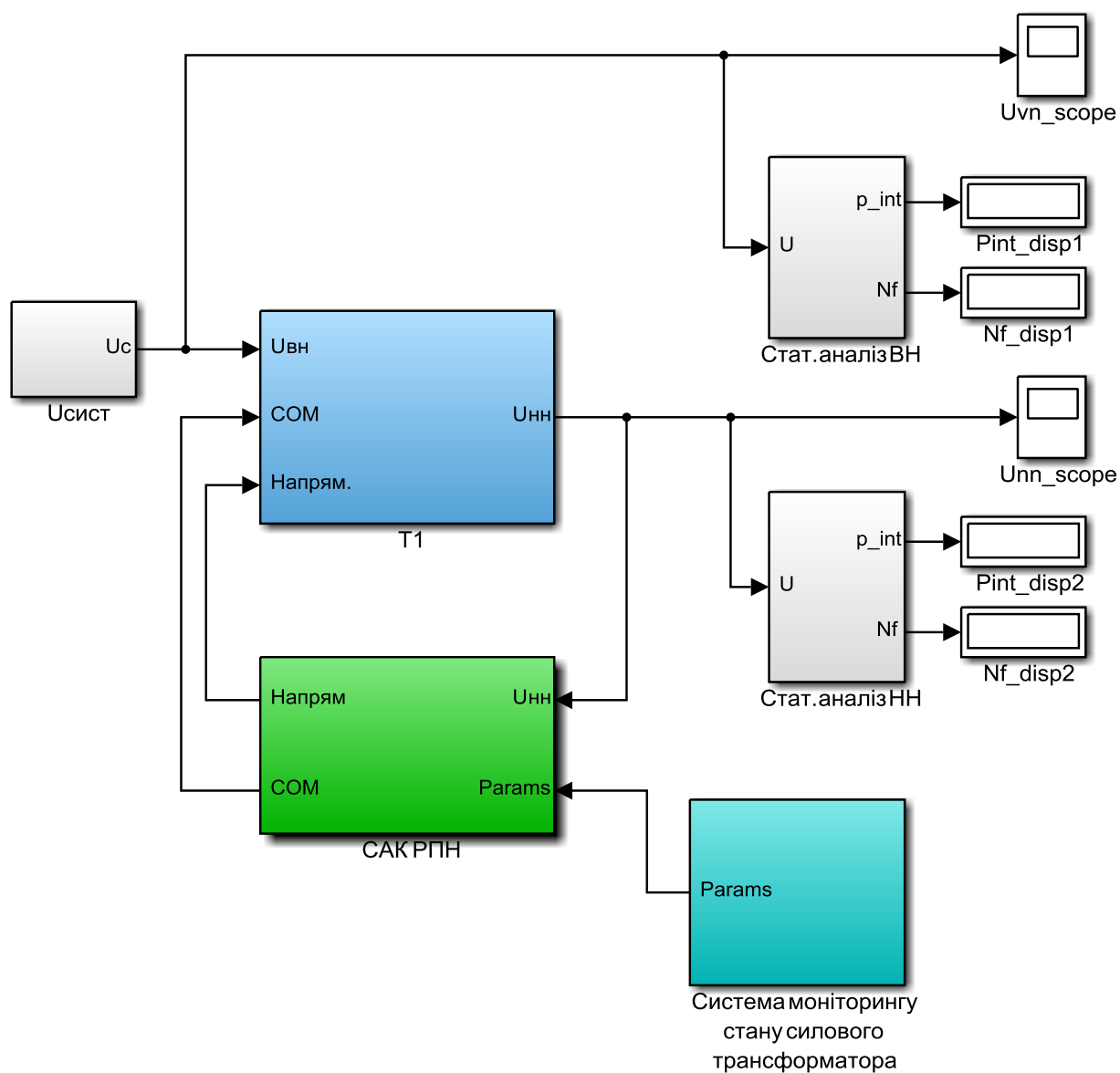


Рис. 3.3. Узагальнена КІМ нечіткої САК напруги в РЕМ

На рис. 3.4 КІМ трансформатора Т1 з механічним РПН.

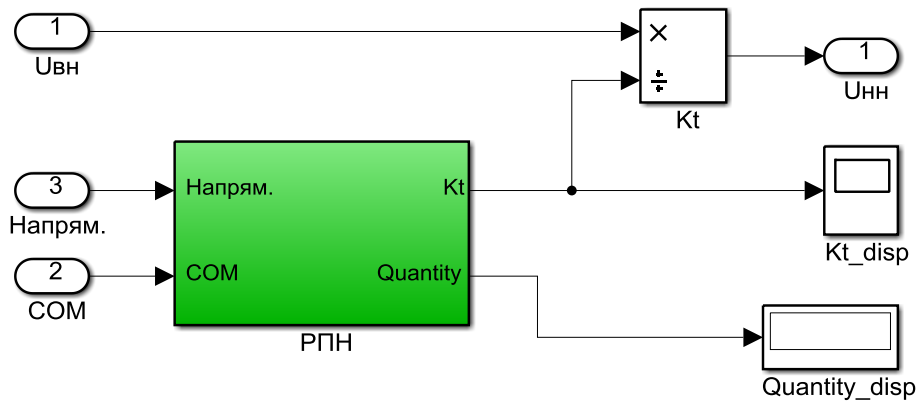


Рис. 3.4. КІМ трансформатора з РПН

Основний елемент даної комп'ютерної моделі – це модель механічного РПН (рис. 3.5).

