

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

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛІШКОВ
“ ____ ” _____2023р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ

ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

“СИНТЕЗ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ СИЛОВИМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ З ПОЗДОВЖНЬО-ПОПЕРЕЧНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ НАПРУГИ”

Виконала здобувач вищої освіти
II курсу магістратури, групи ЕЕ-22М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Анна ВЕЛИЧКО

« ____ » _____2023 р.

Керівник роботи професор, к.т.н.

_____Петро ПЛІШКОВ

« ____ » _____2023 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електротехнічні системи електроспоживання»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

_____ Петро ПЛІШКОВ

«_____» _____ 20__ р.

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

Величко Анни Василівни

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) **Синтез структури системи автоматичного керування силовими трансформаторами з поздовжньо-поперечним регулюванням напруги**

Synthesis of the structure of the automatic control system for power transformers with longitudinal-transverse voltage regulation

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

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту **25.12.2023 р.**

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) _____

Вступ; Технічні засоби здійснення поздовжньо-поперечного регулювання напруги; Синтез структури системи автоматичного поздовжньо-поперечного регулювання напруги; Комп'ютерне моделювання роботи системи регулювання напруги; Реалізація системи автоматичного керування трансформаторами за допомогою мікропроцесорної техніки; Техніко-економічне обґрунтування системи; Охорона праці; Висновки.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	10.10.23	
2	<i>Технічні засоби здійснення поздовжньо-поперечного регулювання напруги</i>	16.10.23	
3	<i>Синтез структури системи автоматичного поздовжньо-поперечного регулювання напруги</i>	24.10.23	
4	<i>Комп'ютерне моделювання роботи системи регулювання напруги</i>	7.11.23	
5	<i>Реалізація системи автоматичного керування трансформаторами за допомогою мікропроцесорної техніки</i>	14.11.23	
6	<i>Техніко-економічне обґрунтування системи</i>	18.11.23	
7	<i>Охорона праці</i>	01.12.23	
8	<i>Висновки</i>	10.12.23	
9	<i>Оформлення пояснювальної записки ВКР</i>	22.12.23	
10	<i>Оформлення презентаційної частини ВКР</i>	25.12.23	

Дата видачі завдання
Підпис керівника _____

«____» _____ 2023 р.
Петро ПЛЕСКОВ

Завдання прийнято до виконання
Підпис здобувача _____

«____» _____ 2023 р.
Анна ВЕЛИЧКО

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 118 с.; 50 рис.; 2 табл.; 10 джерел.

Величко А.В. Синтез структури системи автоматичного керування силовими трансформаторами з поздовжньо-поперечним регулюванням напруги. – Рукопис.

Магістерська робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2023 рік.

Об'єктом досліджень є трансформатор поперечного регулювання (ТПР) у вигляді лінійного вольтододаточного трансформатора (ВДТ).

Предмет досліджень – функціонування системи автоматичного керування трансформаторами з поздовжньо-поперечним регулюванням напруги.

Мета дослідження полягає в розробці електротехнічних комплексів, зокрема з мікропроцесорними системами керування, для регулювання напруги та одночасного забезпечення задовільного режиму системи електропостачання по реактивній потужності.

У кваліфікаційній роботі проведено дослідження існуючих методів та засобів поздовжнього та поздовжньо-поперечного регулювання напруги. Вирішена задача створення системи автоматичного керування трансформаторами з поздовжньо-поперечним регулюванням напруги на основі використання напруги, активної та реактивної потужності як основних параметрів регулювання.

Побудована модель автоматичного регулятора напруги, яка дозволяє отримувати параметри налагодження регулятора. Крім того, було розроблено програмне забезпечення для мікропроцесорного контролера з метою виконання функцій регулятора системи автоматичного керування.

Ключові слова: системи керування, трансформатор поперечного регулювання, компенсація реактивної потужності, регулювання під навантаженням, програмне забезпечення регулювання напруги.

ABSTRACT

Qualification work: 118 p.; 50 pictures; 2 tables; 10 sources.

Velichko A.V. Synthesis of the structure of the system of automatic control of power transformers with longitudinal and transverse voltage regulation. - Manuscript.

Master's thesis on specialty 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics", OPP "Electrotechnical systems of electricity consumption". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2023.

The object of research is a transversal regulation transformer (TPR) in the form of a linear step-up transformer (VDT).

The subject of research is the functioning of the system of automatic control of transformers with longitudinal and transverse voltage regulation.

The purpose of the research is the development of electrical engineering complexes, in particular with microprocessor control systems, to regulate the voltage and simultaneously ensure a satisfactory mode of the power supply system in terms of reactive power.

In the qualification work, a study of existing methods and means of longitudinal and longitudinal-transverse voltage regulation was carried out. The task of creating a system of automatic control of transformers with longitudinal and transverse voltage regulation based on the use of voltage, active and reactive power as the main parameters of regulation has been solved.

A model of an automatic voltage regulator has been built, which allows you to obtain regulator tuning parameters. In addition, software was developed for the microprocessor controller to perform the functions of the controller of the automatic control system.

Key words: control systems, transversal regulation transformer, reactive power compensation, load regulation, voltage regulation software.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ЗДІЙСНЕННЯ ПОЗДОВЖНЬО-ПОПЕРЕЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ.....	10
1.1. Регулювання напруги з використанням вольтодобавочних трансформаторів.	10
1.2. Поздовжньо-поперечне регулювання напруги в системах електропостачання з контролем технічного та економічного ефекту.	19
1.3. Регулювання напруги в системах електропостачання з компенсацією реактивної потужності.	25
1.4. Поздовжньо-поперечне регулювання напруги в замкнених мережах систем електропостачання	31
2 СИНТЕЗ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО ПОЗДОВЖНЬО-ПОПЕРЕЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ....	35
2.1. Вплив поперечного регулювання напруги на режими мереж	35
2.2. Розробка закону поздовжньо-поперечного регулювання напруги.	38
2.3. Вибір математичного апарату для вирішення задачі поздовжньо-поперечного регулювання.	43
2.4. Синтез структури системи автоматичного керування трансформаторами з поздовжньо-поперечним регулюванням напруги.	45
2.5. Реалізація синтезованої структури системи автоматичного керування трансформаторами з поздовжньо-поперечним регулюванням напруги.....	50
3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ.....	71
4 РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРАМИ ЗА ДОПОМОГОЮ МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ ТЕХНІКИ.....	83

4.1.	Мікропроцесорний регулятор напруги для поздовжньо-поперечного регулювання.....	83
4.2.	Розробка програмного забезпечення мікропроцесорного регулятора для системи поздовжньо-поперечного напруги.....	85
4.3.	Оцінка похибок вимірювальних каналів мікропроцесорного регулятора в системі поздовжньо-поперечного регулювання напруги.....	88
5	ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ.....	101
6	ОХОРОНА ПРАЦІ.....	109
6.1.	Основні законодавчі акти про охорону праці.	109
6.2.	Пристрої заземлення. Вимоги та конструктивне виконання.....	110
6.3.	Розрахунок заземлення.	112
6.4.	Вимоги до виробничих територій, приміщень і приладів.....	114
	ВИСНОВКИ.....	116
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	117

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БК – батарея конденсаторів

БПСП – блок перетворення імпульсного сигналу в потенційний

БФЗН – блок формування зони нечутливості

БФУ – блок формування уставки

ВДТ – вольтододатковий трансформатор

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ВН – обмотка високої напруги (первинна обмотка понижуючого трансформатора)

ГТІ – генератор тактових імпульсів

ДРП – джерело реактивної потужності

ЕРС – електрорушійна сила

ЛЕП – лінія електропередачі

НН – обмотка низької напруги (вторинна обмотка понижуючого трансформатора)

ПБЗ – перемикання без збудження

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференційний (закон регулювання)

ПС – перетворювач струму (нормуючий)

РПН – регулювання під навантаженням

ТН – трансформатор напруги

ТС – трансформатор струму

ТПР – трансформатор поперечного регулювання

ФСРНН – формувач сигналів рівня напруги на навантаженні

ВСТУП

В сучасних умовах електроенергію розглядають як об'єкт споживання та торгівлі, і вона повинна відповідати встановленим стандартам якості. Для надання послуг з електропостачання важливо утримувати відхилення, несиметрію, несинусоїдальність напруги, частоту та інші показники на визначеному рівні за допомогою спеціальних технічних засобів. Електроенергія є унікальним товаром, який споживається миттєво після виробництва через значну протяжність ліній передачі від електростанцій до споживачів і багатоетапної трансформації.

Збереження стандартів якості електроенергії набуває особливого значення на вводах споживачів, а не лише на електростанціях, через велику відстань між ними. Вирішення цієї задачі є ключовим завданням на рівні розподільчих мереж. Багато великих споживачів вимагають надійного утримання напруги на їхніх вводах, оскільки інші критерії, такі як форма та частота напруги, суттєво впливають на втрати енергії в лініях передачі та обладнанні підстанцій, і відповідно, на зменшення цих втрат, що цікавить електропостачальні організації.

Існує декілька типів систем автоматичного регулювання напруги, які відрізняються методами введення регулюючого впливу. Проте більшість розроблених систем спрямовані на регулювання за відхиленням, не враховуючи причин відхилення напруги від номінального значення. Комплексне вирішення питання регулювання напруги, яке охоплює відхилення та різноманітні збурення, сприятиме підвищенню надійності як електропостачання, так і обладнання розподільчих мереж та підстанцій.

Основним збуренням, яке призводить до відхилень напруги в розподільчих мережах та на вводах споживачів, є зміна режиму вузла електропостачання за потужністю (активною, реактивною, повною). Отже, для ефективного регулювання напруги необхідно впроваджувати регулюючі

заходи, змінюючи режим поточкорозподілу потужності через підстанцію, тим самим запобігаючи відхиленню напруги в кінці лінії.

Зазначене наперед значення споживаної реактивної потужності споживачів дозволить розрахувати потужність компенсаційних пристроїв або інших джерел реактивної потужності, необхідних для вирішення завдання комплексного регулювання напруги.

Основними засобами регулювання напруги у розподільчих мережах є силові трансформатори, обладнані пристроями регулювання під навантаженням (РПН) із обмеженим ресурсом кількості перемикачів. Механічні контакти пристрою РПН силового трансформатора мають обмежений ресурс, оскільки вони використовуються для комутації робочих струмів.

Процес підтримки напруги в вузлових точках електричної системи визначається заданими межами з метою забезпечення технічно допустимих умов як для роботи споживачів електричної енергії, так і для ефективної функціонування системи, а також для можливості підвищення економічності їхньої роботи. Більшість споживачів електроенергії припускають тривалі відхилення напруги від номінального значення лише на $\pm 5\%$. Надмірна напруга може призвести до скорочення терміну служби споживачів електроенергії, а зменшення - знижує продуктивність та економічність їх роботи, впливає на пропускну здатність ліній передачі електроенергії і може погіршити стійкість синхронних машин та асинхронних двигунів.

Автоматичне регулювання напруги стає необхідним внаслідок змінних режимів функціонування споживачів та джерел електроенергії. При збільшенні навантаження сила струму у мережі зростає, що призводить до втрат напруги в різних її ділянках, що, в свою чергу, може виводити напругу у споживачів за межі допустимих значень. У зв'язку з цим на шинах електростанцій і на шинах вторинної напруги районних підстанцій застосовується зустрічне (згідне) регулювання, при якому при збільшенні навантажень напруга підтримується вище за номінальне значення, а при

зниженні навантажень — знижується. Це призводить до зменшення розмаху відхилень напруги у споживачів. Однак такий підхід виключає необхідність використання АРН для кожного окремого споживача.

Отже, розробка електротехнічних комплексів, зокрема з мікропроцесорними системами керування, для регулювання напруги та одночасного забезпечення задовільного режиму системи електропостачання по реактивній потужності є актуальною з технічного погляду. Це забезпечить гнучкість у вирішенні завдань і водночас має економічну важливість через фокус на зменшенні втрат електроенергії та поліпшенні її якості.

1. ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ЗДІЙСНЕННЯ ПОЗДОВЖНЬО-ПОПЕРЕЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ

1.1. Регулювання напруги з використанням вольтодобавочних трансформаторів.

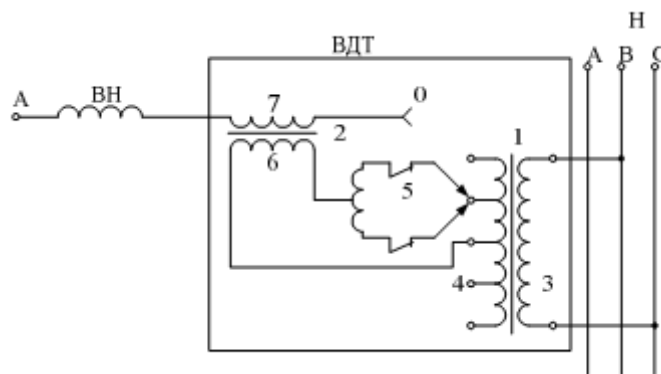
Використання вольтододаткових трансформаторів для регулювання напруги представляє собою ефективний метод управління електричною системою. Ця техніка дозволяє точно регулювати напругу в різних частинах системи, забезпечуючи необхідний рівень стабільності та ефективності. Вольтододаткові трансформатори можуть бути ключовим елементом для оптимізації напругового режиму та забезпечення якості електропостачання в мережі.

Основним засобом контролю за напругою в розподільчих мережах систем електропостачання є трансформатори районних підстанцій, оскільки вони можуть відповідати вимогам до напруги, яка потрібна близьким і віддаленим споживачам.

Трансформатори можуть бути підключені до різних точок електричних мереж, де рівень напруги заздалегідь, як правило, невідомий і може змінюватися протягом експлуатації мережі. Тому трансформатори, окрім основних, також мають регульовальні гілки. Змінюючи ці гілки, можна дещо змінити коефіцієнт трансформації (в межах 10—20%). Зазвичай регульовальні гілки розташовані на стороні високої напруги ВН трансформатора, яка має менший робочий струм, що спрощує пристрій перемикачів.

Додатковим засобом контролю за напругою є використання вольтододаткових трансформаторів (ВДТ). Використання таких трансформаторів дозволяє вводити додаткові поздовжні, поперечні або поздовжньо-поперечні електричні збурення до вектора напруги мережі, координуючи не лише рівень напруги, а й розподіл потужності в замкнутих мережах систем електропостачання.

Трансформатор поперечного регулювання (ТПР) виготовлений у вигляді лінійного вольтододаточного трансформатора (ВДТ), де електрична реактивність вторинної обмотки зміщена відносно електричної реактивності основного трансформатора на 90° . Схема ТПР наведена на рис. 1.1



Трансформатор поперечного регулювання (ТПР) - це трансформатор, який складається з трансформатора живлення 1 та послідовного трансформатора 2. Первинна обмотка живильного трансформатора 3 живиться від двох фаз обмотки НН основного трансформатора. Вторинна обмотка живильного трансформатора розділена на секції і підключена до першого виводу первинної обмотки послідовного трансформатора через пристрій РПН 5. Другий вивід первинної обмотки послідовного трансформатора з'єднаний з середньою точкою вторинної обмотки живильного трансформатора 4. Вторинна обмотка послідовного трансформатора 7 послідовно включена в нейтраль обмотки ВН основного трансформатора. Перемикання пристрою РПН відбувається в тому ж

порядку, що і в пристроях РПН основного трансформатора [20]. ТПР застосовується для регулювання розподілу активної потужності в мережах з трансформаторними зв'язками.

Проект пристрою для регулювання змінної напруги за допомогою вольтододаткових трансформаторів (ВДТ) був представлений у джерелі [7]. Цей пристрій включає два однофазних ВДТ, з'єднаних послідовно, та три керовані елементи. Перший керований елемент подає напругу на первинну обмотку першого трансформатора вздовж сигнального потоку. Другий елемент, який увімкнений послідовно з дроселем, коротко замикати первинну обмотку першого трансформатора. Третій керований елемент виконаний у вигляді моста із чотирьох керованих ключів. Застосування цього пристрою в системах електропостачання обмежується ускладненням комутаційних елементів на високому напрузі та присутністю вищих гармонік, що виникають внаслідок комутації ключів у схемі випрямлення з двома напівперіодами. Використання ВДТ також може підвищити надійність систем регулювання напруги [7]. Функціональна схема підстанції з використанням ВДТ подана на рисунку 1.2. Схема підстанції, представлена на рисунку 1.6, включає основний трансформатор 1 з обмотками високої та низької напруги 2 і 3 відповідно, ВДТ 5 з обмоткою низької напруги 4 та високої напруги 6, вимикачі 9 та 10.

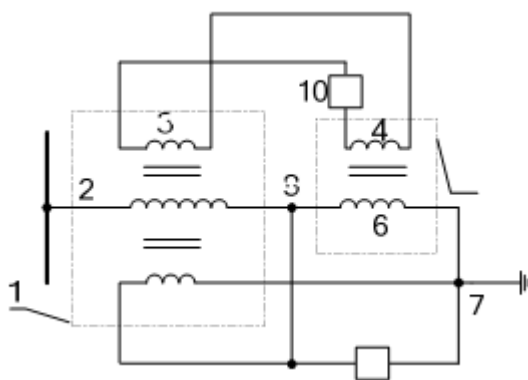


Рис. 1.2. Функціональна схема підстанції з застосуванням ВДТ для одноступеневого регулювання напруги

Обмотка 6 ВДТ розташована між землею 7 та нульовою точкою 8 основного трансформатора 1. У разі необхідності зміни напруги на шинах підстанції, зміни коефіцієнта трансформації (наприклад, його збільшення), вимикають вимикач 10 і з невеликою затримкою вмикають вимикач 9. При цьому трансформатор 5 працюватиме короткочасно (0,1-0,3 с) в області насичення, опір обмотки ВН ВДТ різко зменшиться, і напруга на ній складе 1,3 – 1,5 від номінального значення. В такий момент ВДТ виключається зі схеми, а напруга на шинах високої напруги ПС збільшиться (при постійній напрузі на шинах середньої напруги). Сполучення ВДТ з основним трансформатором дозволяє уникнути непотрібних перемикачів пристроїв РПН, однак розглянутий в [2] пристрій не забезпечує управління ВДТ у функції керування потоком потужності, а також має низьку точність регулювання напруги.

Врахування потужності навантаження у пристроях для регулювання напруги з використанням силового трансформатора з РПН призводить до покращення якості регулювання напруги. Сам пристрій включає в себе три диференціюючі блоки (1-3), три тригери (4-6), елементи І та АБО (7-8), блок регулювання напруги під навантаженням (9), знакоаналізуючий блок (10), фазовимірювальний блок (11), телеканали зв'язку (12), блок ділення (13), формувач дозволяючого сигналу (14), трансформатор вузла навантаження (15) і лічильник напруги (16) (див. рис. 1.3). Перемикач відгалужень трансформатора (15) проводиться блоком регулювання напруги під навантаженням (9) з врахуванням мінімуму втрат активної потужності, що залежить від коефіцієнта завантаження двигунів у складі вузла навантаження, за допомогою блоку ділення (13). При цьому забезпечується контроль стійкості системи живлення за допомогою диференціюючого блоку (1), який отримує інформацію від фазовимірювального блоку (11) через телеканали зв'язку (12). Той самий блок впливає на вхід блоку регулювання напруги (9) залежно від значення параметра, виміряного блоком (11). У викладеному методі регулювання напруги, хоча враховується залежність

перетоку активної потужності від величини напруги, відсутній ефективний регулюючий вплив системи на перетікання як активної, так і реактивної потужності, оскільки регулюється лише коефіцієнт трансформації силового трансформатора.