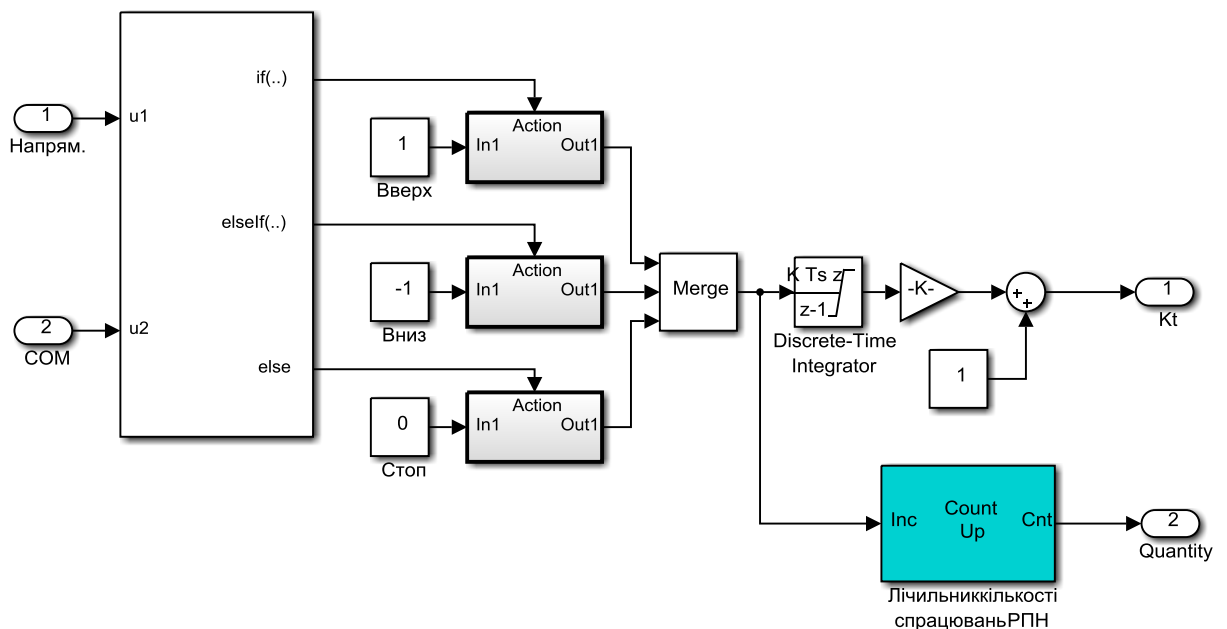


Рис. 3.5. Механічний РПН трансформатора

Модель блоку моніторингу стану трансформатора на рис. 3.6.

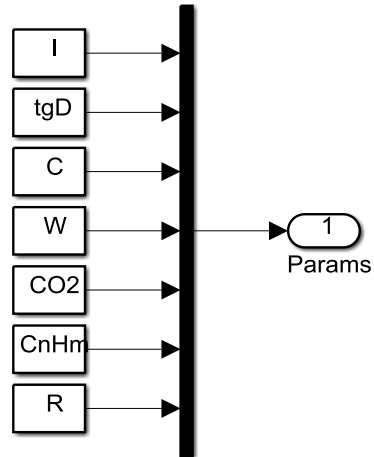


Рис. 3.6. Блок моніторингу стану трансформатора

Модель системи автоматичного керування пристроєм РПН трансформатора, в основі покладено розроблений в роботі закон керування (2.5 на рис. 3.7.

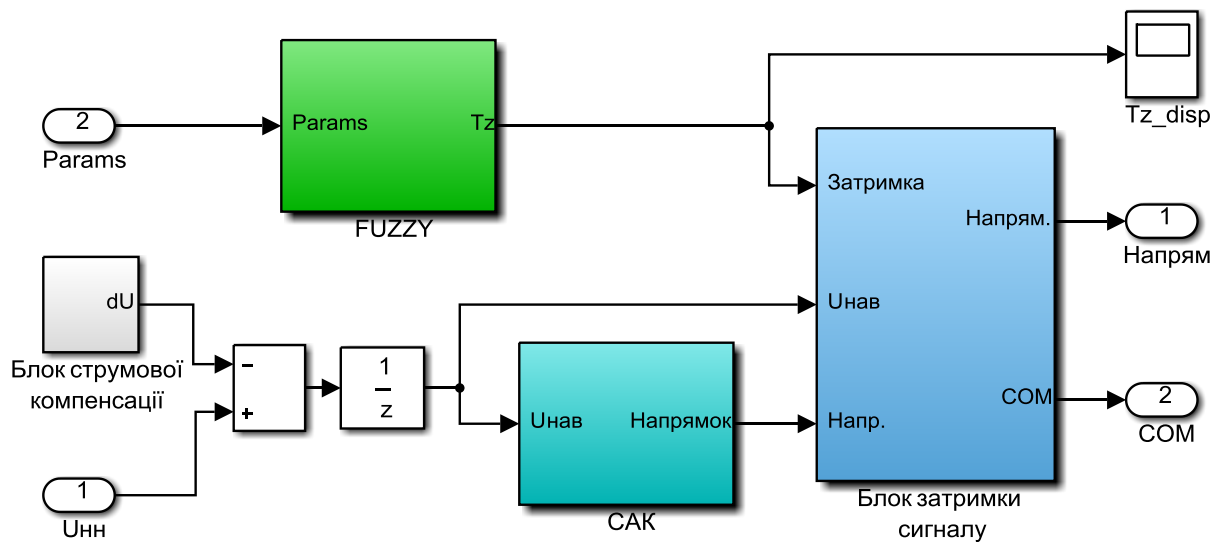


Рис. 3.7. Блок «САК РПН»

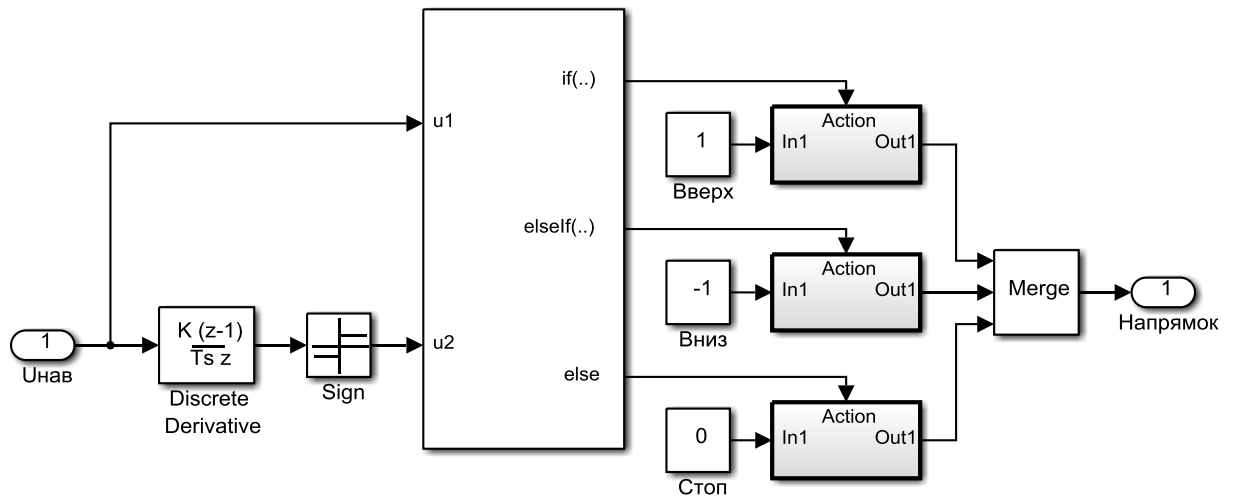


Рис. 3.8. Схема структурна блоку визначення напрямку перемикання РПН

Величина огинаючої графіка діючих значень U розраховується за допомогою стандартного блоку «Discrete Derivative» диференціювання сигналу.