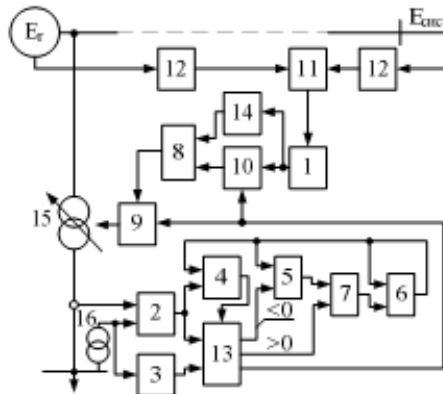


Рисунок 1.3 - Функціональна схема пристрою для регулювання напруги електричного вузла з двигунним навантаженням

Запропонований адаптивний пристрій для регулювання напруги проводить пошук оптимального відношення між зоною нечутливості та витримкою часу для проведення перемикачів. У процесі пошуку оптимальних параметрів регулювання здійснюється направлений перебір різних комбінацій витримок часу і зони нечутливості (в межах заданих значень). Це реалізує пошук оптимального регулювання напруги шляхом переходу від повного перебору всіх допустимих комбінацій витримки часу і зони нечутливості до направленого перебору з контролем середньоквадратичного відхилення напруги.

Зазначений пристрій значно покращує якість регулювання напруги. Проте він призначений для застосування на тягових підстанціях залізничного транспорту і не враховує струм навантаження споживачів. Це виключає можливість застосування зустрічного регулювання напруги. Крім того, в алгоритмі розглянутого пристрою вводяться обмеження на проведення перемикачів при перевищенні певної кількості перемикачів за добу.

Широко відоме використання ВДТ для вирішення завдань фазового регулювання напруги та досягнення симетризації напруги. Для реалізації цього методу розроблено пристрій, який включає в себе ВДТ з первинною обмоткою, організованою за схемою "зустрічний зигзаг". Система керується пристроєм, що вимірює фазні значення напруги в лінії за допомогою АЦП. Шляхом комутації схем включення первинної та вторинної обмоток проводиться регулювання та симетризація напруги в лінії.

Недоліками такого методу регулювання напруги є відсутність зворотніх зв'язків за потужністю, високі витрати та складна у виготовленні конструкція первинної обмотки ВДТ.

Відомий пристрій для регулювання напруги відрізняється тим, що перемикання відгалужень для підвищення напруги в узлах навантаження проводиться не одночасно, а зі зсувом в часі. При цьому величина зсуву дорівнює часу перехідного процесу зміни потужності при відхиленні напруги. Однак важливо відзначити, що розглянутий пристрій не включає канал для вимірювання реактивної потужності та не враховує втрати потужності в лінії електропередач.

Пристрій із фазовимірювальним блоком для визначення кута навантаження та введенням в закон регулювання приростом визначеного кута був розроблений, проте його структура не дозволяє безпосередньо керувати перетоком потужності та впливати на коефіцієнт потужності. Також існують відомі пристрої, які використовуються для стабілізації змінної напруги і можуть застосовуватися в міських мережах електропостачання. Вони мають виконавчий елемент у вигляді ВДТ. Схема пристрою показана на рис. 1.4. На схемі: 1 – ВДТ з вторинною та первинною 2,3 обмотками; 4, 26 – перший і другий тиристорні ключі; 6, 14 – перший і другий синхронізуючі трансформатори; 7, 16, 24, 25 – це тиристори, 8, 17 – позначення захисних діодів, 10, 19 – позначення захисних резисторів, 12, 21 – позначення обмежуючих діодів, 15, 23 – позначення струмообмежуючих

резисторів, 27 – на схемі блок управління, 28 – первинна обмотка 2-го синхронізуючого трансформатора.

При значенні напруги, що перевищує заданий рівень, ключ 4 перебуває у відкритому стані, а ключ 26 - у закритому. У цьому режимі вхідна напруга подається на первинну обмотку ВДТ 1, що забезпечує вольтовіднімання. У випадку, якщо напруга стає менше заданої, тиристорівський ключ 4 переходить в закритий стан, і первинна обмотка ВДТ 3 шунтується за допомогою ключа 26. Керування цим ключем відбувається за допомогою блока управління 27.

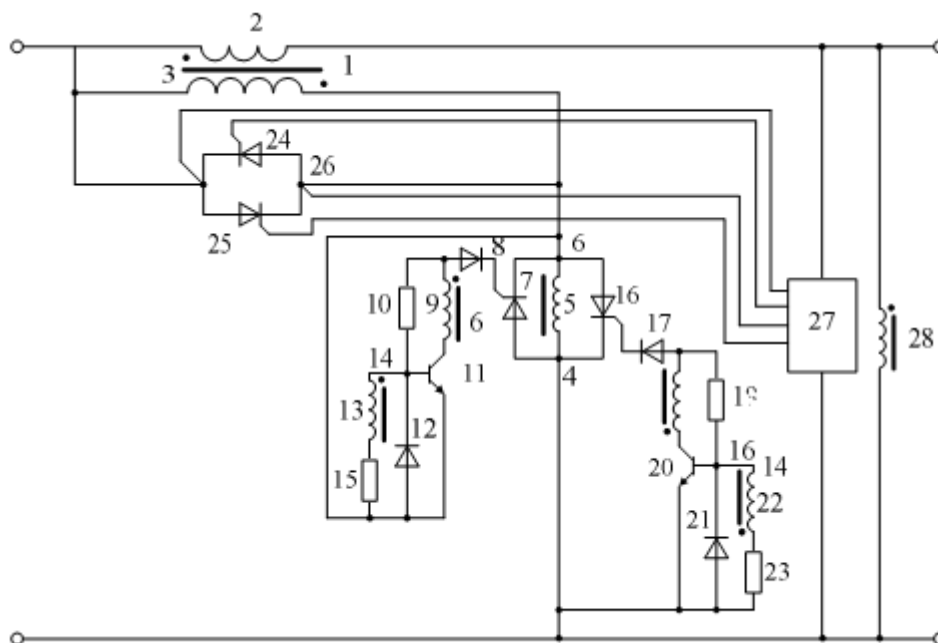


Рисунок 1.4 - Функціональна схема стабілізатора змінної напруги

Якщо напруга на виході пристрою знаходиться у межах між номінальним та максимально допустимим значеннями, тиристири ключа 26 вмикаються по чергово з кутом відкриття, залежним від величини відхилення напруги від номінального значення. У цьому випадку форма напруги має сходинково-синусоїдальну форму, і основний недолік розглянутого пристрою полягає в тому, що він стає джерелом вищих гармонік, які безпосередньо трансформуються в мережу.

Пристрій, розглянутий тут, відрізняється від описаного розташуванням ключів, які керують комутацією первинної обмотки ВДТ. Ключ, відповідальний за вмикання ВДТ на вольтовіднімання і увімкнений послідовно з первинною обмоткою, активується через блок управління. Також є ключ, який шунтує первинну обмотку ВДТ і вмикається через схему з синхронізуючими трансформаторами, ідентичну тій, що зображена на рис. 1.4.

Спосіб амплітудно-фазового регулювання напруги запропонований в даному пристрої. При невеликих відхиленнях напруги відбувається фазове управління напругою, тобто фаза вихідної напруги інвертора змінюється в порівнянні з напругою мережі за сигналом від системи керування. Вихідна напруга інвертора, зменшуючись в ВДТ, накладається на напругу мережі і збільшує напругу на виході стабілізатора до необхідного рівня.

Цей пристрій не включає в себе канал вимірювання струму навантаження, тому не може забезпечити зустрічного регулювання напруги. Аналогічний метод автоматичної компенсації відхилень напруги реалізовано в пристрої, що відрізняється наявністю двох інверторів і додаткового блоку нелінійності з переналаджуваною передаточною функцією, який коректує роботу системи керування інверторами.

Останній спосіб адаптований для використання в мережах з напругою до 10 кВ, з включенням ВДТ в нейтраль обмотки ВН силового трансформатора. На рис. 1.5 представлена схема пристрою. Система регулювання включена між мережею (1) і навантаженням (2). Основні компоненти цієї системи включають головний трансформатор (3) з первинною (4) і вторинною (5) обмотками, ВДТ (6) з первинною (7) і вторинною (8) обмотками, тиристорний перетворювач (9) з ланкою постійної напруги, що складається з двох трифазних інверторів напруги (10 і 11) та загальної системи керування (12), реверсивний випрямляч (13) з системою керування (14), фільтр (15), а також датчик напруги навантаження (16),

датчик напруги мережі (17), перемикач (18) та регульований блок нелінійності (19).

В роботі пристрою в даній системі основні принципи залишаються такими ж. Проте пристрій для стабілізації напруги, який пропонується, має два рівні заданої напруги та відмінне розташування вольтододаткового агрегату – не в нейтралі, а в розриві фази обмотки ВН головного трансформатора.

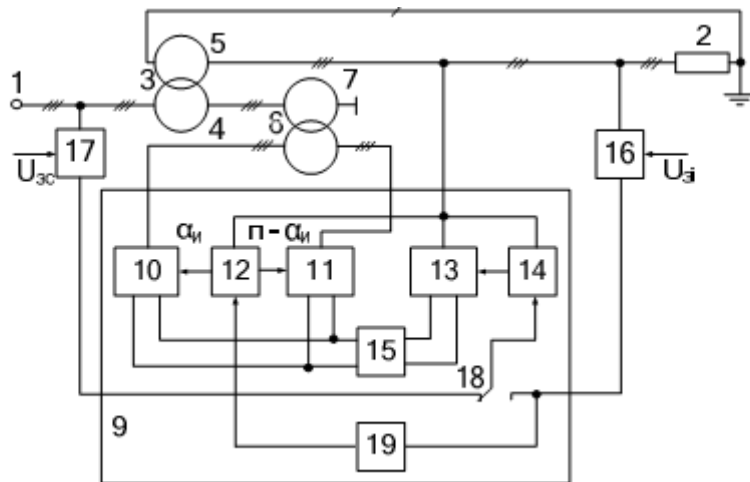


Рисунок 1.5 - Функціональна схема пристрою для стабілізації напруги з амплітудно-імпульсним регулюванням

Пристрій, споруджений на подібному принципі, додатково включає канал вимірювання реактивної потужності. Залежно від цього каналу, реалізується поперечне регулювання напруги за допомогою одного ВДТ, а також окремий канал для вимірювання напруги на навантаженні, за допомогою якого здійснюється поздовжнє регулювання напруги іншим ВДТ. Схема пристрою наведена на рис. 1.6. У пристрої є виводи 1 і 2, трифазні ВДТ 3 і 4, батарея конденсаторів 5, перший інвертор напруги 6 з системою управління 7, яка виконана за 180-градусним алгоритмом із широтно-імпульсним регулюванням поперечної складової вольтодобавки. Також присутній другий інвертор напруги 8 з системою управління 9, реалізованою за 180-градусним алгоритмом з широтно-імпульсним регулюванням

поздовжньої складової вольтодобавки. До складу пристрою також входить блок синхронізації 10, рекуперативний випрямляч 11 з керованим вентильним блоком 12, вхідний автомат 13 і вихідний індуктивно-ємнісний фільтр 14, датчик реактивної потужності мережі 15, датчик відхилення напруги навантаження 16, перемикач 17 та таймер 18.

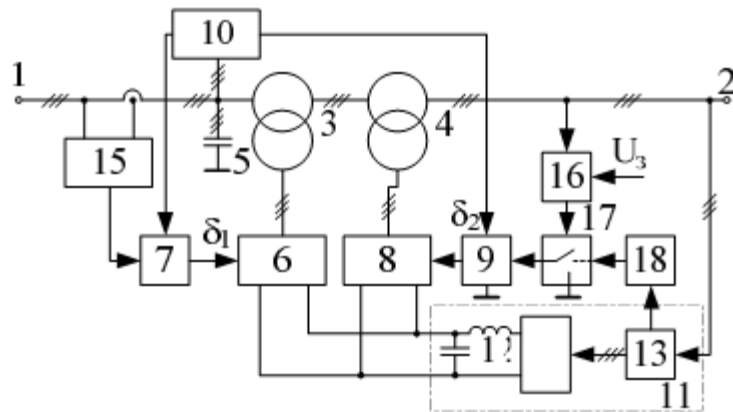


Рисунок 1.6 - Функціональна схема трансформаторно-тиристорного компенсатора відхилень напруги

Недоліком розглянутого пристрою є значна кількість використаних тиристорів (в мостовій схемі випрямляча та двох інверторах), що виявляється ускладнюючим фактором для системи регулювання. Це призводить до утворення вищих гармонік та збільшує вартість пристрою, особливо при його застосуванні на розподільчих мережах великої потужності.

1.2. Поздовжньо-поперечне регулювання напруги в системах електропостачання з контролем технічного та економічного ефекту

Викладений метод управління електропередачею включає в себе використання вольтододаткового автотрансформатора. Функціональна схема цього пристрою зображена на рис. 1.7. Схема включає автотрансформатор зв'язку 1, лінійний трансформатор (ЛТ) 2 з його обмотками збудження 4 та вторинною 3, перемикач відгалужень автотрансформатора 5, додаткові

перемикачі 6-9, шину відправного кінця повітряної ЛЕП 10, повітряну лінію 11, шину приймального кінця повітряної ЛЕП 12, перемикальний пристрій РПН 13, регулятор напруги повітряної лінії 14, датчик напруги 15, датчик величини перетікання потужності 16, канал телекерування 17.

В даному пристрої для зміни напруги ЛЕП, що генерується відповідно до параметрів її навантаження, використовується регулювальний діапазон РПН автотрансформаторів для налаштування збудження ЛТ. Зміна збудження ЛТ здійснюється перемиканням відгалужень регулювальної обмотки РПН трансформаторів. Регулювальний діапазон РПН використовується двічі: під час зміни коефіцієнта трансформації автотрансформатора і в процесі налаштування збудження ЛТ.

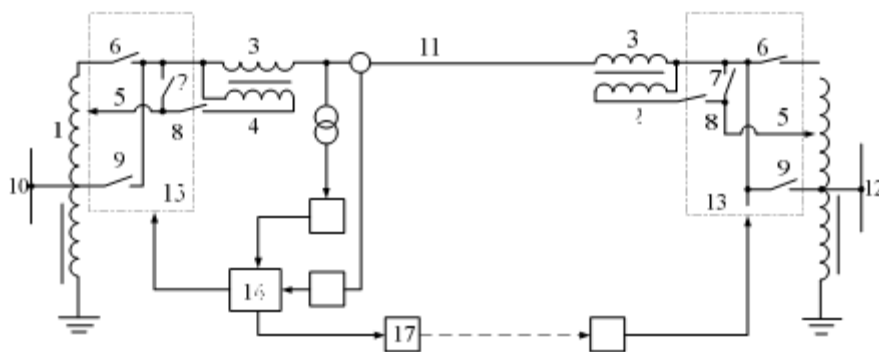


Рисунок 1.7 - Функціональна схема пристрою для управління режимом електропередачі

Недолік розглянутого пристрою полягає у відсутності обмежень на проведення перемикання пристроїв РПН вольтододаatkового автотрансформатора, що може спричинити їх прискорений знос. Метод регулювання напруги, який включає один трансформатор ведений і два ведучі для поліпшення точності регулювання напруги на шинах трансформаторної підстанції, описаний в [4]. Пристрій, що реалізує цей метод, крім звичайного регулятора, включає елемент контролю початку і

завершення циклу перемикання ведучого трансформатора та блоки управління ведених.

Впровадження такого пристрою вимагає додаткових витрат на ведені трансформатори, які мають більше відгалужень і, відповідно, менший інтервал між встановленими рівнями напруги на вторинних обмотках. У методі регулювання напруги в лініях електропередачі умовою проведення перемикання пристроєм РПН силового трансформатора є відношення приросту втрат потужності на корону до втрат потужності в проводах. Втрати потужності на корону визначаються добутком сигналу від датчика напруги на встановлений коефіцієнт, це характеризує швидкість зміни втрат потужності на корону від напруги лінії, а втрати потужності в проводах лінії обчислюються в блоковому множенні як добуток збільшеного в шестеро опору фази лінії, з урахуванням сигналу від датчика температури та квадрату сигналу датчика струму.

У випадку, коли сигнал, отриманий в блоковому дільнику та пороговому блоку для визначення відношення втрат потужності в проводах до втрат потужності на корону, перевищує одиницю, формується сигнал для підвищення напруги за допомогою одного формувача, а якщо менший за одиницю, то застосовується інший формувач для зниження напруги. У розглянутому пристрої управління формується в пороговому блоку, який має уставку спрацьовування за величиною втрат активної потужності, а не напруги та струму. Це суттєво знижує точність регулювання напруги, а також відсутні обмеження на формування вихідних сигналів під час короткочасних відхилень напруги чи струму навантаження. Описаний пристрій для регулювання напруги включає два канали з різною затримкою сигналу для проведення перемикання пристроєм РПН, що сприяє підвищенню надійності системи регулювання напруги в цілому.

При зміні напруги на шинах підстанції від навантаження регулятор проводить перемикання відгалуження трансформатора з затримкою часу t_1 . У випадку, коли відхилення напруги виявляється з боку мережі, перемикання

відбудеться із затримкою в t_2 , яка менше за t_1 . Розглянутий пристрій не має ланцюгів управління перетоком реактивної потужності, і при компенсації відхилень напруги, викликаних зміною перетоку потужності, діапазон регулювання обмежений. Спосіб регулювання напруги в лінії електропередачі, що розроблений, передбачає визначення балансу втрат потужності в проводах до і після проведення перемикання. За допомогою вказаного способу визначаються баланси втрат потужності в лінії до і після кожного зменшення або збільшення напруги. З отриманих балансів втрат обчислюється фактичний активний опір лінії, а втрати в лінії для режиму після зміни напруги визначаються по обчисленому фактичному активному опору лінії. В блоках пам'яті пристрою, який реалізує цей спосіб, зберігаються значення постійних коефіцієнтів пропорційності, які характеризують зміну втрат потужності на нагрів і коронних втрат при зміні напруги на n %, відповідно до одного ступеня регулювання регулюючого пристрою. Застосування такого пристрою обмежене і використовується лише для повітряних ліній електропередач.

Була розроблена структура системи автоматичного регулювання напруги, яка враховує чутливість до збитків від неякісної електроенергії за відхилення напруги в центрі живлення мережі. Однак, подібно до попередньої системи, цей метод має недолік у відсутності зворотних зв'язків за реактивною потужністю. Також відомий пристрій, який використовується для регулювання напруги в цехових мережах і системах електропостачання із низьким коефіцієнтом потужності.

На рисунку 1.8 подано структурну схему пристрою. Регулятор напруги включає в себе реактивне навантаження (наприклад, індукційну піч або трансформатор) позначене як 1, керований вентиль з двосторонньою провідністю – 2, вентиль, паралельний реактивному навантаженню – 3, регулятори шпаруватості імпульсів (одновібратори) – 4 і 5, формувачі імпульсів – 6 і 7 (генератори Ройера), а також датчик фазового зсуву напруги і струму – 8, розташований на вході регулятора напруги.

Структура датчика включає в себе датчик напруги (позначений як 9), датчик струму (10), операційні підсилювачі (11) і логічний елемент І-НЕ (12). Це забезпечує виявлення короточасних піків комутаційних напруг, а вентилі 2 та 3 мають стабілітрони 15 для їх шунтування в протилежних напрямках.

Логіка перемикання вентилів 2 і 3 полягає в їх включенні, коли напруга і струм мають однакові знаки, і виключенні в протилежних випадках під час зміни знаків.