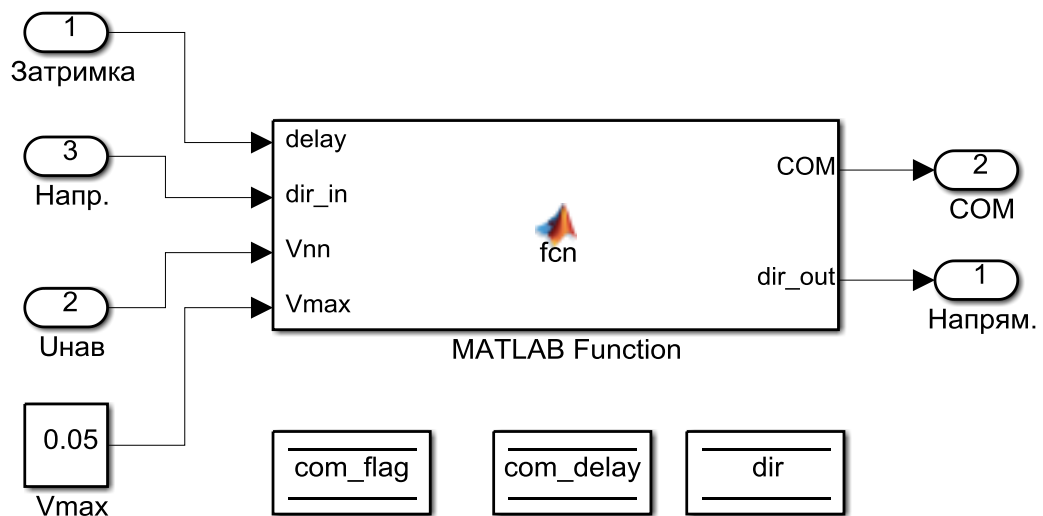


Рис. 3.9. Блок, що реалізує затримку сигналу спрацювання пристрою РПН (модель)

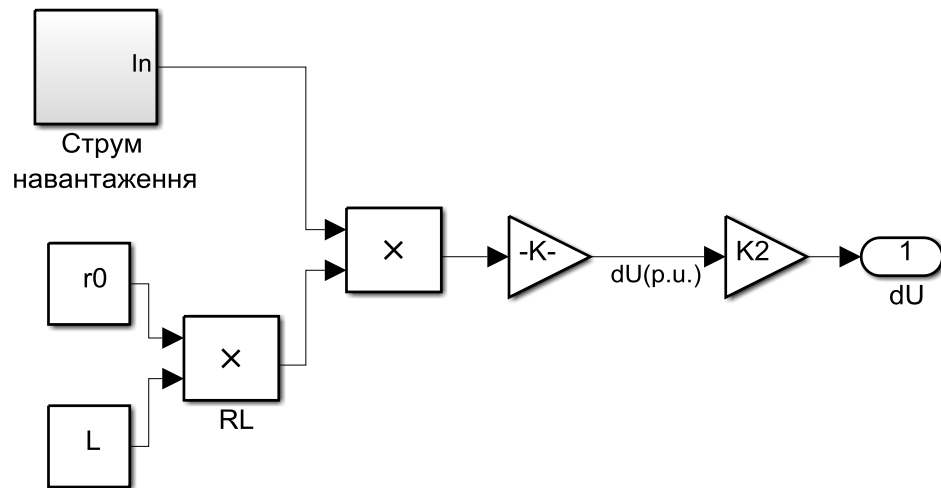


Рис. 3.10. Блок струмової компенсації (модель)

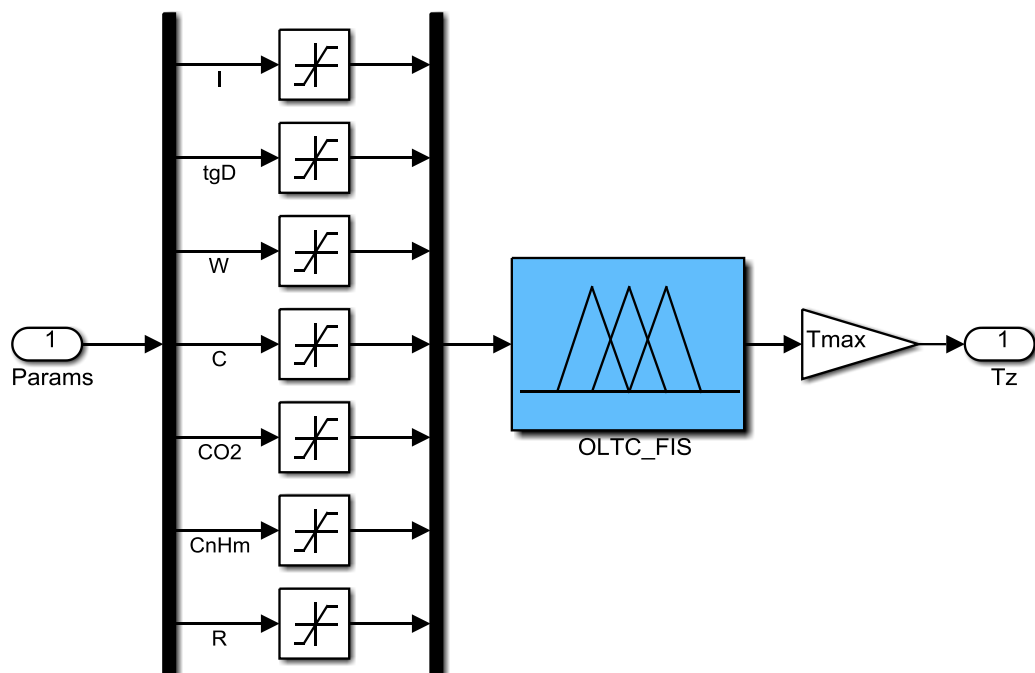


Рис. 3.11. Схема структурна визначення затримки часу спрацювання РПН

Головним елементом даної моделі є блок «OLTC_FIS» нечіткого логічного виводу, в якому реалізується алгоритм виводу Mamdani. З рис. 3.10, входними сигналами блоку є значення, що надходять від системи моніторингу стану трансформатора. Вихідним параметром - τ_3 .

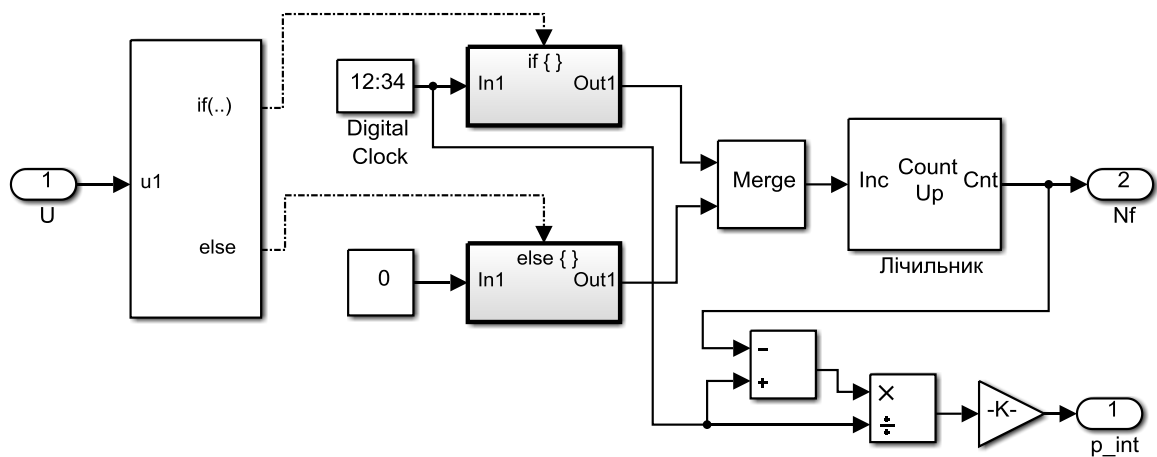


Рис. 3.12. Блок визначення статистичних показників усталеного відхилення трифазної напруги $V, \%$ (модель)

Найбільш доцільно застосувати метод комп'ютерного імітаційного моделювання для визначення ефекту застосування розробленого САК з режимом напруги РЕМ.