Це призводить до зміни контуру протікання реактивного струму навантаження та реактивної потужності з фази на фазу, використовуючи паралельні вентилі 3 для багатофазних реактивних навантажень. Проте, слабкістю цього пристрою є ускладнена його застосовуваність в розподільчих мережах через складну конструкцію вентилів та генерацію вищих гармонік у мережу, що виникає внаслідок комутації вентилів.

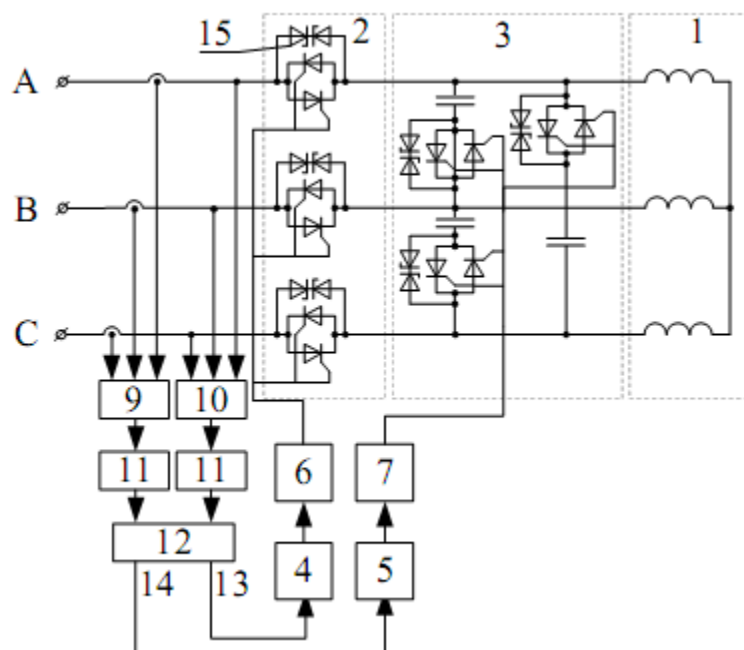


Рисунок 1.8 - Функціональна схема регулятора напруги

У розробленому пристрої регулювання напруги здійснюється з урахуванням концентрації втрат у лінії на корону та незалежної зміни напруги на підстанції, викликаній випадковим характером навантаження. Система включає вимірювачі фазних втрат на корону та фазних втрат на

нагрів проводів лінії, суматори, які об'єднують фазні втрати на корону та нагрів проводів, перетворювачі, пристрої множення, пристрої обробки інформації та виконавчі механізми. Важливо відзначити, що у цьому пристрої відсутній зворотній зв'язок за реактивною потужністю, і ефективний метод врахування втрат активної потужності в лінії від передачі останньої не реалізований, що може погіршити динамічні властивості системи при роботі зі змінним характером навантаження.

Подібний до зазначеного пристрій розроблений, проте враховує величину втрат, які викликані перетіканням як активної, так і реактивної потужності. Принцип його функціонування полягає в такому: якщо приріст потужності втрат на корону перевищує приріст потужності втрат в лінії на величину сигналу, що генерується в перетворювачі, через відповідний вентиль подається сигнал, який впливає на виконавчий механізм, знижуючи напругу в лінії на один ступінь. Внаслідок цього зменшуються втрати на корону, а втрати в проводах лінії збільшуються. У цьому пристрої вихідний сигнал для виконання перемикання пристроєм РПН формується безпосередньо на виході втрат потужності в установлені межі, навіть при короткочасному відхиленні, що може призвести до зниження стійкості і надійності системи регулювання.

Рішення питань регулювання напруги та перетоку реактивної потужності представлено у вигляді комплексного пристрою. Цей пристрій застосовується для контролю напруги під навантаженням і компенсації реактивної потужності або симетризації навантаження в трифазних мережах. Схема пристрою, наведена на рис. 1.9, ілюструє його роботу. Він побудований на базі центрального процесора 6 та постійно-запам'ятовуючого пристрою 7, який керує трифазним вольтододатковим трансформатором (ВДТ) 1 (2 - первинні обмотки ВДТ, 3 - вторинні обмотки ВДТ). До його складу також входять датчик фази навантаження регулюючого органу пристрою 8, блок управління 9 та блок вихідних каскадів 10, блок тиристорних ключів 5. Блок центрального процесора 6 керує роботою всієї

системи програмного управління пристроєм. Застосування цього пристрою обмежене через складну конструкцію тиристорного блоку на високих і середніх напругах, особливо при застосуванні в розподільчих електричних мережах, що вимагає додаткового захисту тиристорів від перенапруг, що ускладнює систему та знижує її надійність.

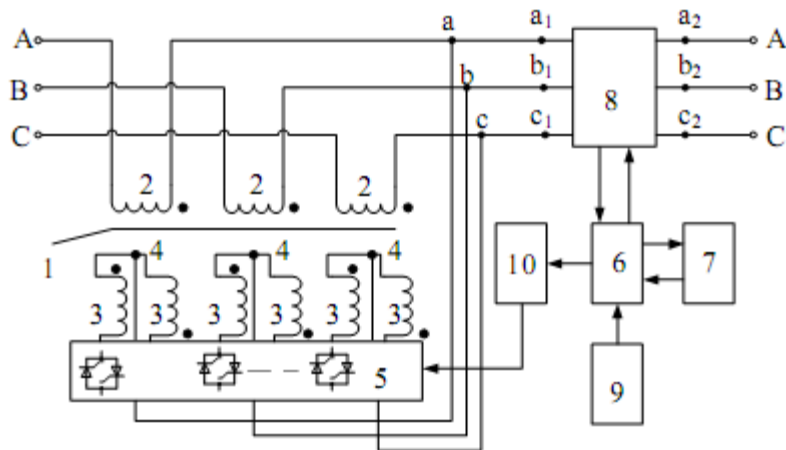


Рисунок 1.9 - Функціональна схема пристрою для стабілізації і регулювання параметрів електроенергії

Пристрій включає три однофазних вольтодобаткових трансформатори (ВДТ), кожен з яких має послідовно з'єднані обмотки, розділені на дві секції за допомогою комутуючих пристроїв (тиристорних ключів). Змінюючи спосіб підключення первинних і вторинних обмоток трансформатора та впливаючи на фази напруги мережі, досягається регулювання напруги на виході в межах коефіцієнту трансформації останнього. Однак такий пристрій потребує значної кількості комутуючих елементів і не враховує впливу напрямку вольтодобавки до напруги електромережі на режим системи з точки зору потужності.

1.3. Регулювання напруги в системах електропостачання з компенсацією реактивної потужності.

Пристрій для регулювання напруги та перерозподілу реактивної потужності в лініях електропередач представлений на рис. 1.10.

Він призначений для використання в системах розподілу електричної енергії з метою компенсації коливань напруги, залежно від змін навантаження та для регулювання напруги в живлячій мережі. Основний принцип роботи пристрою базується на зміні еквівалентного опору первинної обмотки трансформатора-реактора 2 шляхом регулювання струму в його вторинній обмотці з використанням потенціал-регулятора 1.

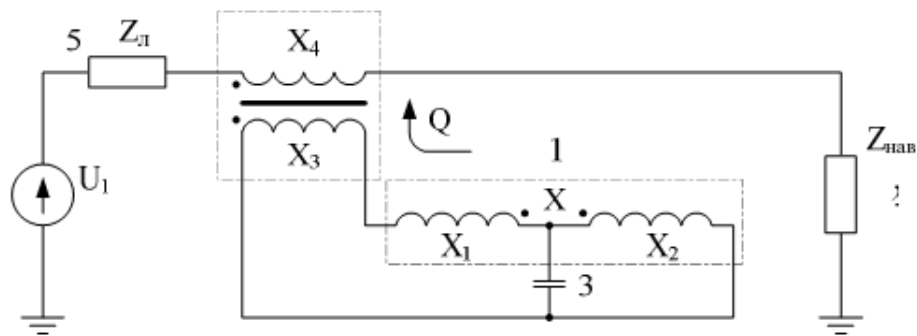


Рисунок 1.10 - Функціональна схема пристрою для регулювання напруги та реактивної потужності

При зміні кута магнітного зв'язку між первинною та вторинною обмотками потенціал-регулятора 1 міняється струм у вторинній обмотці трансформатора-реактора 2, що призводить до зміни опору первинної обмотки трансформатора-реактора 2. Однак такий пристрій не надає можливості зустрічного регулювання напруги на навантаженні і пов'язаний із значними втратами в первинній обмотці трансформатора-реактора.

У пристрої реалізований спосіб вирішення регулювання напруги шляхом місцевої компенсації реактивної потужності. Система включає конденсаторну батарею, складену з послідовно з'єднаних секцій, керованих реакторами, вимикач, лінію електропередачі та блок управління реакторами з двома ланками управління відповідно. Однак запропонований спосіб регулювання є компенсаційним і вимагає запасу потужності компенсаційних пристроїв для широкого регулювання напруги, не враховуючи величину навантаження споживачів, що ускладнює реалізацію закону зустрічного регулювання напруги.

Спосіб регулювання напруги базується на фазовому регулюванні та включає послідовний реактор, конденсаторну батарею, що складається з n секцій однакової потужності, паралельно керований реактор і навантаження. Блок фазового управління керований від пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) регулятора напруги.

Керований реактор, який забезпечує плавне регулювання напруги, одночасно виконує роль елемента релейної системи дискретного регулювання напруги, перемикаючи ємність конденсаторної батареї і визначаючи її зону нечутливості. Це досягається наявністю порогових елементів, які спрацьовують при заданих максимальних і мінімальних струмах керованого реактора.

Проте, приведений спосіб регулювання напруги пов'язаний з додатковими втратами в послідовному реакторі, і відсутній зворотній зв'язок за потужністю. Варто відзначити, що сам спосіб використовує значну кількість реактивних елементів у своєму складі.

Запропоновано варіанти електричної мережі, яка містить ВДТ, через який здійснюється компенсація відхилення напруги у споживачів, по причині зміни навантаження (рис. 1.4 а) та зміни рівня споживання реактивної потужності (рис. 1.4 б)



Рисунок 1.11 - Варіант електричної мережі з вольтододатковим трансформатором

На рис. 1.11: 1 та 2 – шини електропостачання, 3 – трансформатор послідовного включення, 4 та 5 – апарати комутації, 6 –

пристрій регулювання струму, 7 – статичне джерело реактивної потужності, що регулюється.

Спосіб поздовжньо-поперечного регулювання напруги мережі використовується для компенсації втрат напруги і реактивної потужності в протяжних електричних мережах напругою 0,4 – 0,69 – 12 кВ. Пристрій має: ВДТ, батарею конденсаторів (БК), блок управління, 1-й і 2-й ключі, навантаження, формувач сигналів рівня напруги навантаження (ФСРНН), датчик короткого замикання та регульований резистор. Цей пристрій і спосіб регулювання дозволяють компенсувати втрати напруги і реактивної потужності в протяжних мережах, забезпечуючи ефективну роботу системи напруги в заданому діапазоні напруги. Перший керований ключ грає ключову роль у впорядкуванні потоків енергії і дозволяє ефективно взаємодіяти з батареєю конденсаторів, навантаженням і іншими компонентами системи.

Розглянутий пристрій відзначається автоматичним переведенням вторинної обмотки ВДТ на поперечне включення при напрузі на навантаженні $U_{\text{нав}} > |U_{\text{Н}} - \Delta U_{\text{Н}}|$. У цьому режимі батарея конденсаторів (БК) компенсує реактивну потужність навантаження, а ВДТ виконує роль трансформатора поперечного регулювання. Важливо відзначити, що розглянутий пристрій працює тільки в режимі стабілізації напруги і не забезпечує зустрічного закону регулювання. Додатково він вимагає затрат на оснащення необхідною кількістю конденсаторних батарей для ефективної компенсації реактивної потужності.

Використовується ряд пристроїв, призначених для автоматичного регулювання режимів реактивної потужності вузла навантаження. Цей пристрій складається з програмної системи, що регулює напругу та реактивну потужність за допомогою силового трансформатора з регульованим плоским намагнічуванням (РПН), синхронного компенсатора та батарей конденсаторів. Програмне регулювання виконується протягом

добового періоду за допомогою блоку примусової комутації та таймера, а також стандартного пристрою управління реактивною потужністю.

За допомогою силового трансформатора РПН та синхронного компенсатора може здійснюватися ефективне регулювання реактивної потужності. Батареї конденсаторів також можуть використовуватися для компенсації реактивної потужності та поліпшення фактору потужності. Програмна система, яка працює за добовий період, дозволяє оптимізувати регулювання відповідно до змін в навантаженні та інших умовах експлуатації.

Пристрій для автоматичного управління конденсаторною батареєю (КБ) з метою компенсації реактивної потужності в електричних мережах.

Основні елементи пристрою включають лічильник, програматор, комутатор та виконавчі елементи (контактори або пускачі). Лічильник вимірює розузгодження, і при його перевищенні генерує імпульси, частота яких залежить від величини розузгодження. Програматор обробляє ці імпульси і видає команди на включення або відключення секцій конденсаторної батареї.

Комутатор перетворює потенційні сигнали в релейні, а релейні сигнали управляють виконавчими елементами, які, ймовірно, включають контактори або пускачі. Цей механізм дозволяє ефективно управляти конденсаторною батареєю для компенсації реактивної потужності в мережі.

Обидва розглянуті пристрої мають недоліки у вимозі до додаткових джерел реактивної потужності та відсутності можливості зустрічного регулювання напруги для споживачів.

Існує метод регулювання напруги за допомогою батареї конденсаторів, де схема включає блок активного струму, квадратор, диференціюючий підсилювач, підсилювач-суматор і датчик напруги, вимірювальні трансформатори струму та напруги, а також компенсуючий пристрій, який з'єднаний з мережею через трансформатор. Представлений метод ґрунтується на прямій залежності активного струму лінії від взаємного

кута між еквівалентними ЕРС об'єднаних енергосистем. Важливо відзначити, що цей метод практично незалежний від реактивності компенсуючого пристрою.

Використовується також пристрій для комплексного управління режимом системи електропостачання, що дозволяє керувати перетоками активної і реактивної потужностей [4]. Схема такого пристрою приведена на рис. 1.12.

Він має схему управління реакторами 5, 6 і 7 - блоки переключення реакторів, 8 - блок порівняння, 9 - блок вмикання елементу пам'яті, 10 і 11 - функціональні перетворювачі, 12 і 13 і 14-16- логічні елементи, 17 - блок знаку приросту навантаження, 18 - інтегрально-пропорційний блок, 19 - елемент пам'яті, 20 - обмежувач, 21 - суматор, 22, 23 і 24- реле з контактами, а також 25 - датчик навантаження джерела реактивної потужності (ДРП), 26 - вимірювальний трансформатор напруги шин і 27 і 28 - датчики відповідно активної і реактивної потужності лінії електропередач.

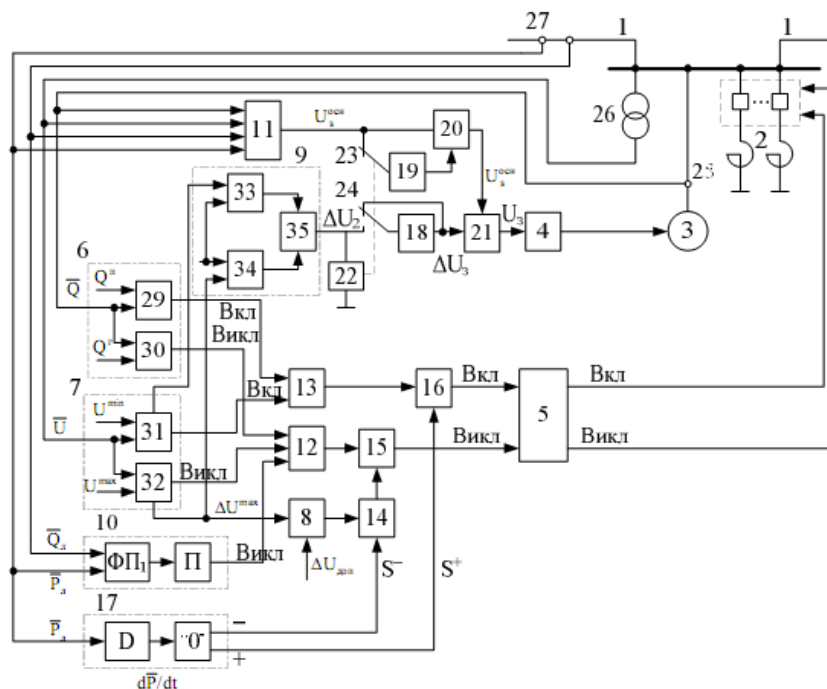


Рисунок 1.12 - Функціональна схема пристрою для управління режимом електричної підстанції

Запропонований пристрій здійснює координоване одночасне керування реакторами (дискретними засобами) і ДРП (безперервно керованим засобом). Відмінність у способі управління режимом електричної підстанції полягає в відсутності похідної по активній та реактивній потужності в каналах вимірювання порівняно з попереднім варіантом. Проте обидва розглянуті пристрої мають загальний недолік у великій кількості виконавчих елементів, що робить всю систему управління режимом підстанції складнішою для обслуговування, підвищує вартість системи та знижує надійність каналів відпрацювання команд.

1.4 Поздовжньо-поперечне регулювання напруги в замкнених мережах систем електропостачання

Пристрій, що здійснює поздовжньо-поперечне регулювання напруги в замкнених мережах систем електропостачання, має в своєму складі умову затримки сигналу для перемикання відпайки трансформатора зв'язку, що унеможливорює проведення перемикання при появі короточасних коливань навантаження на шини паралельно працюючих підстанцій. З появою струму в лінії та збільшенні напруги на затискачах трикутника ВДТ пристрій формує сигнал з встановленою затримкою часу на підвищення коефіцієнту трансформації трансформатора зв'язку. При стійкому зменшенні струму в лінії пристрій вимикає ВДТ від джерела живлення. Якщо відбувається реверс струму в лінії, то спрацьовують елементи пристрою, підключаючи ВДТ до джерела живлення з зворотним чергуванням фаз. Прилади захисту служать для блокування одночасної появи керуючих сигналів на обох виходах пристрою керування ВДТ при відмовах схеми.

Вказаний пристрій не враховує відхилення напруги на споживачах, якщо воно одночасно присутнє у обох вітках або рівновіддалених у замкнутій мережі живлення. У системах із обмеженням по перетоках

потужності застосовується розроблений пристрій, який представлений на схемі (рис. 1.13).

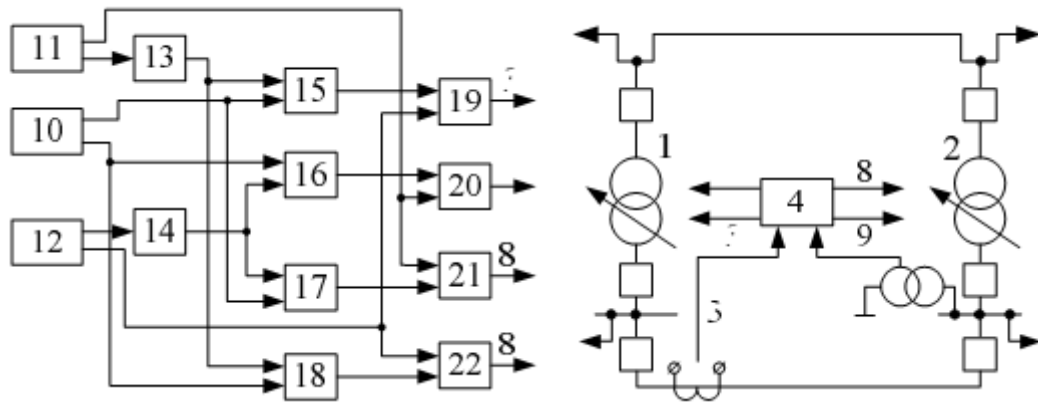


Рисунок 1.13 - Функціональна схема пристрою для регулювання режимів роботи трансформатора зв'язку

Пристрій складається з 1 та 2 - трансформатори зв'язку, 3 - елемент контролю перетікання потужності в мережі, 4 - регулятор напруги, 5 - трансформатор струму, 6-9 - канали управління пристроями РПН трансформаторів зв'язку. Регулятор 4 має в своєму складі: 10 - базовий регулятор напруги, 11, 12 - обмежувачі струму в мережі в напрямку від трансформатора 1 до трансформатора 2 і в зворотному напрямку відповідно, 13 і 14 - логічні елементи, логічні елементи 15 –18 та логічні елементи 19 – 22.

Відповідно до методу регулювання, обчислюються загальні збільшення втрат напруги у всіх точках регулювання в елементах електричної системи. Під час зміни напруги в точці регулювання на один рівень, обчислюється сума приростів втрат напруги в елементах системи. Потім виміряне значення загальних приростів втрат порівнюється з обчисленим значенням приростів втрат при проведенні перемикання. Зазначений пристрій використовує складний алгоритм обчислення вхідних сигналів, що суттєво сповільнює швидкодію системи та погіршує її надійність. Крім того, він не має зворотного зв'язку за потоком реактивної

потужності та напругою на споживачах, що ускладнює вирішення завдання зустрічного регулювання.

Існує пристрій, який використовує принцип поперечного регулювання напруги для компенсації падіння напруги в електричній лінії та спільно використовується з трансформатором, оснащеним пристроєм РПН. У складі пристрою є фільтр, який працює у всьому діапазоні пропускання і призначений для моделювання складової ємності або активного опору повної лінії передачі, а також схема 2 зі зсувом фаз з випередженням або затримкою фази на 90° відповідно до характеру навантаження. В такому пристрої відсутні обмеження для проведення перемикачів при короткочасних відхиленнях контрольованого спаду напруги, що можуть виникати внаслідок випадкового характеру навантаження в трансформаторі та струмі відповідно.

Функціональна схема пристрою для поздовжньо-поперечного регулювання напруги представлена на рис. 1.14.

До його складу входять: 23 – 25 - регулювальні трансформатори, 26 – 28 - перемикаючі схеми, 31 – 36 - три пари ВДТ, 5 – 8 - вентилі.

Схеми з вентилями, які використовуються для перемикавання регульованої напруги, генерують сигнали залежно від значення вихідної напруги трансформаторів. Конструкція перемикаючих схем відрізняє цей пристрій. Використання тиристорних ключів робить систему регулювання чутливою до перенапруг, а керування ВДТ відхиленням напруги на навантаженні без врахування втрат та перетікання реактивної потужності погіршує динамічні характеристики системи регулювання. Це відбувається через те, що метод введення регулюючого впливу в цих пристроях передбачає в першу чергу зміну саме цих параметрів.

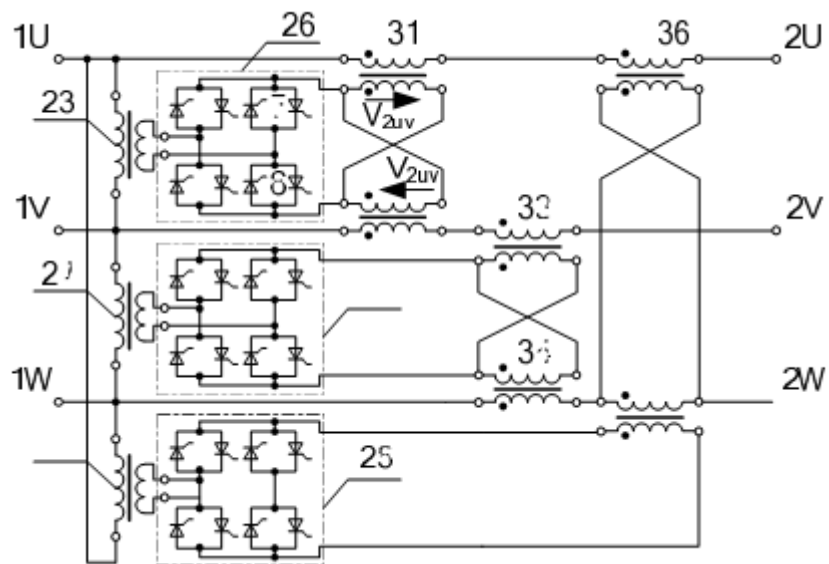


Рисунок 1.14 - Функціональна схема пристрою для поздовжньо-поперечного регулювання напруги.

2. СИНТЕЗ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО ПОЗДОВЖНЬО-ПОПЕРЕЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ

Автоматичне управління режимами напруги та потужності у мережах електропостачання забезпечується пристроями, які використовуються окремо або в комплексному поєднанні: трансформатори з пристроями РПН, ВДТ з поздовжнім та поздовжньо-поперечним вмиканням, батареями конденсаторів, введеними згідно схем поздовжньої та поперечної компенсації, синхронними компенсаторами та статичними тиристорними компенсаторами, розташованими в розподільчій мережі, але головним чином в місцях загального розташування основного обладнання для спрощення обслуговування, заміни або ремонту.

2.1. Вплив поперечного регулювання напруги на режими мереж.

При використанні поздовжньо-поперечного регулювання напруги в області рекомендованої замкненої системи електропостачання (див. рис. 2.1), коефіцієнт трансформації представляє собою комплексну величину, і тому його значення визначатиме розподіл потужностей у електропостачальній системі та режим напруги в ній. Дослідження впливу поперечного регулювання напруги на розподіл активної та реактивної потужностей у петельній схемі електропостачання із кабельною лінією електропередач (ЛЕП) на стороні низької напруги та повітряною ЛЕП на стороні високої напруги було проведено за допомогою програмного пакету AutoCAD.

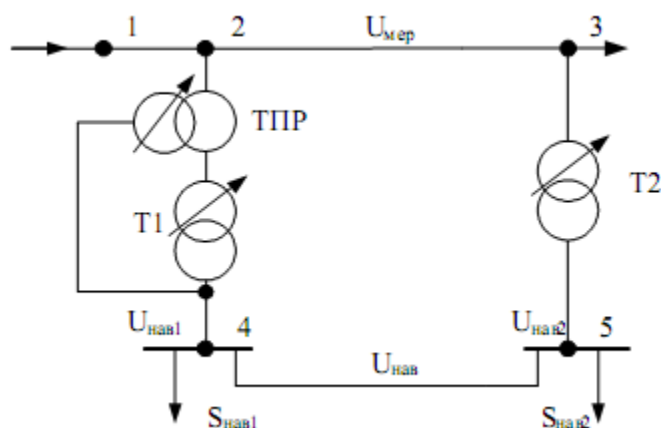


Рисунок 2.1 - Схема системи електропостачання перед дослідженням впливу поперечного регулювання напруги

Виявлені зв'язки між активною та реактивною потужністю і значенням коефіцієнта трансформації ТПР (див. рис. 2.2) ілюструють вплив поперечного регулювання напруги на розподіл потужностей.

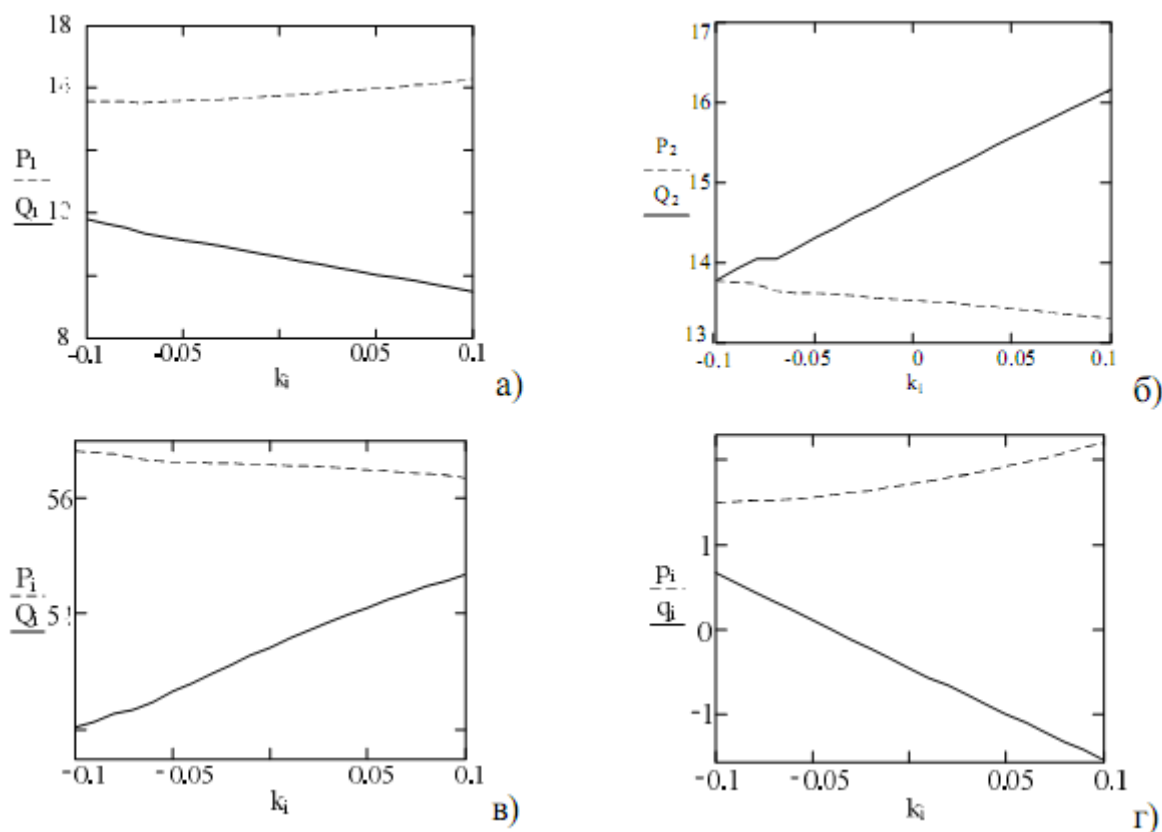


Рисунок 2.2 - Залежності перетоків активної і реактивної потужностей (МВт, МВАр) через трансформатори Т1 (а) і Т2 (б) та на ділянках 2-3 (в) високої, 4-5 (г) низької напруги від коефіцієнта трансформації Т1.

Відповідно до вказаних залежностей (рис. 2.2), для розглянутої схеми системи електропостачання встановлено, що збільшення перетоку реактивної потужності на всіх ланках є більшим, ніж збільшення перетоку активної потужності. При введенні поперечної ЕРС, яка зміщена на 90° ел. відносно вектора напруги мережі до обмотки ВН силового трансформатора системи електропостачання буде застосована геометрична сума векторів напруги мережі і поперечної ЕРС. (рис. 2.3). Така дія призведе до зміни амплітуди та фази струму первинної обмотки силового трансформатора в порівнянні з напругою мережі, а також напруги та струму вторинної обмотки.

При підключенні навантаження до силового трансформатора величина кута між векторами напруги та струму на навантаженні та обмотці НН трансформатора визначається відношенням активного і реактивного опорів ліній електропередач та власного навантаження. У випадку ігнорування опору гілки намагнічування під час роботи трансформатора під навантаженням, амплітуда та фаза струму на первинній обмотці трансформатора визначаються еквівалентним комплексним опором. Цей опір враховує суму комплексних опорів первинної та вторинної обмоток, ліній електропередачі та навантаження.

Треба враховувати, що струм, який споживається з електромережі, проходить через місце введення додаткової ЕРС та первинну обмотку трансформатора одночасно. Таким чином, при постійному навантаженні та введенні додаткової ЕРС можливе зміщення вектора струму на первинній обмотці відносно вектора напруги мережі, але кут між векторами напруги та струму на обмотці ВН залишиться практично незмінним.

В результаті цього зсуву, споживаний струм з мережі буде відстає від вектора напруги мережі на кут, який визначається величиною введеної додаткової поперечної ЕРС. Цей зсув в напрямку, близькому до вектора напруги мережі, еквівалентний появі ємнісної складової струму I_{le} (рис. 2.3), яка опережає вектор напруги мережі на 90° електричних градусів. Величина

ємнісної складової струму визначається величиною введеної додаткової ЕРС і пропорційна їй.

Внаслідок появи ємнісної складової струму мережі в точці введення додаткової ЕРС відбуватиметься зміна співвідношення між активною та реактивною потужностями, які протікають в контурах системи електропостачання.

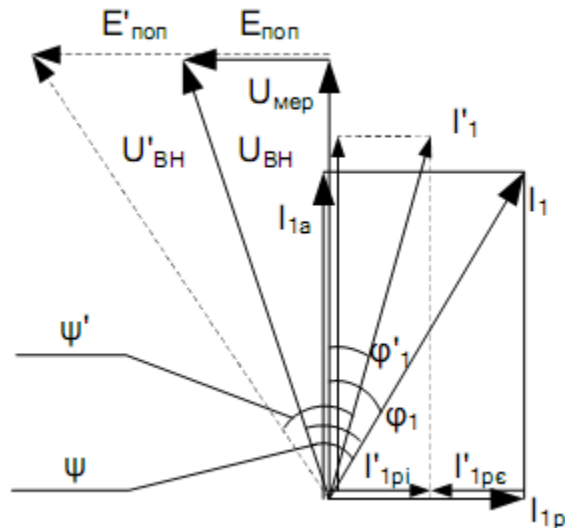


Рисунок 2.3 - Зміна кута ϕ між векторами I_1 та $U_{\text{мер}}$ при введенні поперечної ЕРС

На рис. 2.3: ψ — кут зсуву між фазами напруги та струмом на первинній обмотці трансформатора, ϕ — кут зсуву між фазами напруги та струмом мережі.

2.2. Розробка закону поздовжньо-поперечного регулювання напруги.

Враховуючи вплив поперечного регулювання напруги з метою вирішення питання комплексного регулювання напруги з урахуванням режиму системи електропостачання за потужністю, доцільно одночасно використовувати обидва способи регулювання. Це включає безпосереднє регулювання напруги за допомогою трансформатора з пристроєм РПН та регулювання режиму системи електропостачання за потужністю за

допомогою ТПР. Структурна схема такого електротехнічного комплексу представлена на рис. 2.4.

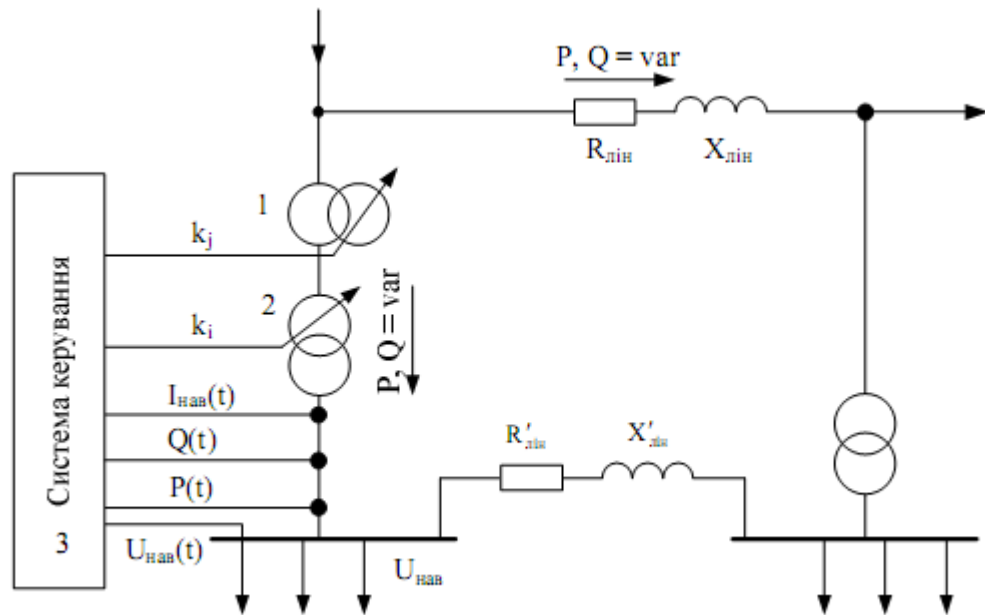


Рисунок 2.4 - Схема системи електропостачання, що має трансформатор поперечного регулювання та силовий трансформатор з РПН.

На рис. 2.4: 1 – трансформатор з поперечним регулюванням (ТПР), 2 – силовий трансформатор з РПН, 3 – блок системи керування). Оскільки основні регулювальні органи в системах електропостачання мають дискретну дію (такі, як пристрої РПН тощо), запис закону регулювання аналітичної функції на вимірювальному вході регулятора та його статичної характеристики недостатній. Для зручності та ефективності найбільш прийнятним способом є використання методу, який поєднує функцію, що формується на вимірювальному органі регулятора, та логічні умови формування регулюючого впливу.

Типовим законом регулювання напруги за допомогою пристрою РПН є закон "зустрічного регулювання". Найбільш досконалим можна вважати саме цей закон, оскільки він включає похідну напруги в часі та визначає час запізнення регулюючої дії. Це необхідно для уникнення неправильних перемикань РПН при короткочасних збуреннях.

Вираз цього закону представлений у вигляді:

$$u(t) = k_1 ((U_{\text{наб}}(t) - U_y) - k_2 (I_{\text{наб}}(t) - I_{\text{min}}));$$

$$k_i = \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{\text{нн}}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) < u_{\text{нз}}, \\ u(t - \tau) < u_{\text{нз}}, \\ \frac{dU_{\text{наб}}(t)}{dt} < 0, \end{cases} \\ \frac{U_i}{U_{\text{нн}}}, \text{ якщо } u_{\text{нз}} \leq u(t) \leq u_{\text{нз}}, \\ \frac{U_{i-1}}{U_{\text{нн}}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) > u_{\text{нз}}, \\ u(t - \tau) > u_{\text{нз}}, \\ \frac{dU_{\text{наб}}(t)}{dt} > 0, \end{cases} \end{cases} \quad (2.1)$$

де k_i – коефіцієнт тр-ції на i -у відгалуженні обмотки ВН,

$U_{\text{зад}}$ – задане значення напруги на виводах споживачів,

$U_1(t)$ – дійсне значення напруги на виводах споживачів,

U_i – ЕРС, яка індукується в обмотці ВН на i -у відгалуженні,

k_1 – коефіцієнт, який характеризує чутливість регулятора напруги,

k_2 – коефіцієнт, який визначає нахил графіку зустрічного

регулювання напруги, $k_2 = 0,05 \cdot U_{\text{ном}} / (I_{\text{max}} - I_{\text{min}})$,

I_{min} – струм навантаження в мінімальному режимі,

$I(t)$ – фактична величина струму навантаження,

$\frac{dU}{dt}$ – похідна контрольованої напруги,

$u_{\text{дз}}, u_{\text{ндз}}$ – верхня та нижня межі зони нечутливості, які задаються, виходячи з умов надійності і точності підтримки напруги.