В якості базової моделі для порівняння обрано САК з режимом напруги у РЕМ, який реалізує закон керування (2.5) з фіксованою затримкою часу роботи пристрою РПН.

Для двох випадків САК (базового та розробленого) була проведена серія обчислювальних експериментів для різних значень параметрів системи моніторингу стану трансформатора. Тобто імітуються різні ступені «зносу» пристрою РПН.

Таблиця 3.1. Вхідні параметри від датчиків стану для різних варіантів
«зношеності» пристрою РПН

№ з/п	Назва параметру	Позн.	Значення параметрів від датчиків стану		
			«Новий» пристрій РПН	Пристрій РПН, що знаходився в роботі	«зношений» пристрій РПН
1	Струм електродвигуна привода, А	I	1,5	2,2	2,5
2	Тангенс кута діелектричних втрат, %	tgD	2,1	3	4,2
3	Вміст вологи в маслі, г/т	W	14	12,3	23
4	Ємність масла, пФ	C	11	15,6	15
5	Вміст розчиненого CO ₂ , мкл/л	CO ₂	2050	2650	3850
6	Вміст розчинених вуглеводнів, мкл/л	CnHm	84,5	156	170
7	Перехідний опір контактів, мкОм	R	16,4	17	19

Результати моделювання розробленої та базової систем автоматичного керування режимами напруги у РЕМ для випадку «зношеного» РПН у вигляді графіків на рис. 3.13 – 3.19.

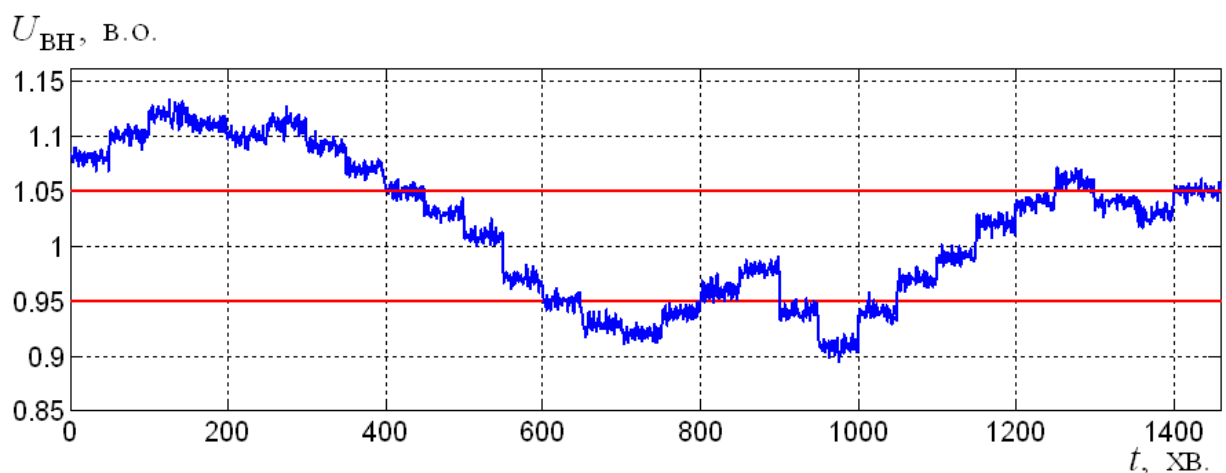


Рис. 3.13. Зміна діючого значення U (в.о.) на стороні ВН трансформатора

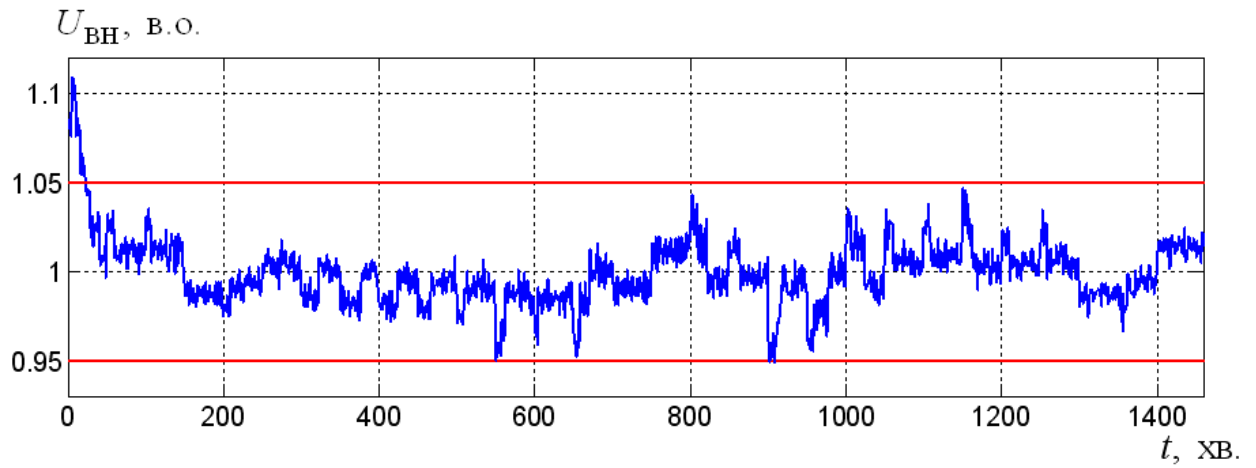


Рис. 3.14. Зміна діючого значення U (в.о.) на стороні НН трансформатора для варіанту базової САК