Закон (2.1), в якому в якості регульованого параметру виступають активна потужність P та реактивна потужність Q на контрольованій ділянці

системи електропостачання, є найбільш доцільним для управління пристроєм для перемикання відгалужень вторинної обмотки ТПР. Це зумовлено тим, що сам пристрій ТПР, будучи структурно ідентичним пристроєм РПН, взаємодіє з системою, де розподіл активної та реактивної потужностей лінійно залежить від величини напруги на його виводах ($P(t) \sim u_x(t)$ відповідно до рис. 2.2).

Отже, алгоритм управління для ТПР подібний до алгоритму для РПН, але враховує лінійну залежність розподілу потужностей в системі електропостачання від напруги на виводах ТПР. Цей закон управління, спираючись на величину активної та реактивної потужностей, забезпечує ефективне регулювання напруги в поздовжньо-поперечному аспекті в системі електропостачання:

$$u_x(t) = k_3 [(Q_{\text{зад}} - Q(t)) + k_4 (P(t) - P_{\text{зад}})];$$

$$k_j = \begin{cases} \frac{U_{j+1}}{U_{\text{ВН}}}, \text{ якщо } \begin{cases} u_x(t) < u_{\text{НЗ.Х}}, \\ u_x(t - \tau) < u_{\text{НЗ.Х}}, \\ \frac{dQ(t)}{dt} > 0, \end{cases} \\ \frac{U_j}{U_{\text{ВН}}}, \text{ якщо } u_{\text{НЗ.Х}} \leq u(t) \leq u_{\text{ВЗ.Х}} \\ \frac{U_{j-1}}{U_{\text{ВН}}}, \text{ якщо } \begin{cases} u_x(t) > u_{\text{ВЗ.Х}}, \\ u_x(t - \tau) > u_{\text{ВЗ.Х}}, \\ \frac{dQ(t)}{dt} < 0. \end{cases} \end{cases} \quad (2.2)$$

де $u_x(t)$ – напруга на виході ТПР (поперечна складова напруги обмотки ВН основного трансформатора),

U_j – ЕРС, яка індукується в обмотці живлення ТПР на j -у відгалуженні,

k_j – коефіцієнт трансформації j -го відгалуження ТПР,

$Q_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}}$ – задана величина реактивної потужності, яка визначає стійкий режим мережі з мінімальними відхиленнями напруги у вузлах електропостачання,

k_3 – коефіцієнт, який враховує чутливість пристрою автоматичного управління положеннями РПН ТПР,

k_4 – коефіцієнт, який характеризує вагу активної потужності в формуванні регулюючого впливу з допомогою ТПР,

$\frac{dQ}{dt}$ – похідна огинаючої реактивної потужності, що перетікає через контрольовану ділянку системи електропостачання.

Накладення додаткових умов на формування регулюючої дії за реактивною потужністю має свої обґрунтування через особливості транспортування реактивної енергії вздовж ліній електропередач, де відбуваються значні втрати, які виявляються суттєво більшими порівняно з втратами активної потужності [13]. Для системи керування електротехнічним комплексом (рис. 2.4) можна синтезувати закон управління, комбінуючи закони (2.1) та (2.2). Важливо відзначити, що в замкнених системах електропостачання з використанням поздовжнього регулювання напруги спостерігатиметься різке змінювання розподілу потужностей між паралельно працюючими підстанціями. Регулюючий вплив за допомогою поздовжньої складової регульованої напруги слід вводити з урахуванням як відхилень напруги від заданого значення, так і відхилень потужності.

Для здійснення перемикання пристроєм РПН ТПР в напрямку збільшення вольтодобавки, необхідно враховувати наступні умови: значення перетоку активної потужності повинно бути нижче встановленого порогу, при цьому реактивна потужність повинна перевищувати верхню межу зони нечутливості за реактивною складовою і не має вказівок на повернення в зону нечутливості протягом певного часу τ . Перемикання в напрямку зменшення вольтодобавки (або збільшення у протилежному напрямку)

виконується за умови відповідного зворотного порогу. Одночасно з проведенням перемикання відгалужень ТПР буде змінюватися напруга на вводах споживачів, яка буде відповідати залежності, подібній до тієї, що представлена на рис. 2.6. Тому для компенсації відхилень на вводах споживачів потрібно впроваджувати поздовжнє регулювання напруги. Умови для проведення перемикання пристроєм РПН силового трансформатора пропонується сформулювати аналогічно, як і в (2.2). Такий підхід забезпечує зустрічне регулювання напруги з виключенням можливості виникнення помилкових перемикань через короточасні збурення напруги на вводах споживачів.

2.3. Вибір математичного апарату для вирішення задачі поздовжньо-поперечного регулювання.

З формули (2.3) можна зрозуміти, що закон управління перемикаючим пристроєм РПН силового трансформатора є досить складним і виявляє дискретну форму через те, що первинна обмотка силового трансформатора та обмотка живлення ТПР (рис. 1.6) мають конкретну кількість регульованих відгалужень із відповідним кроком зміни напруги. Тому синтез структури регулюючого пристрою проводиться в два етапи: спочатку синтез дискретно-логічної частини, а потім синтез вимірювальних кола. Моделі кінцевих автоматів є необхідним інструментом для представлення роботи багатьох систем керування різними об'єктами. Але традиційні мови для їхнього опису (наприклад, діаграми Вейча, Карно) не завжди є зручними, оскільки вони включають в себе багато проміжних станів, які існують лише теоретично і підлягають мінімізації під час їх перетворення.

Тому, для синтезу структури системи автоматичного регулювання напруги на силовому трансформаторі, виправдано використовувати апарат секвенційного опису. Апарат секвенційного опису виявляється таким же універсальним, як і класична мова кінцевих автоматів у формі автоматного графа (графічне зображення взаємодії між величинами, що визначають

роботу цього каналу управління) або автоматних таблиць. Однак цей опис є більш компактним. Мова секвенцій дозволяє легко переходити до структури, яка будується безпосередньо за описом. Це вигідно відрізняє її від інших автоматних мов. За використання апарату секвенцій кожна складова частина складного логічного вислову записується у слідуючому вигляді:

$$\varphi \vdash \psi, \quad (2.4)$$

де φ і ψ – функції алгебри логіки від m та n змінних відповідно.

Секвенційний запис (2.4) інтерпретується так: вислів ψ істинний, якщо істинний вислів φ . Запис вигляду (2.4) можна застосовувати для опису кінцевого автомата з пам'яттю. Для цього потрібні два наступні види секвенцій, що відповідають функціям переходів δ і λ кінцевого автомата:

$$\tilde{x}_{i_1} \dots \tilde{x}_{i_q} \tilde{s}_{j_1} \dots \tilde{s}_{j_r} \vdash \tilde{s}_{j_1} \dots \tilde{s}_{j_r} \quad (2.5)$$

$$\tilde{x}_{i_1} \dots \tilde{x}_{i_q} \tilde{s}_{j_1} \dots \tilde{s}_{j_r} \vdash \tilde{y}_{k_1} \dots \tilde{y}_{k_v} \quad (2.6)$$

де q – число розрядів коду вхідних символів,

r – число розрядів коду станів,

v – число розрядів коду вихідних символів,

$\tilde{s}_{i_p}, \tilde{s}_{j_p}$ – величина кодових змінних вхідних символів ($t = 1, \dots, q$),

$\tilde{s}_{i_p}, \tilde{s}_{j_p}$ – величина кодових змінних станів ($p = 1, \dots, r$),

$\tilde{y}_{k_w}$ – величина кодових змінних вихідних символів ($w = 1, \dots, v$).

Змінна $\tilde{u}_{i_a} \in \{\tilde{x}_{i_t}, \tilde{s}_{i_p}, \tilde{s}_{j_p}, \tilde{y}_{k_w}\} \in$ або u_{1_s} , або $\bar{u}_{1_s}$.

Відношення (2.5) і (2.6) описують закон прояву сигналів на внутрішніх та зовнішніх виходах логічного перетворювача. У випадку включення в систему регулювання елементів із затримкою сигналів в часі, ці елементи можна виразити через часові булеві функції [7] за наступними формулами.:

$$\tau = \begin{cases} 0, & t < T \\ 1, & t \geq T \end{cases}, \quad (2.7)$$

де τ – змінна часу,

t – поточна величина часу,

T – поріг часу.

2.4. Синтез структури системи автоматичного керування трансформаторами з поздовжньо-поперечним регулюванням напруги.

У кінцевій структурі регулятора цифрова частина другого каналу, яка відповідає прямому регулюванню напруги на навантаженні, буде ідентична синтезований, оскільки логічні умови для проведення відповідного перемикавання пристроєм РПН силового трансформатора є схожими до умов перемикавання РПН ТПР.

Враховуючи експлуатаційні характеристики пристроїв РПН, розглянемо реалізацію автоматного графа роботи каналу регулювання перетоку потужності, в якому використовується зміна коефіцієнту трансформації k_j (2.3) ТПР.

Для цього скористаємось математичним апаратом секвенцій, який дозволяє створювати компактні представлення та безпосередньо отримувати синтезовану структуру з математичних виразів. Позначимо y_1 та y_2 вихідні змінні регулятора, які відповідають сигналам на перемикавання, що надходять від регулятора на пристрій РПН ТПР. Сигнал y_1 активується при збільшенні значення реактивної потужності та зменшенні активної потужності, викликаючи перемикавання пристрою РПН в напрямку зменшення коефіцієнта трансформації i , відповідно, збільшення поперечної вольтдобавки. Сигнал y_2 формується для перемикавання пристрою РПН ТПР у зворотному напрямку.

Сигнали y_1 та y_2 повинні бути імпульсними, при цьому кожному сигналу на перемикавання пристрою РПН повинен відповідати один імпульс на

відповідному виході регулятора. Враховуючи це, структура регулятора передбачає наявність генератора тактових імпульсів (ГТІ), який будується на тригері Т1. Генератор формує імпульси з тривалістю τ_1 та паузою між ними τ_2 , де значення тривалості імпульсів та їх періоду задаються елементами часової затримки в структурі регулятора відповідно τ_1 та τ_2 .

Для проведення перемикання з одного положення пристрою РПН в нове (наприклад, з k_j в k_{j-1}) потрібен час, який визначається інерційністю механічних ланок системи регулювання та послідовністю проведення самого перемикання. Протягом цього часу параметри системи електропостачання змінюються, і для уникнення появи чергової команди на будь-якому виході регулятора під час циклу перемикання необхідно збільшити тривалість між тактовими імпульсами на величину, не меншу тривалості одного циклу перемикання.

Отже, ГТІ має працювати в двох різних режимах – в режимі очікування (з нормальною паузою між імпульсами τ_2) і в режимі перемикання (із підвищеною тривалістю між тактовими імпульсами – близько $3 \cdot \tau_2$). Тому для формування циклу обробки даних в регуляторі при режимі перемикання потрібно використати тригер Т2, який формує імпульси тривалістю τ_1 та проміжком між ними $3 \cdot \tau_2$. Після закінчення циклу перемикання регулятор переводиться в початковий стан S_0 після надходження сигналу від пристрою РПН про завершення перемикання D (done). Отже, якщо регульований параметр тримається в зоні нечутливості ($u_x(t) \in [u_{i\zeta.\delta}, u_{a\zeta.\delta}]$), то при імпульсі τ_1 регулятор переводиться в стан S_1 , а при його закінченні повертається у вихідний стан S_0 . Згідно із запропонованим законом регулювання (2.2) входам регулятора відповідають змінні:

- L (low) – сигнал напруги на вимірювальному вході циклу поперечного регулювання менший встановленої зони нечутливості, ($u_x(t) < u_{i\zeta.\delta}$);

- Н (high) – сигнал напруги на вимірювальному вході циклу поперечного регулювання більший встановленої зони нечутливості ($u_x(t) < u_{\hat{\alpha}, \delta}$);

- DN – похідна регульованого параметру менша 0, ($dQ/dt < 0$);

- DP – похідна регульованого параметру більша 0, $dQ/dt > 0$;

- DZ (derivative zero) – похідна регульованого параметру дорівнює 0, $dQ/dt = 0$;

- В (blocking) – сигнал блокування та зупинки регулятора (формується згідно команди на перемикання у відповідному напрямку, коли РПН знаходиться в крайньому положенні чи в ручному режимі з виникненням аварійної ситуації);

- R (reset)– сигнал, який відповідає ввімкненому стану регулятора та працюючому ГТІ.

Для управління режимом роботи генератора тактових імпульсів (ГТІ) - визначення, чи перебуває він у режимі перемикання чи очікування, та переведення його в останній режим при з'яві вихідних сигналів y_1 або y_2 , введемо тригер Т3. Для запам'ятовування знаку похідної регульованого параметру при виході його за зону нечутливості протягом часу затримки сигналу перемикання (рівний τ_2), введемо відповідно тригери Т4 та Т5.

З урахуванням вищезазначених аспектів граф функціонування каналу управління трансформатором потужності реактивності (ТПР) у регуляторі, що реалізує закон (2.2), матиме поданий на рис. 2.5 вигляд. Графічне представлення функціонування системи представлено у формі аналітичного запису, використовуючи секвенційний метод відображення залежностей станів графа.

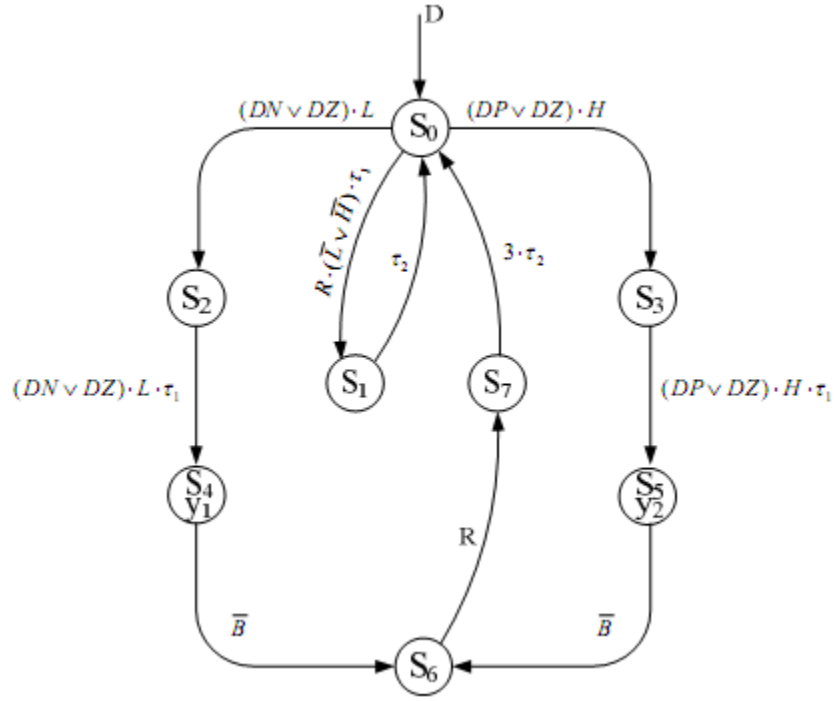


Рисунок 2.5 - Графічне представлення функціонування каналу управління пристроєм РПН трансформатора поперечного регулювання.

$$\begin{aligned}
 D \vdash S_0; & \quad (DP \vee DZ) \cdot H \cdot S_0 \vdash S_3; \\
 R \cdot (\bar{L} \vee \bar{H}) \cdot \tau_1 \cdot S_0 \vdash S_1; & \quad (DP \vee DZ) \cdot H \cdot \tau_1 \cdot S_3 \vdash S_5; \\
 \tau_2 \cdot S_1 \vdash S_0; & \quad S_4 \cdot \bar{B} \vdash S_6; \\
 (DN \vee DZ) \cdot L \cdot S_0 \vdash S_2; & \quad S_5 \cdot \bar{B} \vdash S_6; \\
 (DN \vee DZ) \cdot L \cdot \tau_1 \cdot S_2 \vdash S_4; & \quad S_6 \cdot R \vdash S_7; \\
 S_7 \cdot 3 \cdot \tau_2 \vdash S_0 &
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

З врахуванням, що кожному із станів графу відповідають наступні стани введених тригерів:

$$\left\{ \begin{array}{ll}
 S_0 \in \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5; & S_4 \in \tilde{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 T_5; \\
 S_1 \in T_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5; & S_5 \in \tilde{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 T_4 \bar{T}_5; \\
 S_2 \in T_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 T_5; & S_6 \in \tilde{T}_1 \bar{T}_2 T_3 \tilde{T}_4 \tilde{T}_5; \\
 S_3 \in T_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 T_4 \bar{T}_5; & S_7 \in \bar{T}_1 T_2 T_3 \tilde{T}_4 \tilde{T}_5.
 \end{array} \right. \tag{2.9}$$

Підставивши формули (2.9) в систему (2.8) проведемо їх мінімізацію відповідно [2]. В результаті отримуємо систему секвенцій (2.10).

$$\left\{ \begin{array}{ll} \bar{T}_3 \cdot R \vdash T_1; & (DP \vee DZ) \cdot H \cdot \overline{((T_2 \cdot 3\tau_2) \vee (T_1 \cdot \tau_2))} \cdot H \cdot \bar{B} \vdash T_4; \\ T_1 \cdot \tau_1 \cdot \tau_2 \vdash \bar{T}_1; & (DN \vee DZ) \cdot L \cdot \overline{((T_2 \cdot 3\tau_2) \vee (T_1 \cdot \tau_2))} \cdot L \cdot \bar{B} \vdash T_5; \\ T_3 \cdot R \vdash T_2; & D \vdash \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5; \\ T_2 \cdot \tau_1 \cdot 3 \cdot \tau_2 \vdash \bar{T}_2; & T_5 \cdot L \cdot ((T_2 \cdot 3\tau_2) \vee (T_1 \cdot \tau_2)) \cdot \bar{B} \vdash y_1; \\ & T_4 \cdot H \cdot ((T_2 \cdot 3\tau_2) \vee (T_1 \cdot \tau_2)) \cdot \bar{B} \vdash y_2; \\ & (T_5 \cdot L \cdot ((T_2 \cdot 3\tau_2) \vee (T_1 \cdot \tau_2)) \cdot \bar{B}) \vee (T_4 \cdot H \cdot ((T_2 \cdot 3\tau_2) \vee (T_1 \cdot \tau_2)) \cdot \bar{B}) \vdash T_3. \end{array} \right. \quad (2.10)$$

Використовуючи мінімізовану систему секвенційних виразів (2.10), проводимо синтез структурної схеми каналу регуляції напруги. Перший етап синтезу включає в себе розробку функціональної схеми, що реалізує систему секвенційних рівнянь (2.10). Кожна з цих секвенцій втілюється схемою співпадання, на входи якої подаються сигнали, що відповідають кодовій комбінації лівої частини секвенції, і двостабільним елементом. До входу двостабільного елемента через діодну матрицю під'єднаний вихід системи співпадання. У випадку, якщо код стану двостабільного елемента в правій частині секвенції не має інверсії, вихід схеми співпадання з'єднується з прямим входом двостабільного елемента. При наявності інверсії в коді стану вихід схеми співпадання з'єднується з інверсним входом двостабільного елемента [3].

На рис. 2.6 представлена функціональна схема системи регулювання напруги, яка була синтезована на основі системи секвенцій (2.10).

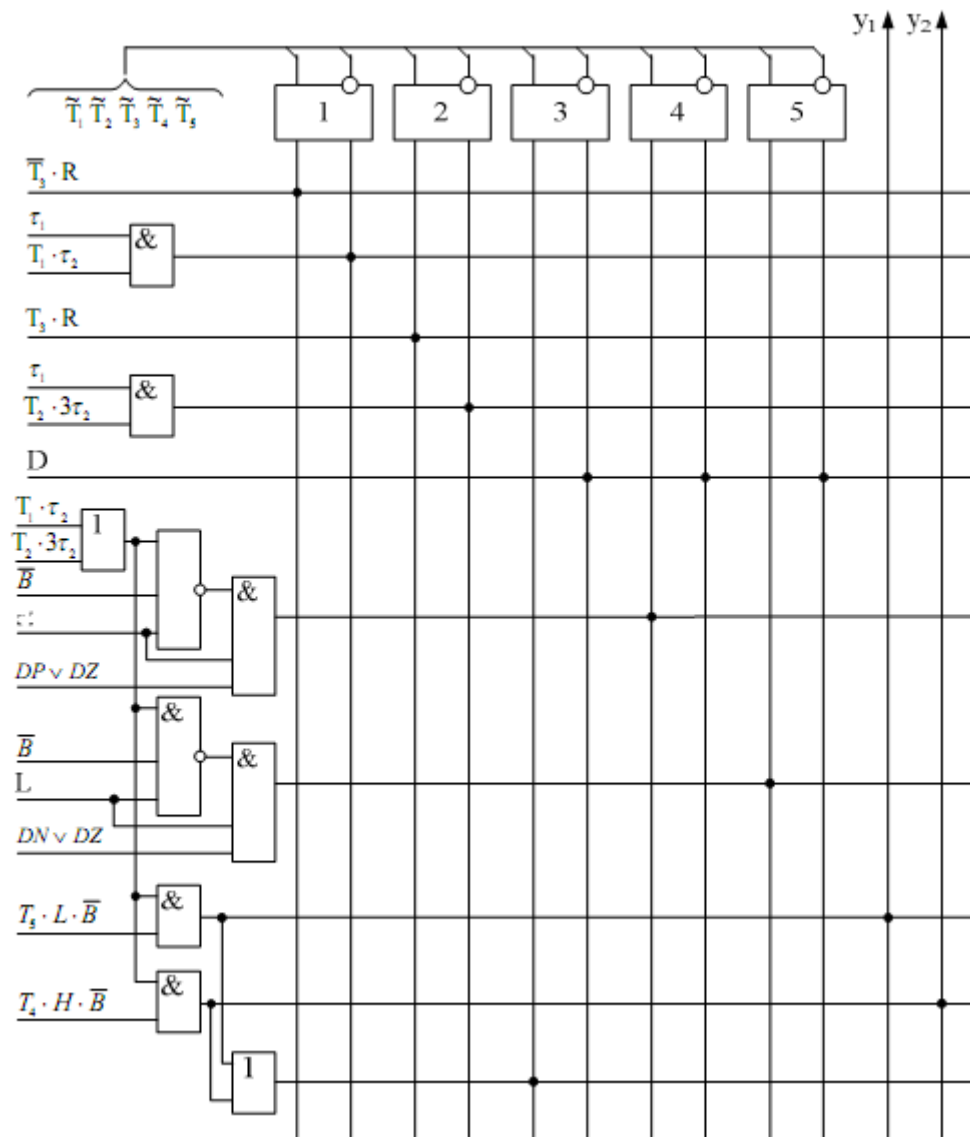


Рисунок 2.6 - Функціональна схема системи регулювання напруги, синтезована на основі системи секвенцій.

2.5. Реалізація синтезованої структури системи автоматичного керування трансформаторами з поздовжньо-поперечним регулюванням напруги

2.5.1. Формування структури регулятора

На другому етапі синтезу структури каналу регулювання перетоку реактивної потужності в системі поздовжньо-поперечного регулювання напруги, проводимо перетворення отриманої функціональної схеми з метою

її адаптації для зручної реалізації у вибраній елементній базі. Це включає попереднє модифікування схеми, представленої на рис. 2.6, замінюючи з'єднання елементів через діодну матрицю безпосереднім під'єднанням [2]. Отримана в результаті цих перетворень схема наведена на рис. 2.7.

Часові логічні функції $\tau_i (i = \overline{1, 2})$ замінюються відповідними елементами затримки часу. Кон'юнкції (диз'юнкції) системи секвенцій (2.10) замінені відповідно логічними елементами "І" ("АБО"). Як результат, отримуємо структуру каналу управління пристроєм РПН ТПР в регуляторі напруги (представлена на рис. 2.6). На схемі (рис. 2.7): блоки 1, 18 – елементи НІ; блоки 2, 7, 14, 16, 17, 21, 22, 25 – елементи І; блоки 3, 8, 13, 20, 24 – асинхронні RS-тригери; блоки 4, 5, 9, 10 – елементи часової затримки сигналу; блоки 6, 11, 15, 19 – елементи АБО; блоки 12, 23 – елементи І з комбінованими входами.

Розроблена схема управління пристроєм РПН ТПР в регуляторі напруги працює наступним чином. При отриманні сигналу вмикання регулятора (сигнал R), тригер 3 встановлюється через відкритий елемент І 2. Після певного часу τ_2 на виході елемента часової затримки сигналу 4 з'являється імпульс, що триває до моменту отримання скиду тригера 3 від сигналу з елемента часової затримки 5. Одночасно цей імпульс пройде через елемент АБО 6 та надійде на входи елементів І 16 та 21, періодично встановлюючи їх у відкритий стан. Допустимо, що в певний момент часу збільшилося індуктивне навантаження на шинах трансформаторної підстанції, що призведе до появи сигналу DP (тобто похідна регульованого параметру почне збільшуватися).

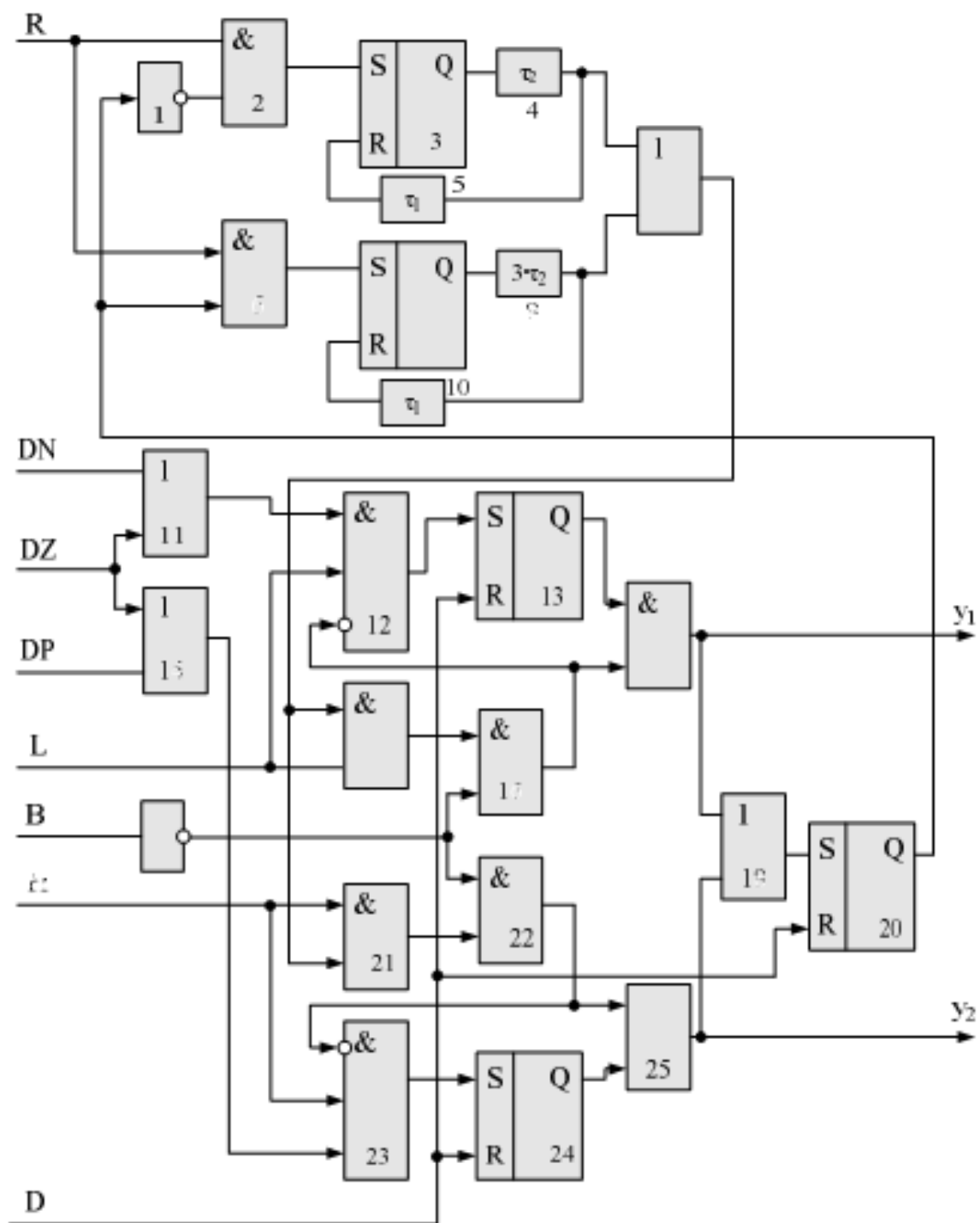


Рисунок 2.7 - Структурна схема каналу управління пристроєм РПН

ТПР в

регуляторі напруги з врахуванням існуючої елементної бази

Через елемент АБО 15 цей сигнал подається на один із входів елемента І 23, що встановлює його у відкрите положення. У випадку, коли регульований параметр (потужність) продовжує зростати і досягає значення,

що перевищує задане згідно з законом регулювання (1), на вході регулятора Н з'являється сигнал. Цей сигнал пройде через відкритий логічний елемент І 23 і встановить тригер 24. Фіксація імпульсу, який надходить на тригер 24, відбувається після проходження часу між імпульсами ГТІ τ_2 та активації логічного елемента І 22. Останній виконує дію блокування розглянутого вихідного ланцюга регулятора з надходженням відповідного сигналу В.

Якщо протягом інтервалу між імпульсами ГТІ регульований показник не відновився в припустимі межі і не виявляє тенденції до відновлення (тобто похідна залишається більше 0 - це відповідає сигналу DP, або рівна нулю - це відповідає сигналу DZ), то через відкритий сигналом Н логічний елемент І 21 і через блокуючий елемент І 22 сигнал надійде на вихідний логічний елемент І 25, який у цей час буде відкритим за рахунок встановленого тригера 24. Отже, імпульс від ГТІ, пройшовши вказаний шлях, потрапить на вихід регулятора y_2 , що призведе до виклику реакції вихідного підсилювача регулятора та виконання перемикання електроприводом РПН. Вихідний сигнал y_2 , через елемент АБО 19, встановить тригер 20, який, в свою чергу, зупинить постачання сигналу на вхід тригера 3 генератора тактових імпульсів у режимі очікування через елемент НІ 1 і подасть сигнал на вхід тригера 8 генератора тактових імпульсів у режимі перемикання (зі збільшеною тривалістю паузи між тактовими імпульсами). Скид тригерів 20 та 24 (або 13) відбудеться після завершення перемикання та подачі на вхід регулятора сигналу D.

При пониженні регульованого параметру нижче заданого значення ланцюги регулятора працюють згідно [7]. З використанням цієї структурної схеми (рис. 2.7) отримаємо остаточну конфігурацію регулятора напруги, розширивши її каналом управління пристроєм РПН трансформатора, який ідентичний синтезованому, та необхідними аналоговими схемами обробки інформації від вимірювальних перетворювачів. Ураховуючи існуючу елементну базу схемотехніки, структура регулятора напруги, який реалізує закон (2.3), матиме вигляд, поданий на рис. 2.8.

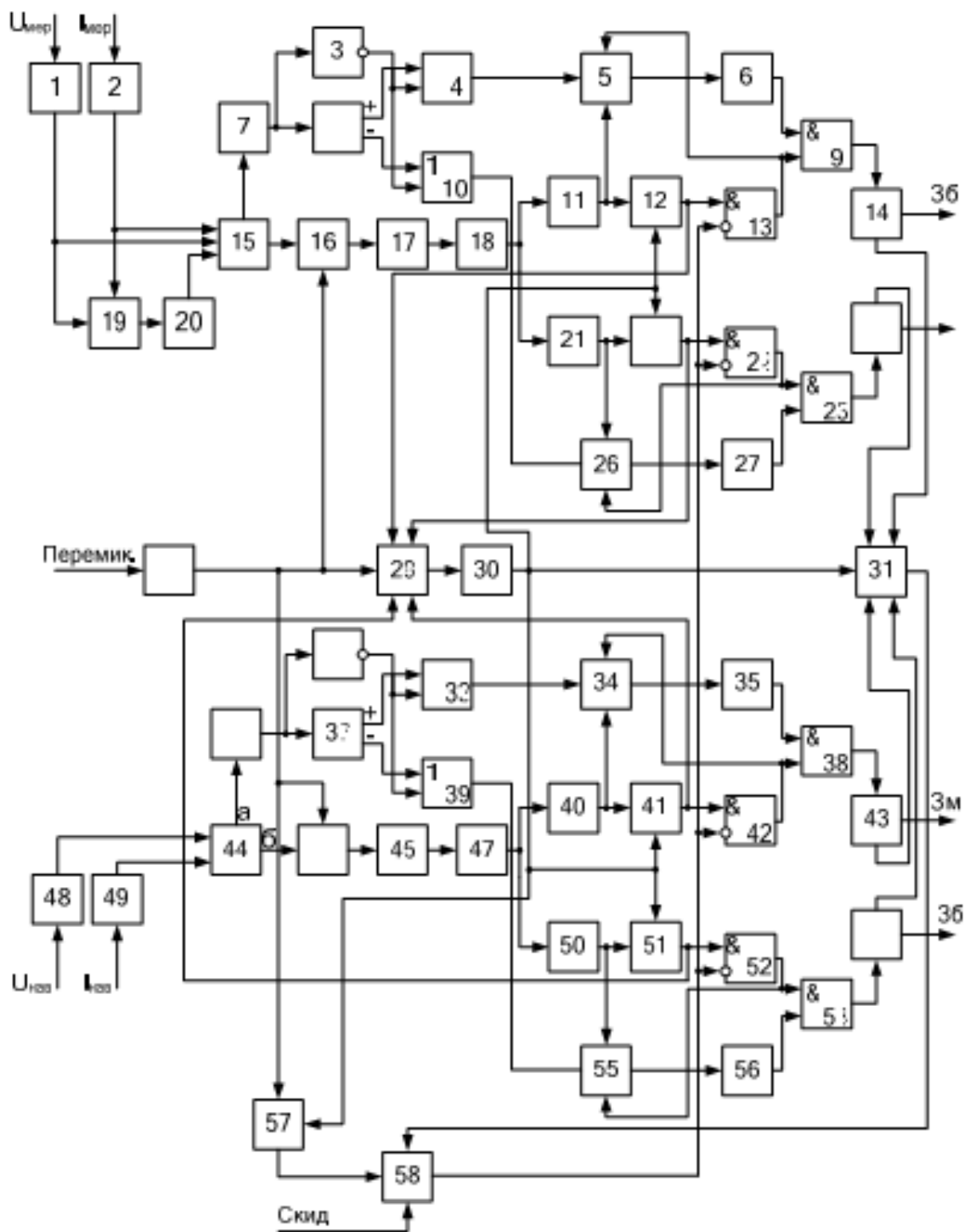


Рисунок 2.8 - Структурна схема регулятора в системі поздовжньо-поперечного регулювання напруги

На схемі (рис. 2.8):

блок 1 – вимірювальний трансформатор напруги;

– вимірювальний перетворювач струму;

блоки 3, 32 – елементи НІ;
блоки 4, 10, 33, 39 – елементи АБО;
блоки 5, 9, 13, 24, 25, 26, 34, 38, 42, 52, 54, 55 – елементи І;
блоки 6, 27, 35, 56 – блоки пам'яті;
блоки 7, 36 – блоки визначення похідної огинаючої вхідного сигналу;
блоки 8, 37 – блоки визначення знаку похідної;
блоки 21, 40, 50 – перетворювачі імпульсного сигналу в потенційний;
блоки 12, 22, 41, 51 – блоки часової затримки;
блоки 14, 23, 43, 53 – підсилювачі регулятора;
блок 15 – блок множення;
блоки 16, 45 – блоки формування і зміни зони нечутливості;
блоки 17, 46 – блоки формування і зміни уставки регулятора;
блоки 18, 47 – порогові блоки;
блок 19 – фазовий детектор;
блок 20 – блок обчислення тригонометричної функції.

2.5.2. Робота синтезованого каналу керування трансформатором поперечного регулювання.

Принципово, регулятор напруги, який був синтезований, діє наступним чином. Напруга в системі електропостачання вимірюється вимірювальним трансформатором напруги 1. Сигнал з цього трансформатора подається на другий вхід блоку множення 15 і другий вхід фазового детектора 19 в ролі опорного сигналу. Також струм, що споживається з системи електропостачання, вимірюється вимірювальним перетворювачем 2, який включає в себе вимірювальний трансформатор струму та нормуючий перетворювач струмового сигналу в пропорційний сигнал по напрузі. Сигнал з цього перетворювача подається на перший вхід блоку множення 15 і одночасно на перший вхід фазового детектора 19 як сигнал порівняння. Вихідний сигнал фазового детектора 19, що представляє напругу,

пропорційну куту зсуву фаз між напругою та струмом системи електропостачання (φ), подається на блок обчислення тригонометричної функції 20. У блоку множення 15 обчислюється миттєве значення перетоку реактивної потужності за відповідною формулою:

$$q(t) = u(t) \cdot i(t) \cdot \sin(\varphi(t)) \quad (2.11)$$

де $q(t)$ – миттєва величина перетоку реактивної потужності; $u(t)$ – миттєва величина напруги системи електропостачання; $\varphi(t)$ – кут зсуву фаз між напругою та струмом.