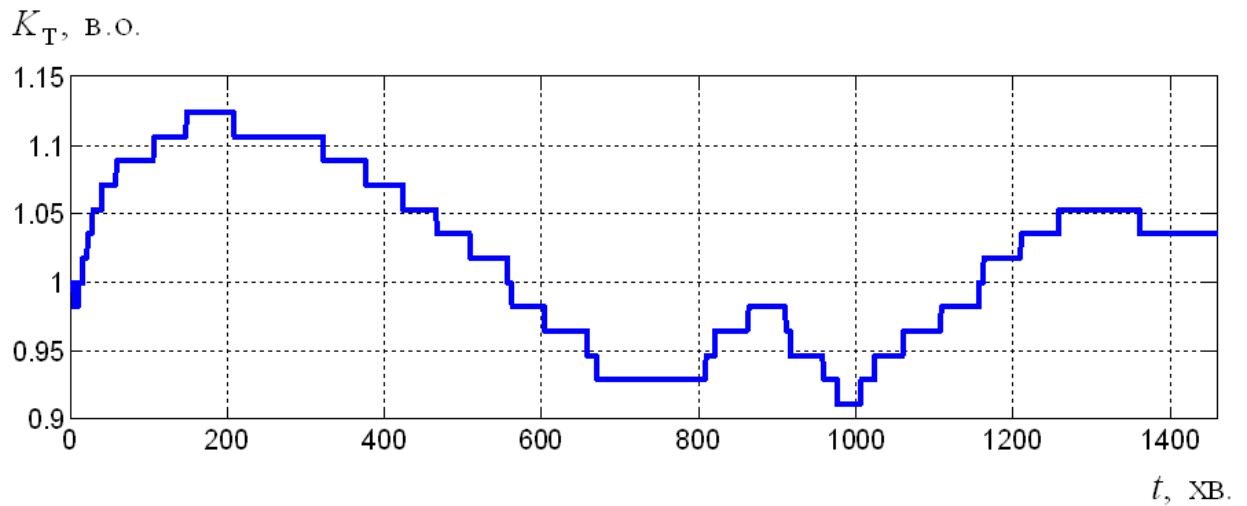


Рис. 3.15. Зміна K_T трансформатора для варіанту базової САК

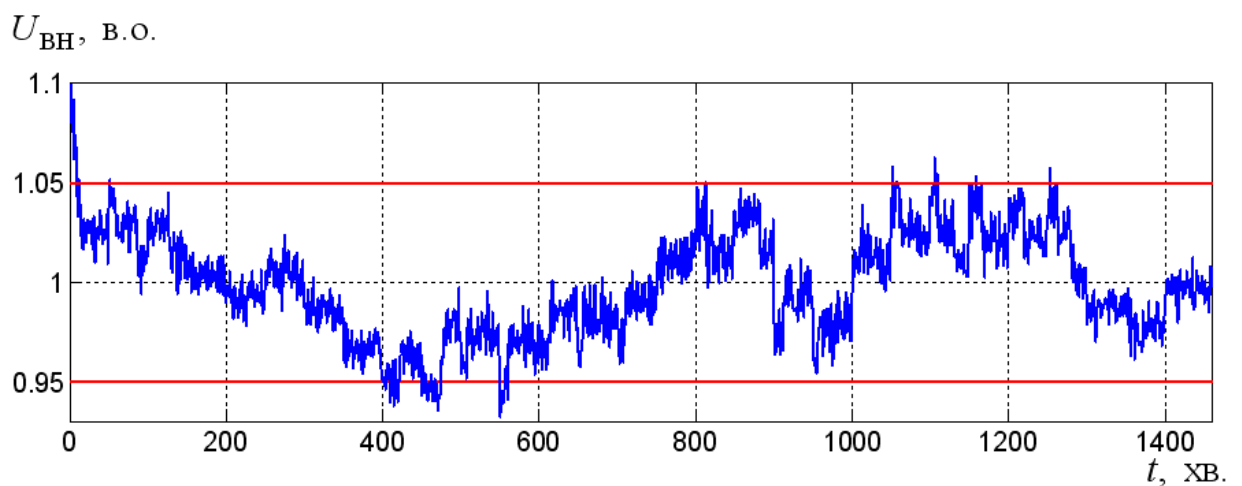


Рис. 3.16. Зміна діючого значення U (в.о.) на стороні НН трансформатора для розробленої САК

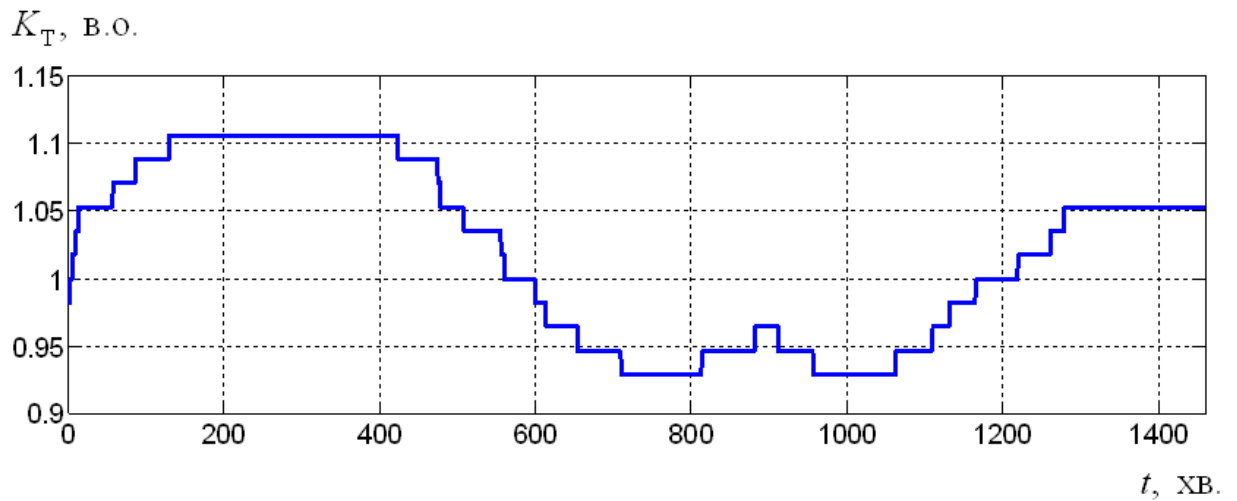


Рис. 3.17. Зміна КТ трансформатора для варіанту розробленої САК

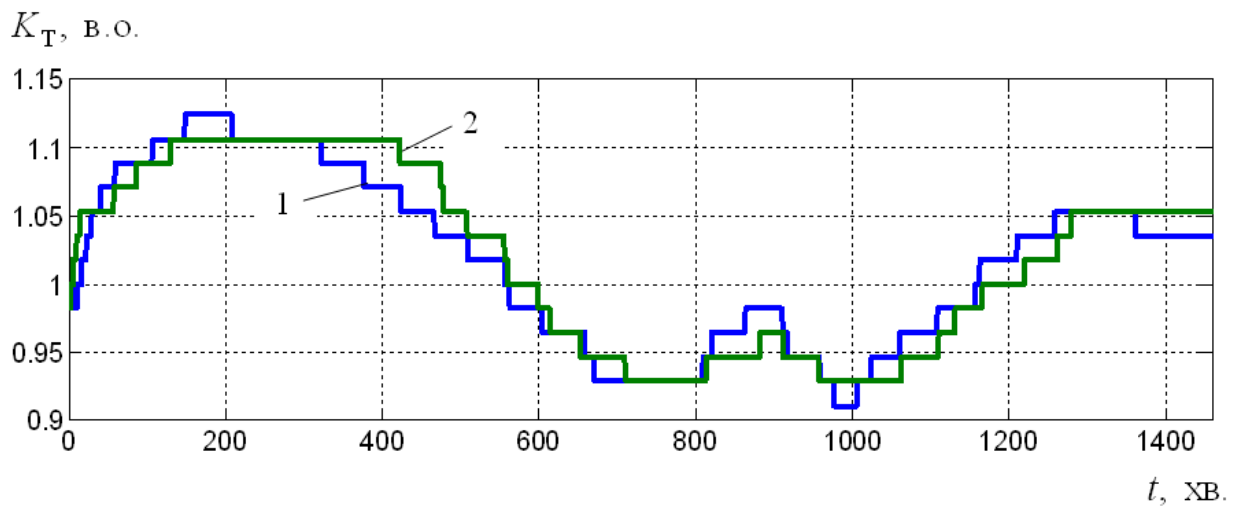


Рис. 3.18. Зміна КТ трансформатора для варіантів базової (1) та розробленої (2) САК