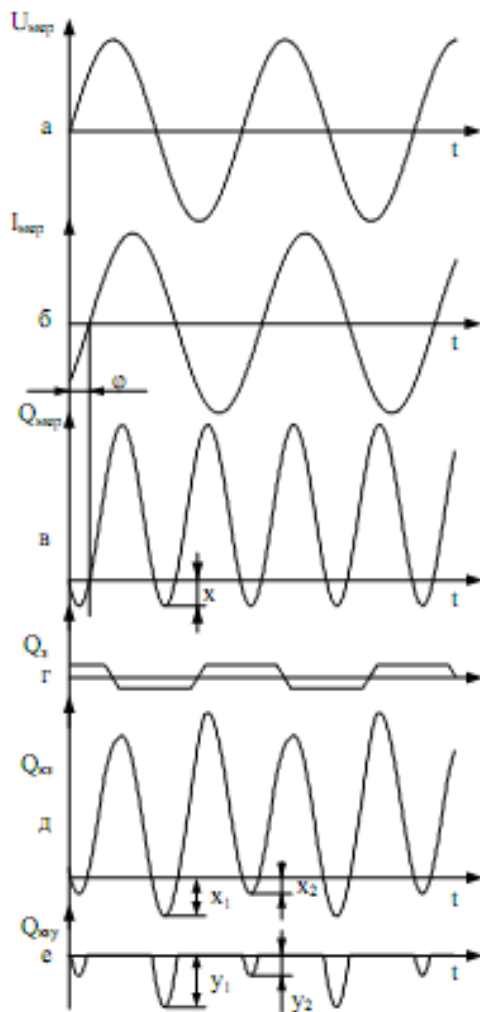


Рисунок 2.9 - Діаграма сигналів вимірювального каналу потужності

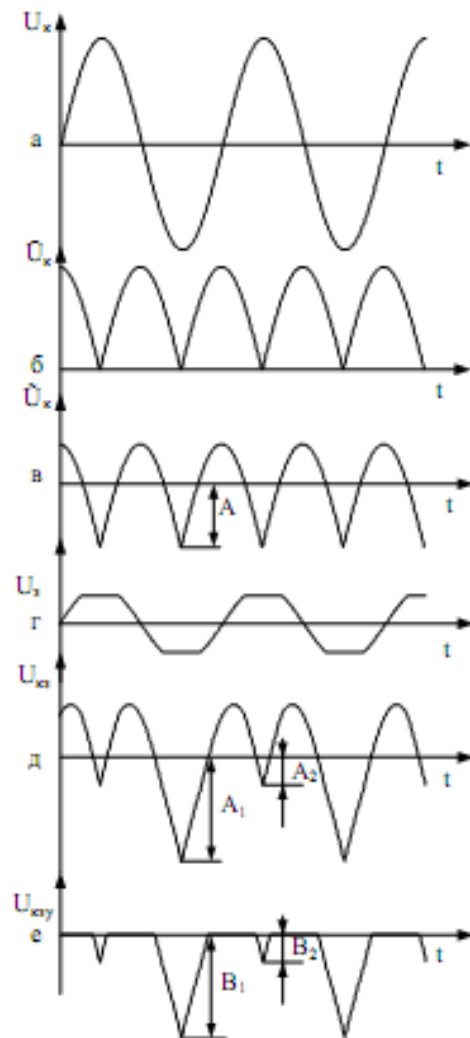


Рисунок 2.10 - Діаграма сигналів вимірювального каналу напруги на вводах споживачів

На виході цього блоку виникає сигнал (див. рис. 2.9), який має подвійну частоту в порівнянні з частотою напруги і струму в мережі, а також сталу складову, наближену до середнього значення змінної складової. Амплітуда цього сигналу залежить від величини споживаного струму та характеру навантаження (співвідношення між його активним та реактивним опорами). З припущенням сталого характеру навантаження (наприклад, силового обладнання з $\cos \varphi \rightarrow 0,8$), миттєве значення реактивної потужності зберігає відносне положення відносно осі абсцис, і зі зміною струму змінюється лише амплітуда сигналу на виході блоку множення 15, а постійна складова цього сигналу залишається незмінною. Якщо характер потоку потужності в контрольованій ділянці системи електропостачання спрямований на збільшення реактивної потужності та зменшення активної (збільшується реактивний опір або зменшується активний), а струм залишається незмінним, то сигнал на виході блоку множення $Q_{\text{мер}}$ (див. рис. 2.9) рухається в напрямку зниження відносно осі абсцис за рахунок зменшення постійної складової.

У обох випадках середнє значення реактивної потужності пропорційне амплітуді x від'ємних імпульсів сигналу на виході блоку множення.

У другому блоку, що відповідає за формування і зміни зони нечутливості (рис. 2.9), використовується модуляція сигналу $Q_{\text{мер}}$ сигналом трапецієдальної форми Q_z (рис. 2.9 г), що визначає значення зони нечутливості по керувальному каналу ТПР. Зона нечутливості в цьому каналі налаштована досить великою, з верхнім значенням, що відповідає заданому значенню реактивної потужності, щоб забезпечити відповідний режим системи електропостачання. На виході цього блоку (рис. 2.9 д) отримуємо сигнал Q_{kz} , де різниця амплітуд $\Delta x = x_1 - x_2$ імпульсів від'ємної полярності містить інформацію про задане значення зони нечутливості в каналі вимірювання перетоку потужності.

Сигнал Q_{kz} з виходу блоку 16 подається на вхід другого блоку формування і зміни уставки 17 реактивної потужності. У цьому блоку

формується імпульсний сигнал $Q_{кзу}$ (рис. 2.9 е), чия амплітуда визначається в такий спосіб, щоб управляти рівнем перетоку потужності в системі електропостачання, підсилюючи чи послаблюючи амплітуди імпульсів y_1 , y_2 . Цей імпульсний сигнал $Q_{кзу}$, що містить інформацію про задану зону нечутливості та уставку регулятора по реактивній потужності, подається на вхід другого порогового блоку 18, в основі якого знаходиться стабілітрон із заданим порогом спрацювання $Q_{пор}$.

У випадку, коли y_1 та y_2 менше за $Q_{пор}$, струм через стабілітрон настільки малий, що сигнал на виході порогового блоку 18 відсутній. Коли y_1 більше за $Q_{пор}$, а y_2 менше за $Q_{пор}$, лише імпульси більшої амплітуди збуджують стабілітрон, викликаючи на виході порогового блоку послідовність прямокутних імпульсів з частотою 50 Гц. У випадку, коли y_1 більше за $Q_{пор}$ і y_2 більше за $Q_{пор}$, стабілітрон збуджується кожним імпульсом сигналу $Q_{кзу}$, що призводить до послідовності прямокутних імпульсів на виході порогового блоку з частотою 100 Гц.

Отже, відсутність імпульсного сигналу на виході другого порогового блоку вказує на низький рівень перетоку реактивної потужності з мережі в навантаження, що може призвести до нестійкого режиму з підвищенням напруги через ємнісні струми. Послідовність імпульсів з частотою 50 Гц вказує на те, що параметр $Q_{мер}$ знаходиться в допустимих межах, заданих зоною нечутливості та уставкою. У випадку послідовності імпульсів з частотою 100 Гц параметр $Q_{мер}$ перевищує допустиме значення.

Сигнал із виходу другого порогового блоку 18 подається на входи третього та четвертого перетворювачів імпульсного сигналу в потенційний (11, 21). Обидва перетворювачі налаштовані таким чином, що при надходженні імпульсів із частотою 50 Гц на їх входи потенціальний сигнал відсутній. Це свідчить про те, що значення перетоку активної та реактивної потужностей знаходяться в допустимих межах.

На виході перетворювача 11 потенційний сигнал логічної 1 виникає при подачі послідовності імпульсів із частотою 100 Гц на його вхід. Це

вказує на перевищення встановленої межі перетоку потужності з мережі в навантаження. Вихідний сигнал перетворювача 11 активує третій блок часової затримки 12 каналу вироблення команди "Збільшити", щоб викликати переключення пристрою РПН трансформатора поперечного регулювання (ТПР) і введення додаткової поперечної ЕРС в напругу мережі, випереджаючи її на 90° . Вихідний потенційний сигнал перетворювача 21 запускає четвертий блок часової затримки 22 каналу вироблення команди "Зменшити".

Блоки часової затримки 12 та 22 потрібні для того, щоб регулятор не викликав в схему електроприводу пристрою РПН ТПР команди "Збільшити" та "Зменшити" у відповідь на короткочасні коливання потужності в даний момент часу. Збуджений від третього перетворювача імпульсного сигналу в потенційний 11 (або 21) блок часової затримки 12 (або 22) виконує свою функцію після закінчення встановленого періоду часу від імпульсу генератора тактових імпульсів ГТІ 30.

На один з входів одинадцятого логічного елемента І9 (або дванадцятого елемента І25) подається потенційний сигнал, який генерується у третьому блоку пам'яті 6 (або четвертому блоку пам'яті 27). У цих блоках пам'яті зберігається інформація у формі логічного сигналу про знак похідної реактивної потужності протягом періоду затримки часу, виробленого сигналом перемикання третім блоком часової затримки 12 (або четвертим блоком часової затримки 22).

Знакові сигнали з виходів блока 8 подаються на входи третього та четвертого логічних елементів АБО 4 та 10. Після цього вони подаються на перші входи сьомого та восьмого елементів І 5 та 26. Стан цих елементів керується вихідними сигналами третього та четвертого перетворювачів імпульсного сигналу в потенційний 11 та 21, а також сигналами переривання з третього та четвертого блоків часової затримки 12, 22, а також відкритих третього і четвертого блоків заборони 13 та 24.

Така конструкція забезпечує утримання логічних елементів 5 та 26 відкритими лише протягом визначеної затримки часу, яка встановлюється в блоках 12 та 22. Після збудження одного з підсилювачів 14 або 23 і запам'ятовування їх сигналів необхідно для забезпечення стійкого перемикання пристрою під навантаженням, щоб змінити коефіцієнт трансформації трансформатора поперечного регулювання на одне відгалуження при можливих змінах огинаючої реактивної потужності в одному такті регулювання.

Включення елементів АБО в тракті проходження знакових сигналів похідної обумовлено тим, що блок визначення знаку похідної огинаючої має зону нечутливості. У межах цієї зони сигнал, що характеризує похідну огинаючої реактивної потужності, вважається рівним нулю. Якщо похідна в момент появи сигналу на виходах блоків заборони 13 або 24 дорівнює нулю, тобто значення перетоку реактивної потужності не має тенденції до повернення в область допустимих значень, що задаються зоною нечутливості в блокові 16, то виробляється команда на перемикання.

Другий логічний елемент НІ 3 перетворює нульовий вихідний сигнал блоку визначення похідної огинаючої вхідного сигналу 7 в одиничний. На цей сигнал реагують третій та четвертий елементи АБО 4 та 10.

Отже, якщо в момент появи потенційного сигналу на виході блоку часової затримки 12 значення перетоку реактивної потужності перевищує допустимий рівень, але похідна її огинаючої має від'ємний знак, то на першому вході елемента І 9 сигнал відсутній, і команда «Збільшити» не буде вироблена. Ця команда буде вироблятися лише тоді, коли похідна огинаючої реактивної потужності буде дорівнювати нулю або набуде додатнього знаку.

Так само, якщо при появі сигналу на виході блоку затримки 22 значення перетоку реактивної потужності стане меншим за допустиме, а похідна його огинаючої має позитивний знак, то на другому вході елемента І 25 сигнал відсутній, і команда "Зменшити" не буде згенерована. Вона буде активована тільки у випадку, якщо похідна стане рівною нулю або набуде

від'ємного знаку, а також при наявності сигналу на виході четвертого логічного елемента АБО 10.

2.5.3. Робота каналу керування трансформатором поздовжнього регулювання.

Система регулювання напруги для споживачів в запропонованому регуляторі діє таким чином. На споживачах вимірюється напруга за допомогою вимірювального трансформатора напруги 48, розташованого на стороні високої напруги (ВН) трансформаторної підстанції нижнього рівня, і надходить на перший вхід суматора 44. Струм навантаження, який використовується для коригування напруги, вимірюється за допомогою датчика струму 49, що підключається до шинного трансформатора струму, і сигнал, пропорційний вимірюваному значенню струму, надходить на другий вхід суматора 44. Суматор 44 формує загальну напругу U_k (рис. 2.10 а). У суматора 44 є два виходи - перший а і другий б. З виходу а суматора 44 надходить пульсуюча напруга $\tilde{U}_k$ (рис. 2.10 б), яка отримується двохнапівперіодним випрямленням загальної напруги U_k і містить інформацію про зміни огинаючої цієї напруги.

Вихід б суматора подає змінну напругу $\tilde{U}_k$ (рис. 2.10 в), де амплітуда A від'ємних імпульсів пропорційна середньому значенню загальної напруги. В першому блоку формування і зміни нечутливості 45 відбувається модуляція сигналу $\tilde{U}_k$ (рис. 2.10 в) сигналом трапецеподібної форми U_z (рис. 2.10 г), де амплітуда задає значення зони нечутливості регулятора по каналу регулювання напруги на споживачах. На виході блока 45 формується сигнал $U_{kз}$ (рис. 2.10 д), різниця амплітуд $\Delta A = A_1 - A_2$ імпульсів від'ємної полярності якого містить інформацію про задане значення зони нечутливості по каналу регулювання напруги.

Сигнал $U_{kз}$ з виходу блоку 45 вводиться на вхід першого блоку установки і зміни уставки 46, де формується імпульсний сигнал $U_{кзу}$ (рис. 2.10 е). Амплітуди імпульсів B_1 , B_2 в цьому блоку можуть бути змінені,

залежно від потреби, для досягнення необхідного рівня напруги на шинах трансформаторної підстанції. Імпульсний сигнал $U_{кзу}$, що містить інформацію про задану зону нечутливості і установку регулятора по напрузі на споживачах, подається на вхід першого порогового блоку 47, основний елемент якого — стабілітрон із заданим порогом спрацьовування $U_{пор}$.

У випадку, коли $B1$ та $B2$ менше за порігове значення $U_{пор}$, струм через стабілітрон низький, і на виході першого порогового блоку 47 відсутній сигнал. Якщо $B1$ більше за $U_{пор}$, а $B2$ менше за $U_{пор}$, то тільки імпульси з більшою амплітудою активують стабілітрон, і на виході порогового блоку 47 з'являється послідовність прямокутних імпульсів із частотою 50 Гц, відповідно до частоти мережі. У випадку, коли $B1$ більше за $U_{пор}$ і $B2$ більше за $U_{пор}$, стабілітрон збуджується кожним імпульсом сигналу $U_{кзу}$ (рис. 2.10 е), і на виході порогового блоку має місце послідовність прямокутних імпульсів із частотою 100 Гц.

Отже, відсутність імпульсного сигналу на виході першого порогового блоку 47 вказує на те, що напруга на споживачах нижче припустимого значення, яке визначено блоками формування зони нечутливості 45 та установки і зміни уставки напруги 46. Присутність послідовності імпульсів із частотою 50 Гц на виході порогового блоку 47 свідчить, що напруга на споживачах знаходиться в припустимих межах. У разі наявності послідовності імпульсів із частотою 100 Гц це свідчить про те, що $U_{нав}$ перевищує допустиме значення.

З виходу порогового блоку 47 імпульсний сигнал надходить на входи першого та другого перетворювачів імпульсного сигналу в потенційний 40, 50. Як і вищеописано, обидва перетворювачі імпульсного сигналу в потенційний налаштовані таким чином, що при подачі на їх входи імпульсів з частотою 50 Гц на виході потенціальний сигнал відсутній — це відповідає наявності напруги $U_{нав}$ в припустимих межах.

На виході першого перетворювача імпульсного сигналу в потенційний 40 потенційний сигнал з'являється при подачі на його вхід послідовності

імпульсів з частотою 100 Гц – це вказує на перевищення допустимого значення напруги. Вихідний сигнал перетворювача 40 активує перший блок часової затримки 41 каналу вироблення команди «Зменшити», спрямованої на переключення пристрою РПН силового трансформатора. Вихідний потенціальний сигнал перетворювача 50 приводить в дію другий блок часової затримки 51 каналу вироблення команди «Збільшити».

На інший вхід цього логічного елемента І 38 (або 54) надходить потенційний сигнал, який формується у першому блокові пам'яті 35 (або 56), де зберігається інформація про знак похідної огибаючої напруги. Знак похідної огибаючої напруги визначається в блокові 37 за вихідним сигналом першого блока визначення похідної огибаючої вхідного сигналу 36. Цей блок визначає похідну шляхом обробки сигналу $\dot{U}_k$ (рис. 2.10 б), який поступає на вхід блоку 36 з виходу а суматора 44.

Знакові сигнали з виходів блока 37 подаються на входи першого та другого відповідно логічних елементів АБО 33 та 39 і звідти на входи п'ятого та шостого відповідно елементів І 34 та 55. Стан логічних елементів керується вихідними сигналами першого та другого перетворювачів імпульсного сигналу в потенційний 40 та 50, а також сигналами переривання з першого та другого елементів часової затримки 41, 51, та відкритими третього та четвертого елементів І 42 та 52.

Протягом часу затримки між активним та неактивним сигналами, перші та другі блоки пам'яті 34 та 55 отримують відповідні знакові сигнали від логічних елементів АБО 33 та 39. Заборона цих сигналів після активації одного з підсилювачів 43 або 53 та їхнє запам'ятовування також є необхідними для стабільного виконання алгоритму перемикання пристрою РПН силового трансформатора на одну гілку при можливих змінах огибаючої напруги в одному такті регулювання.

Якщо в початковий момент появи сигналу на виходах елементів І 42 або 52 похідна огибаючої напруги дорівнює нулю, тобто регульований параметр $U_{\text{нав}}$ не вказує на тенденцію повертатися в область припустимих

значень, визначених зоною нечутливості в блокові 45, тоді генерується команда на перемикання. Логічний елемент НІ 32 перетворить нульовий вихідний сигнал блоку визначення похідної огинаючої напруги 36 в одиничний, що пройде через перший та другий елементи АБО 33 та 39.

Отже, якщо у момент появи потенційного сигналу на виході першого блоку часової затримки 41 регульована напруга на споживачах перевищує допустиме значення, але похідна його огинаючої є від'ємною, то на першому вході елемента І 38 сигнал відсутній і команда "Зменшити" не буде сформована. Ця команда буде генеруватися лише у випадку, коли похідна огинаючої напруги стане нульовою або прийме позитивний знак.

Аналогічно, якщо у момент появи сигналу на виході блоку часової затримки 51 регульований рівень напруги на споживачах буде менше допустимого, але похідна його огинаючої має позитивний знак, то на другому вході елемента І 54 сигнал відсутній і команда "Збільшити" не буде сформована. Ця команда буде генеруватися лише у випадку, коли похідна стане нульовою або прийме від'ємний знак.

За допомогою сигналів третього та четвертого підсилювачів 14 або 23, які відповідають командам "Збільшити" чи "Зменшити" вольтдобавку, вмикається електропривод пристрою РПН трансформатора поперечного регулювання. Аналогічно, за допомогою сигналів першого та другого підсилювачів 43 або 53, що також відповідають командам "Збільшити" чи "Зменшити" напругу на споживачах, вмикається електропривод пристрою РПН силового трансформатора.

Блок зміни періоду тактових імпульсів генератора 29 регулюється блоком 28 перемикання генератора тактових імпульсів в нормальному режимі. Генератор тактових імпульсів (ГТІ) 30 є релаксаційним генератором прямокутних коливань, а блок зміни періоду тактових імпульсів 29 складається з набору RC-ланцюгів з різними постійними часу. Кожен з цих ланцюгів активується в схемі ГТІ відповідно до команди блоку 28 або сигналів з виходів блоків затримки часу 12, 22, 41, 51. ГТІ визначає

послідовність всіх процесів управління та контролю проьягом циклу перемикання пристроїв РПН на одне відгалуження.

2.5.4. Робота синтезованої структури регулятора в перехідних режимах

Робочий процес пристрою в нормальному режимі ілюструється діаграмою сигналів на рис. 4. У випадку, коли регульовані параметри, такі як потужність чи напруга в вузлі електропостачання, знаходяться в межах припустимих значень, генератор тактових імпульсів (ГТІ) виробляє послідовність імпульсів з періодом τ_1 (рис. 2.11 а). Коли один з параметрів виходить за межі припустимих значень в момент t_1 (рис. 2.11 д), регулятор висилає команду "Зменшити" або "Збільшити" відповідному електроприводу пристрою РПН (рис. 2.11 б). Електропривід, активуючись кулачковим елементом, утримує себе в режимі самоутримання (рис. 2.11 в), незалежно від стану підсилювачів 14, 23 (або 43, 53) регулятора при перемиканні пристрою РПН на одне відгалуження. Той же кулачковий елемент виводить сигнал "Перемикання" на вхід блоку 28 (рис. 2.11 г).

Сигнал "Перемикання" від блоку 28 змінює структуру блоку 29 зміни періоду тактових імпульсів генератора, змушуючи ГТІ генерувати імпульси з періодом τ_2 (рис. 2.11 а). Збереження попереднього періоду слідування імпульсів ГТІ вказує на несправність регулятора. Робочий електропривід має завершити перемикання пристрою РПН на одне відгалуження за час t' (рис. 2.11 д). Якщо тривалість сигналу "Перемикання" (рис. 2.11 г), що надходить на вхід блоку 28, що відповідає тривалості режиму самоутримання електроприводу (рис. 2.11 в), перевищує час t' , це свідчить про "стопоріння" електроприводу. Блок 58 блокування і сигналізації перевіряє справність регулятора та виявляє несправності електроприводу в період від моменту t до моменту t' (рис. 2.11 д).