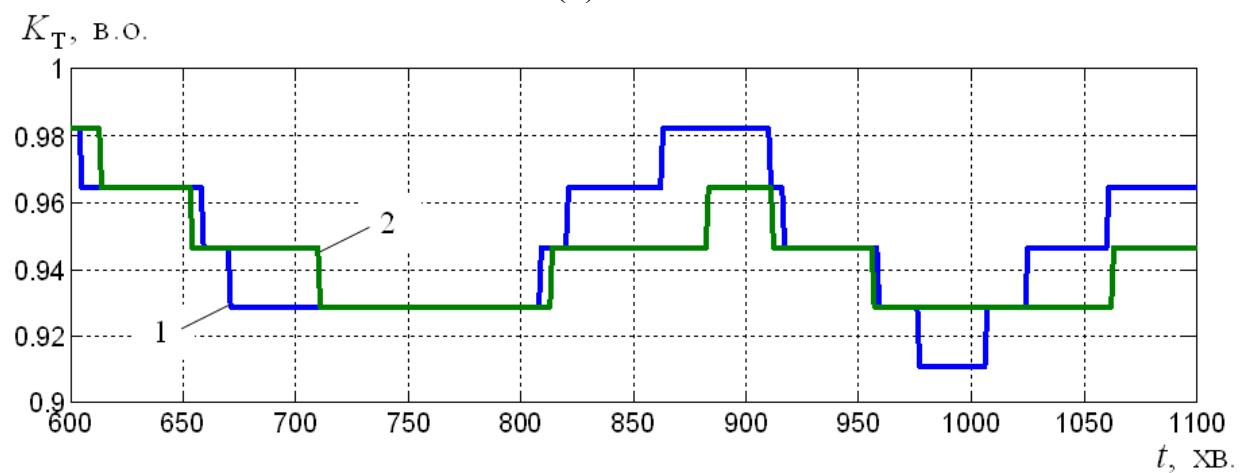


Рис. 3.19. Зміна КТ трансформатора для варіантів базової (1) та розробленої (2) САК

Статистична обробка результатів КІМ базової та розробленої САК для «зношеного» механічного РПН трансформатора наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Статистична обробка результатів комп'ютерного моделювання

№ з/п	Варіант моделі САК	Інтегральна ймовірність, $P(x \geq 0,95)$, в.о.	Кількість не потраплянь в норм. допуст. межі, $N_{н.д.}$	Кількість спрацювань пристрою РПН, $N_{РПН}$
1.	Вихідні дані (сторона ВН трансформатора)	0,43	833	-
2.	Базова модель САК	0,98	25	36
3.	Розроблена модель САК	0,96	54	29

З результатів моделювання, при використанні як базової САК, так розробленої в роботі нечіткої системи автоматичного керування РПН силового трансформатора, значення відхилення напруги задовольняють вимогам ГОСТ 13109-97 відносно показника якості. Проте, у випадку застосування системи автоматичного керування із адаптивним нечітким визначенням τ спрацювання, кількість спрацювань «зношеного» РПН виявилась на 19,4 % меншою, що є суттєвою перевагою. Ефект забезпечується за рахунок введення адаптивної τ (затримки часу спрацювання), яка залежить від стану пристрою РПН трансформатора.

Висновки до розділу

1. Для створення математичної моделі системи регулювання U було використано математичний апарат нечіткої логіки та метод передаточних

функцій. Отримані математичні моделі використали в основі комп'ютерних імітаційних моделей розробленої системи автоматичного керування.

2. Для визначення ефекту від застосування нечіткої системи регулювання напруги в розподільній електричній мережі методом імітаційного моделювання було прораховано комп'ютерні імітаційні моделі системи автоматичного керування в «Matlab/Simulink», за основу яких покладено нечіткий алгоритм розрахування затримки спрацювання пристрою РПН та закони автоматичного регулювання .

3. Обробка результатів моделювання визначила, що при застосуванні як базової системи автоматичного керування, так і розробленої нечіткої системи автоматичного керування пристрою РПН значення усталеного відхилення напруги задовольняють ГОСТ 13109-97 відносно показника якості. Проте, у випадку застосування системи автоматичного керування з адаптивним нечітким значенням величини затримки t , кількість спрацювань «зношеного» РПН виявилась на 19,4 відсотка меншою, що є перевагою.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз шкідливих та небезпечних факторів, заходи усунення

Перше, що забезпечує безпеку робіт в електроустановках це захисне заземлення.

Принцип дії – зниження до безпечних значень U доторкання і кроку, зумовлених замкненням на корпус та іншим. Це досягається шляхом зменшення опору заземлювача, а також шляхом вирівнювання потенціалів основи (місце де стоїть людина) та заземленого обладнання (підйом потенціалу основи до значення, близького до потенціалу обладнання).

Захисне заземлення проста та ефективна міра захисту від ураження струмом при виникненні U на металевих частинах.

Друге, що забезпечує безпеку робіт в установках - занулення.

Принцип дії - це перетворення замикання на корпус в однофазне КЗ з метою визвати найбільший струм, який забезпечить спрацювання захисту та автоматично від'єднати пошкоджену установку від мережі. До того ж заземлення корпусів через нуль знижує в аварійний період їх U відносно землі.

4.2 Розрахунок заземлення

1. Визначається норма на опір заземлення:

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

Згідно ПУЕ , так як сумарна потужність більш 100 кВА то опір повин бути не більше 4 Ом. Приймаємо $R_3 = 4 \text{ Ом}$.

2. Визначається питомий опір ґрунту:

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

де $\rho_{\text{табл}} = 250 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ - табличне

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

3. R одинарного вертикального заземлювача:

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

де l – довжина заземлювача, 5 м;

d – діаметр заземлювача (2,5 см).

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

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

Беруться електроди прокладені по замкнутому контуру згідно плану та визначається приблизна кількість заземлювачів:

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

де η_t – коефіцієнт використання ряду заземлювачів, $a/l = 0,8$,
 $\eta_t = 0,59$, $a = 4 \text{ м}$ – відстань між електродами.

4. Довжина горизонтальної з'єднувальної смуги:

$$l_1 = 1,05 \text{ м} = 1,05 \cdot 4 \cdot 9 = 37,8 \text{ м}$$

5. R смуги з урахуванням екранування:

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

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

6. Необхідний R вертикальних заземлювачів з урахуванням R з'єднувальної смуги:

$$R_{\text{тр}} = \frac{R_{\pi} R_3^{\text{н}}}{R_{\pi} - R_3^{\text{н}}} = \frac{24 \cdot 4}{24 - 4} = 4,8 \text{ Ом}$$

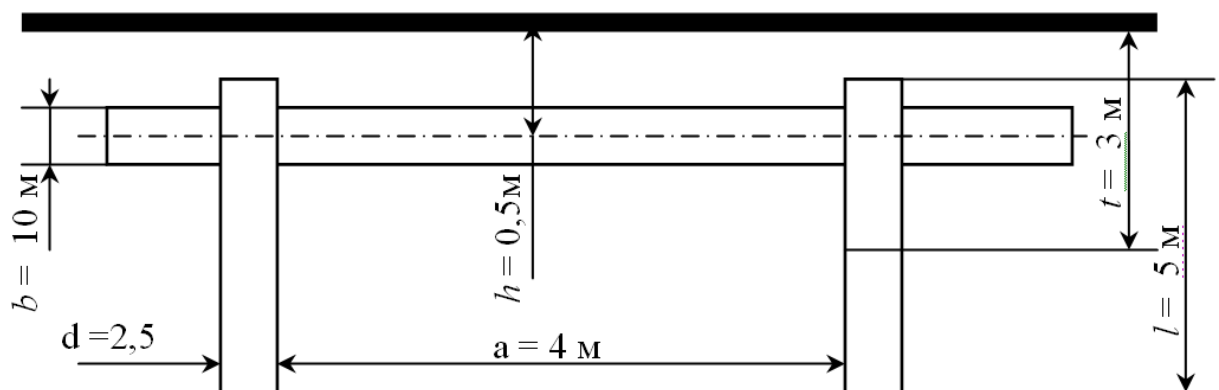


Рис. 4.1. Схема прокладки заземлення

7. Остаточна кількість заземлювачів:

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

8. Проводиться перевірка R заземлювача і порівнюється значення з нормативним:

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

Дійсний R заземлюючого пристрою не перевищує нормуючого значення.

РОЗДІЛ 5

РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ САК НАПРУГИ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

5.1 Розрахунок капітальних витрат на САК

Для запуску розробленої САК, необхідні матеріальні затрати, трудові та грошові ресурси. Сукупність витрат називається капітальними вкладеннями. Вони сумуються з вартості обладнання, витрат на підготовку, транспортних витрат та монтажних робіт.

Капіталовкладення на заміну САК розраховується за формулою:

$$K = K_{\text{обл}} + K_{\text{д}} + K_{\text{зб}}, \quad (5.1)$$

де $K_{\text{зб}}$ – вартість збирання схеми САК;
 $K_{\text{дод}}$ – вартість доставки елементів схеми;
 $K_{\text{обл}}$ – капіталовкладення на покупку обладнання;
 Результати капіталовкладень заносимо у таблицю 6.1.

5.2 Визначення річних витрат

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

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

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

В паспортних даних РПН вказано «Після кожних 5000 спрацювань треба перевіряти масло в баці на забруднення, а кожних 20000 - 25000 спрацювань - робити заміну». Контакти розраховані на 10-12 тис. спрацювань, а потім вони підлягають заміні.

Річні витрати пов'язані з обслуговуванням РПН трансформатора для випадку базової САК визначаються:

$$З_б = З_м + З_к + З_{\text{дод}}, \quad (5.3)$$

де $З_б$ – річні витрати на обслуговування РПН для базової САК;

$З_м$ – річні витрати заміна масла;

$З_к$ – річні витрати заміна контактів РПН;

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

Додаткові витрати: вартість експлуатаційних матеріалів, витрати на заробітну плату (ЗП) для робітників, та інші для утримання системи.

Основна та додаткова ЗП ремонтних робітників з вирахуваннями в соціальні фонди за формулою:

$$З_p = Q_p l_{\text{ср}} K_d \left(1 + \frac{H_{\text{соц}}}{100} \right) = 44 \cdot 28 \cdot 1,25 \cdot \left(1 + \frac{22}{100} \right) = 1878,8 \text{ грн}$$

де Q_p – річна трудомісткість робіт РПН для трансформатора;

$l_{\text{ср}}$ – середня годинна ставка робітників, грн./год. (28-35 грн.);

K_d – коефіцієнт додаткової ЗП, який враховує усі види грошових доплат. Може бути на рівні 1,25-1,35.

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

Вартість матеріалів для робіт може бути приблизно прийнята в розмірі 25% від $З_p$:

$$З_{\text{е.м}} = 0,25 \cdot З_p = 0,25 \cdot 1878,8 = 469,7 \text{ грн.}$$

Інші витрати на утримання системи прийняті в розмірі 20% від $З_p$:

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

Додаткові витрати на обслуговування РПН становлять:

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

Вартість заміни масла:

$$Z_m = m \cdot C_m = 150 \cdot 38 = 5700$$

де $m = 150$ л. – нормована кількість масла;

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

Масло замінюється 1 раз на 2 роки то витрати становлять:

$$Z_{\text{м.річ}} = \frac{Z_m}{2} = \frac{5700}{2} = 2850$$

Вартість заміни контактів :

$$Z_k = n_p C_p + n_{\text{нр}} C_{\text{нр}} = 6 \cdot 250 + 12 \cdot 120 = 2940$$

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

$n_{\text{нр}}$ – кількість нерухомих;

C_p – вартість рухомого контакта;

n_p – кількість рухомих.

Щорічні витрати на обслуговування РПН трансформатора:

$$Z_6 = Z_m + Z_k + Z_{\text{дод}} = 2850 + 2940 + 2714 = 8504$$

Проте розроблена система керування дозволяє зменшити кількість спрацювань РПН на 19,2%, тому впровадження дозволить зменшити витрати з обслуговування на 19,2% щороку. Тим самим, щорічні витрати на обслуговування РПН у випадку розробленої САК прирівнюється, грн:

$$Z_p = Z_6 \cdot \frac{100 - 19,4}{100} = 8503 \cdot \frac{100 - 19,4}{100} = 6853$$

5.3 Розрахунок показників економічної ефективності

Економічна ефективність САК РПН трансформатора визначається за такими показниками, як термін окупності, економічний ефект та приведені затрати.

Приведені витрати визначаються за формулою:

$$Z_i = E_n K_i + I_{o.i} \quad (5.4)$$

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

K_i – капіталовкладення в i -й варіант;

E_n – коефіцієнт ефективності капіталовкладень, 1/рік; приймається

$E_n = 0,12$;

Результати розрахунку показників ефективності САК режимами напруги РЕМ 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	6853
3	Приведені затрати	грн./рік	8503	7087
4	Економічний ефект	грн./рік	1416	
5	Термін окупності	роки	1,15	

Річний економічний ефект, грн/рік:

$$E = Z_{\text{б}} - Z_{\text{п}} = 8503 - 7087 = 1416$$

Термін окупності додаткових вкладень за рахунок зниження експлуатаційних витрат становить, років::

$$T_{\text{ок}} = \frac{\Delta K}{E} = \frac{1949}{1416} = 1,38$$

Висновки до розділу

В результаті техніко-економічного порівняння розробленої та базової системи автоматичного керування встановлено, що впровадження розробленої нечіткої САК напруги РЕМ - економічно обґрунтоване. Величина річного економічного ефекту складає 1416 грн., а період окупності становить 1,38 року.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Під час роботи завдяки одержаним теоретичним та практичним результатам вирішена актуальна задача автоматизації керування режимами напруги в РЕМ для досягнення підвищення надійності роботи за рахунок зменшення кількості перемикань РПН трансформатора без зниження якості напруги.

Виконані дослідження у магістерській роботі дозволяють сформулювати висновки:

1. Виконаний аналіз основних видів регулювання U показав, що більш досконалим і розповсюдженим в РЕМ - закон зустрічного регулювання. Реалізація закону автоматичного регулювання U дозволяє враховувати спади напруги у відхідних лініях і цим покращує якість U на затискачах споживачів.

2. Виконаний аналіз технічних засобів регулювання зміною коефіцієнта трансформації засвідчив, що найрозповсюдженішим засобом є механічний РПН трансформатора. Хоча, суттєвим недоліком даного пристрою є відносно низька надійність через зношуваність механічних контактів, які комутують номінальні струми.

3. Проведений аналіз існуючих пристроїв для автоматичного регулювання U трансформаторів з РПН показав, що всі девайси вирішують лише одну з головних задач - регулювання U або підвищують якість U на споживачах, через що збільшується кількість перемикань РПН або підвищують надійність постачання за рахунок зниження якості U . В останньому випадку несприятливими є режими, в яких існують суттєві відхилення напруги від номінальних значень, здебільшого що призводить до тривалого живлення користувачів напругою низької якості.

4. У результаті аналізу існуючих САК режимами U розподільної електричної мережі встановлено, що для зменшення кількості перемикачів РПН без суттєвого погіршення якості енергії на його затискачах треба передбачити в системі автоматичного керування адаптивну затримку сигналу перемикачів відгалуження РПН.

5. Дані дослідження показали, що на величину затримки перемикачів РПН повинна враховувати зношеність контактів пристрою. Для реалізації підходу доцільно враховувати значення параметрів, які надходять від системи моніторингу стану трансформатора.

6. У результаті дослідження з вибору математичного апарату, придатного для вирішення поставленої задачі автоматичного керування, встановлено, що для вирішення найскладнішої частини задачі, а саме визначення залежності затримки сигналу перемикачів РПН від параметрів, які надходять від системи моніторингу стану трансформатора, найдоцільніше використати математичний апарат нечіткої логіки.

7. На основі апарату нечіткої логіки було розроблено алгоритм роботи та модель блоку визначення затримки сигналу перемикачів РПН. В якості алгоритму нечіткого виводу найкраще застосувати алгоритм Мамдані. Вибір обумовлено тим, що алгоритм - найбільш простий для програмування, а також простий і володіє наочністю всіх його складових.

8. Для створення математичної моделі системи регулювання U було використано математичний апарат нечіткої логіки та метод передаточних функцій. Отримані математичні моделі використали в основі комп'ютерних імітаційних моделей розробленої системи автоматичного керування.

9. Для визначення ефекту від застосування нечіткої системи регулювання напруги в розподільній електричній мережі методом імітаційного моделювання було прораховано комп'ютерні імітаційні моделі системи автоматичного керування в «Matlab/Simulink», за основу яких покладено нечіткий алгоритм розрахування затримки спрацювання пристрою РПН та закони автоматичного регулювання .

10. Обробка результатів моделювання визначила, що при застосуванні як базової системи автоматичного керування, так і розробленої нечіткої системи автоматичного керування пристроя РПН значення усталеного відхилення напруги задовольняють ГОСТ 13109-97 відносно показника якості. Проте, у випадку застосування системи автоматичного керування з адаптивним нечітким значенням величини затримки t , кількість спрацювань «зношеного» РПН виявилась на 19,4 відсотка меншою, що є перевагою.

11. В результаті розрахунку захисного заземлення згідно з вихідними даними встановлено, що кількість заземлювачів, за якої опір не перевищує нормативний, дорівнює восьми.

12. В результаті техніко-економічного порівняння розробленої та базової системи автоматичного керування встановлено, що впровадження розробленої нечіткої САК напруги РЕМ - економічно обґрунтоване. Величина річного економічного ефекту складає 1416 грн., а період окупності становить 1,38 року.

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; Опубл. 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; Опубл. 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; Опубл. 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; Опубл. 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; Опубл. 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; Опубл. 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; Опубл. 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; Опубл. 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; Опубл. 30.07.88.

42. Айтжанов Н.М. Логический алгоритм автоматического регулирования напряжения // Джембульский технологический институт легкой и пищевой промышленности. – Джембул, 1984. – 7 с. Деп. в ИНФОРМЭНЕРГО 13.08.84 г., №1570эн-84.

43. Пат. 81573 СРР, МКИ Н 02 Р 13/04, G 05 F 1/14. Instalatie automată pentru reglajul tensiunii transformatoarelor electrice: Пат. 81573 СРР, МКИ Н 02 Р 13/04, G 05 F 1/14 / Cernomazu Dorel, Cernomazu Ion; Intreprinderes de Retele Electrice, Bacău. – № 105419; Заявл. 29.09.81; Опубл. 30.04.83.

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

45. Petri Kornel, Kisyölcey Jenő Mikroprocesszoros transzformátorszabályozó és feszültségátároló automatika // Elektrotechnica (Magy.). – 1988. – 81, №10–11. – P. 405–410.

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

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

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

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

50. Дмитренко А.И., Красов А.И., Пироженко А.Н. и др. Применение тиристоров в переключающих устройствах трансформаторов общего

назначения // НТС, ЭП. Сер. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы. – 1974. – №9/14. – С. 15–17.

51. Устройство для регулирования переменного напряжения: А.с. 1257747 СССР, МКИ Н 02 J 3/18 / А.И. Дорошенко, В.А. Николаенко, Ю.И. Елумахов (СССР). - № 3848458/24-07; Заявлено 24.01.85; Оpubл. 1986, Бюл. №34.

52. Устройство для переключения ответвлений силового трансформатора: А.с. 599326 СССР, МКИ Н 02 Р 13/06, Н 03 К 17/56 / В.П. Дудин, А.Н. Пироженко (СССР). – №2376889/24-07; Заявл. 24.06.76; Оpubл. 25.03.78, Бюл. №11.

53. Мощные полупроводниковые приборы. Тиристоры: Справочник / В.Я. Замятин, Б.В. Кондратьев, В.М. Петухов.–М.: Радио и связь, 1988.–576 с.

54. Скаржепа В.А., Морозов А.А. Устройства автоматики на тиристорах.– К.: Техника, 1974. – 224 с.

55. Гельман М.В., Лохов С.П. Тиристорные регуляторы переменного напряжения.– М.: Энергия, 1975. – 105 с.