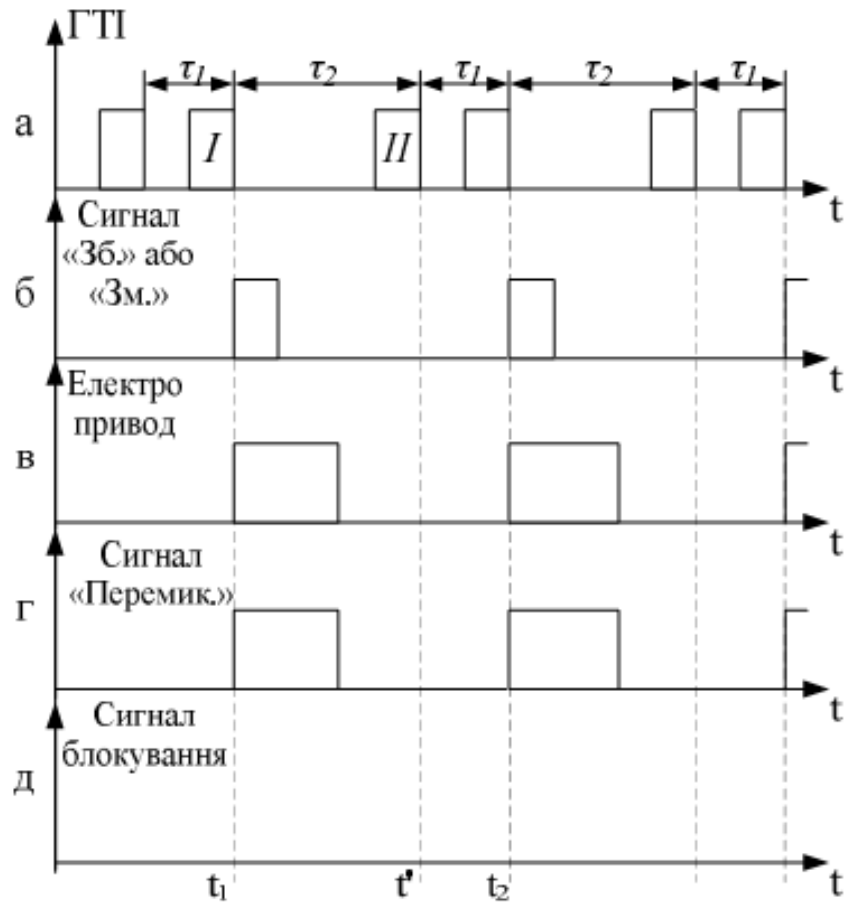


Рисунок 2.11 - Діаграма сигналів управління регулятора в системі поздовжньо-поперечного регулювання напруги.

При належному функціонуванні регулятора та електроприводів після виконання перемикання на одне відгалуження обмотки відповідного трансформатора, електропривод вимикається, призводячи до відсутності сигналу на вході блоку 28. Блок 28 ініціює сигнал для повернення структури блоку 29, що контролює зміну періоду тактових імпульсів генератора (ГТІ) 30, до попередньої структури з заданим періодом слідування імпульсів τ_1 (рис. 2.11 а). У разі, якщо перше перемикання пристрою РПН недостатнє для компенсації відхилень у потоках потужності (або напрузі), регулятор здійснює другий такт перемикання, аналогічний першому. Крім того, блок 28, крім формування команди на зміну періоду тактових імпульсів ГТІ 30, виконує додаткову функцію – при отриманні сигналу "Перемикання" встановлює значення зони нечутливості в блоках 16 та 45. Це значення зони

нечутливості дозволяє будь-якому сигналу, що подається на їхні входи, знаходитися в областях нечутливості регулятора відповідного шляху регулювання.

Це призводить до того, що після активації релейних виконавчих елементів 14, 23 (або 43, 53), вони надсилають команду «Збільшити» або «Зменшити» у схему електроприводу пристрою РПН (рис. 2.11 б) та відключаються. При цьому електропривод, який виконав команду, успішно переходить у режим самоутримання (рис. 2.11 в), а відключення релейних виконавчих елементів 14, 23 (або 43, 53) використовується для контролю його власної схеми та необхідне для установки їх у вихідний стан готовності до наступного такту перемикання.

Блок блокування і сигналізації 58 виявляє несправності електроприводу, такі як "Стопоріння" і "Рух відсутній", а також несправності власної схеми регулятора, працюючи наступним чином. Якщо імпульс ГТІ 30, позначений I на рис. 2.11а, формує команду "Збільшити" або "Зменшити" (рис. 2.12 б), яка нормально виконується електроприводом (рис. 2.12 в), то імпульс ГТІ 30, позначений II (рис. 2.12 а), надходить на вхід блоку 57 контролю електроприводу в режимі "Стопоріння" після того, як сигнал з виходу блоку 28 припиняється разом із зупинкою сигналу "Перемикання" (рис. 2.12 г). Таким чином, на виході блоку 57, який реалізує логічну функцію I, сигнал відсутній.

У випадку "Стопоріння" електроприводу (рис. 2.12 в), під впливом сигналу "Перемикання" (рис. 2.12 г) на вхід блоку 57 надходить сигнал з виходу блоку 28. У той момент, коли на другий вхід цього блоку надходить імпульс II з ГТІ 30, блок 57 генерує імпульс, що відкриває блок блокування і сигналізації 58 (який реалізує логічну функцію АБО в якості основної). При відкриванні блоку 58 переходить в режим самопідтримки. Активація блоку блокування і сигналізації 58 призводить до направлення сигналу логічної одиниці на інверсні входи елементів I 13, 24, 42, 52 і, таким чином, перериває

подачу сигналів з виходів блоків витримки часу 12, 22, 41, 51 на входи елементів І 9, 25, 38 та 54.

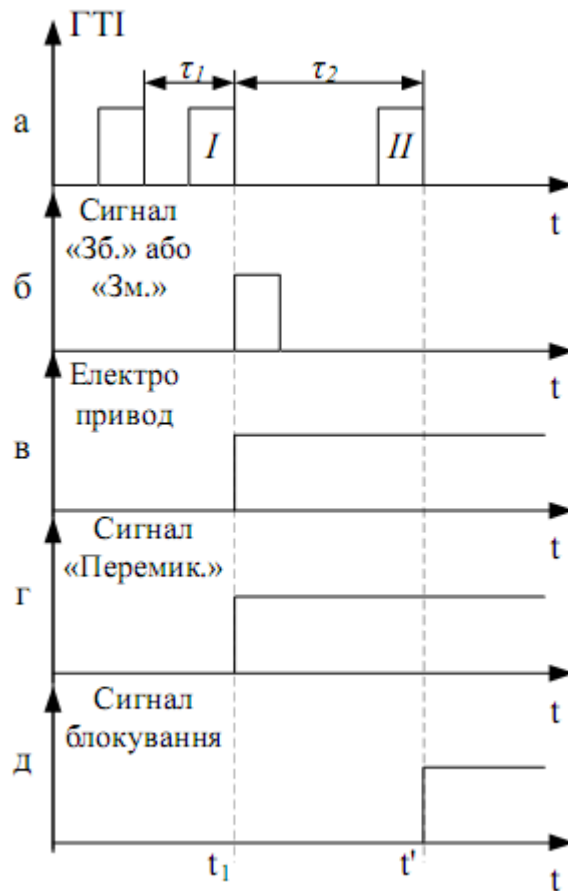


Рисунок 2.12 - Діаграма сигналів управління регулятора напруги

Це призводить до відключення підсилювачів 14, 23, 43 та 53, що відповідає зміні формування та виконання команд "Збільшити" або "Зменшити" регулятора. Паралельно з цим автоматично відбувається сигналізація про можливі несправності. Блок блокування і сигналізації переходить в вихідний стан лише після усунення несправностей і ручної передачі сигналу "Скид" на нього зовнішнім джерелом.

Якщо команда "Збільшити" або "Зменшити" (рис. 2.13 б) формується через включення підсилювача 14, 23, 43 або 53 сигналом, що виник на виході відповідного блоку затримки часу 12, 22, 41 або 51 через несправність власної схеми регулятора, що блокує ланцюги регулювання, то сигнал "Перемикання" (рис. 2.13 г) нормально функціонуючих блоків перемикання

періоду тактових імпульсів в нормальному режимі та блоків 16 і 45 формування і зміни зон нечутливості регулятора не зможуть повернути вихідний стан блок затримки часу, який вже спрацював.

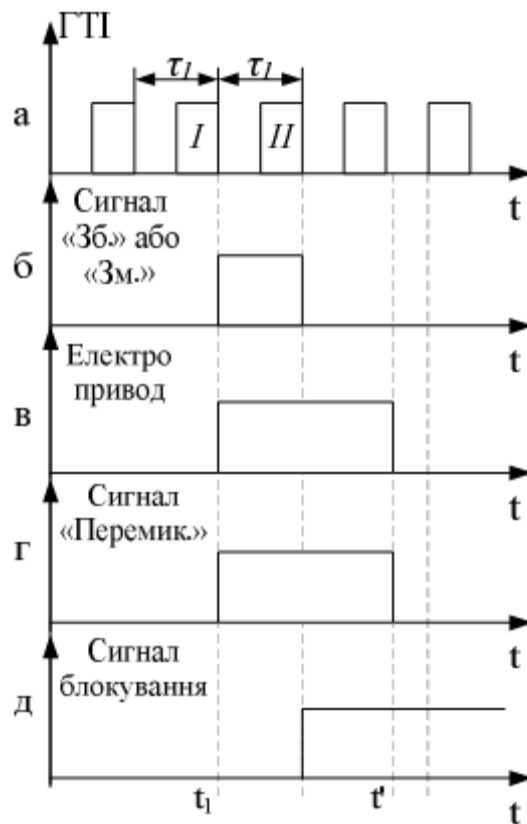


Рисунок 2.13 - Діаграма сигналів управління синтезованого регулятора напруги при несправності схеми ГТІ

В даному випадку, незалежно від того, чи надходить на вхід блоку зміни періоду тактових імпульсів 29 сигнал на перенастроювання структури для формування періоду імпульсів ГТІ 30 τ_2 з виходу блоку перемикання 28, ГТІ 30 продовжуватиме генерувати імпульси з періодом τ_1 (рис. 2.13 а). Це обумовлено впливом на час перезаряду RC-ланцюга ГТІ 30, який визначає період коливань генератора високого потенціалу, що поступає з виходу несправного елемента затримки часу. Таким чином, імпульс, позначений номером II (рис. 2.13 а), коли він подається на вхід блоку 57, на іншому вході якого вже присутній вихідний сигнал блоку перемикання 28, породжує появу на виході блоку 57 сигналу, що активує блок блокування і сигналізації 58

(рис. 2.13 д). Цей блок, через елементи І 13, 24, 42, 52, забороняє формування нової команди (рис. 2.13 б) та викликає сигналізацію несправності.



Рисунок 2.14 - Діаграма сигналів управління регулятора напруги при несправності електроприводу РПН

У випадку, коли з'являється команда "Збільшити" або "Зменшити" (рис. 2.14 б), і електропривід перебуває в режимі "Рух відсутній" (рис. 2.14 в), схема електроприводу не подає сигнал "Перемикання" (рис. 2.14 г) на вхід блоку перемикання 28. Таким чином, ГТІ 30 продовжує генерувати послідовність імпульсів з періодом τ_1 . Імпульс II ГТІ 30 (рис. 2.14 а), взаємодіючи з сигналом, що надходить від відповідного увімкненого підсилювача, викликає появу на виході блока 31 сигналу, який подається на вхід блоку блокування і сигналізації 58 (рис. 2.14 д). Цей блок, через елементи І 13, 24, 42, 52, блокує обидва тракти регулювання, скасовуючи команду та сигналізуючи про несправність.

3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ

Розглянемо структурну організацію каналу управління ТПР (рис. 3.1),
де: блоки 1, 3 – логічні компоненти "АБО";
2 – блок визначення знаку похідної дії діючого значення напруги на
навантаженні;

блоки 4, 14 – перетворювачі імпульсного сигналу в потенційний;

блоки 5, 15 – блоки часової затримки;

блоки 6, 16 – імпульсні елементи;

блоки 7, 17 – логічні компоненти "І";

блок 8 – електрична мережа;

блок 9 – вимірювальний канал реактивної потужності;

блок 10 – вимірювальний канал активної потужності;

блок 11 – масштабатор;

блок 12 – підсилювач;

блок 13 – пороговий блок;

блок 18 – електропривод пристрою перемикання відгалужень ТПР,

блок 19 – перемикальний пристрій.

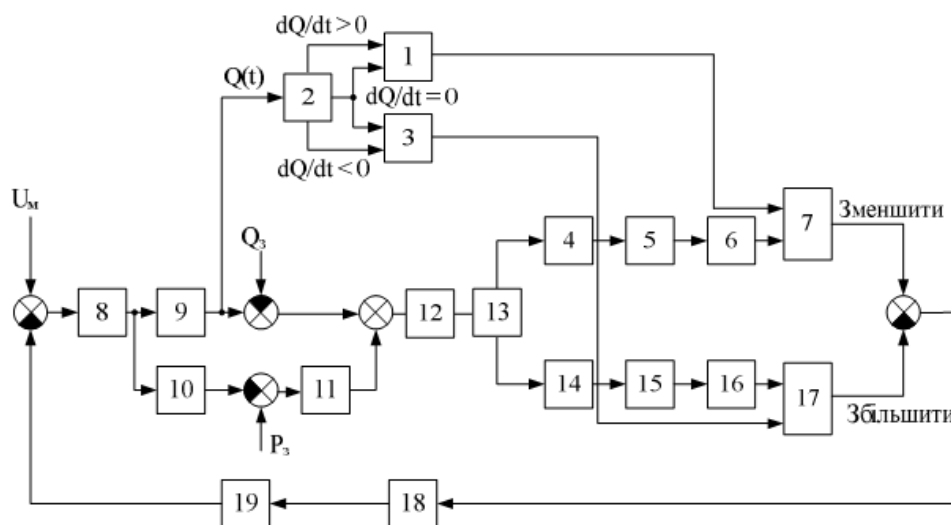


Рисунок 3.1 - Структурна схема каналу керування пристроєм РПН
автоматичного регулювання напруги силового трансформатора

Для аналізу стійкості системи використовують різноманітні критерії. Проте, вивчення стійкості системи автоматичного регулювання напруги силового трансформатора з пристроєм РПН шляхом звичайних критеріїв стійкості стає неможливим, бо вона має суттєво нелінійний характер [5]. Тому розгляд оцінки стійкості цієї системи слід поєднати з оцінкою якості її перехідних процесів, які у випадку стійкої системи є затухаючими. Зокрема, аналіз перехідного процесу в системі можна здійснити через її перехідну характеристику, вивчену при використанні максимальних можливих стрибків сигналу збурення. Таким чином, потрібно отримати графік перехідної характеристики $h(t)$. Як відомо, це функція, що відображає реакцію системи на одиничний ступінчатий вплив за нульових початкових умов, і її можна математично описати одиничною функцією:

$$l(t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } t \geq 0, \\ 0, & \text{якщо } t < 0. \end{cases} \quad (3.1)$$

Оскільки використання традиційних критеріїв стійкості є неможливим, для аналізу стійкості системи автоматичного регулювання необхідно використовувати комп'ютерне моделювання.

Для комп'ютерного моделювання ми використовували пакет прикладних програм (ППП) MatLab 5.2. Цей пакет дозволяє вирішувати різноманітні математичні задачі і включає програму Simulink, яка спрощує створення схем моделювання для вивчення систем і надає зручний візуальний спосіб отримання результатів моделювання.

Використання моделі дозволить швидко здійснити пошук оптимальних параметрів для налаштування регулятора при взаємодії з трансформаторними підстанціями різної потужності. Важливо визначити межі струмової компенсації в законі регулювання, різні рівні напруги та змінні вимоги до режиму мережі за потужністю. Допустимо, що така система регулювання застосована на підстанції 110/10 кВ. Для моделювання визначимо значення зони нечутливості регулятора на рівні $\pm 5\%$ згідно з [5] за напругою.

Система складається із вбудованого автоматичного регулятора, який керує положенням пристроїв РПН вольтододадового трансформатора поперечного регулювання та силового трансформатора відповідно до закону регулювання (2.3). Повна модель такої системи розроблена у середовищі Matlab Simulink із деталізацією на рівні елементів, відповідно до. Регулятор напруги має два входи для напруги (мережі та навантаження) і два входи для струму (також мережі та навантаження).

Оскільки струм мережі та струм навантаження визначаються значеннями активного та реактивного опорів ліній електропередач, а також споживачами (якщо знехтувати струмом холостого ходу трансформаторів), то в моделі системи регулювання для введення реальних значень струмів мережі та навантаження використовуються входи від блоків X та R, які задають значення відповідно реактивного та активного опорів навантаження та лінії електропередач, переведених до первинної обмотки трансформатора 110/10 кВ. Діючі та миттєві величини струмів мережі та навантаження визначаються у внутрішній структурі регулятора напруги. Модель системи регулювання зображена на рис. 3.2.

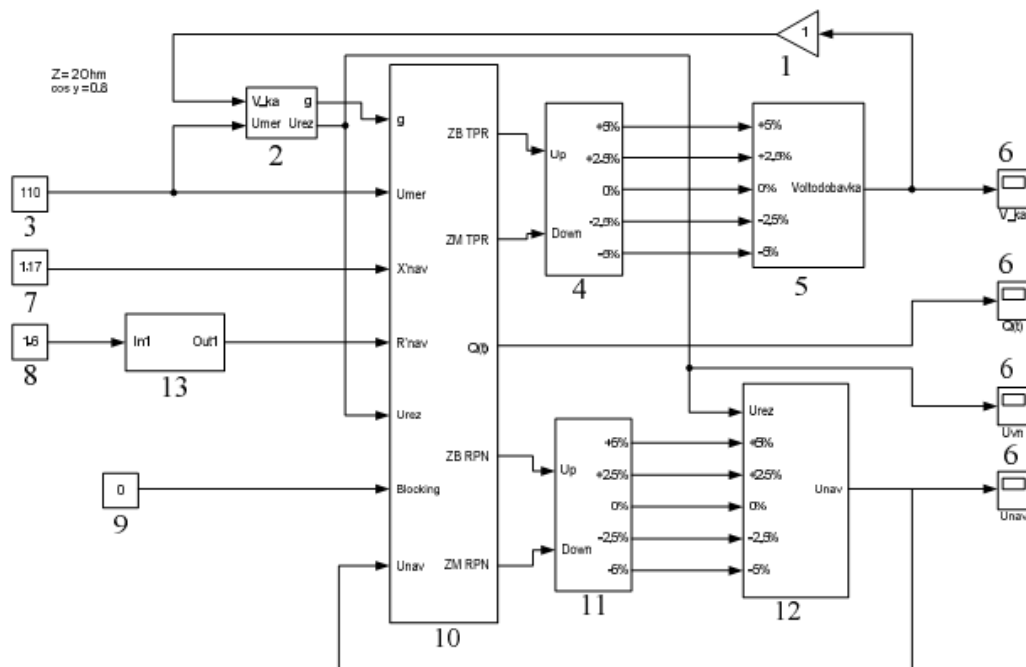
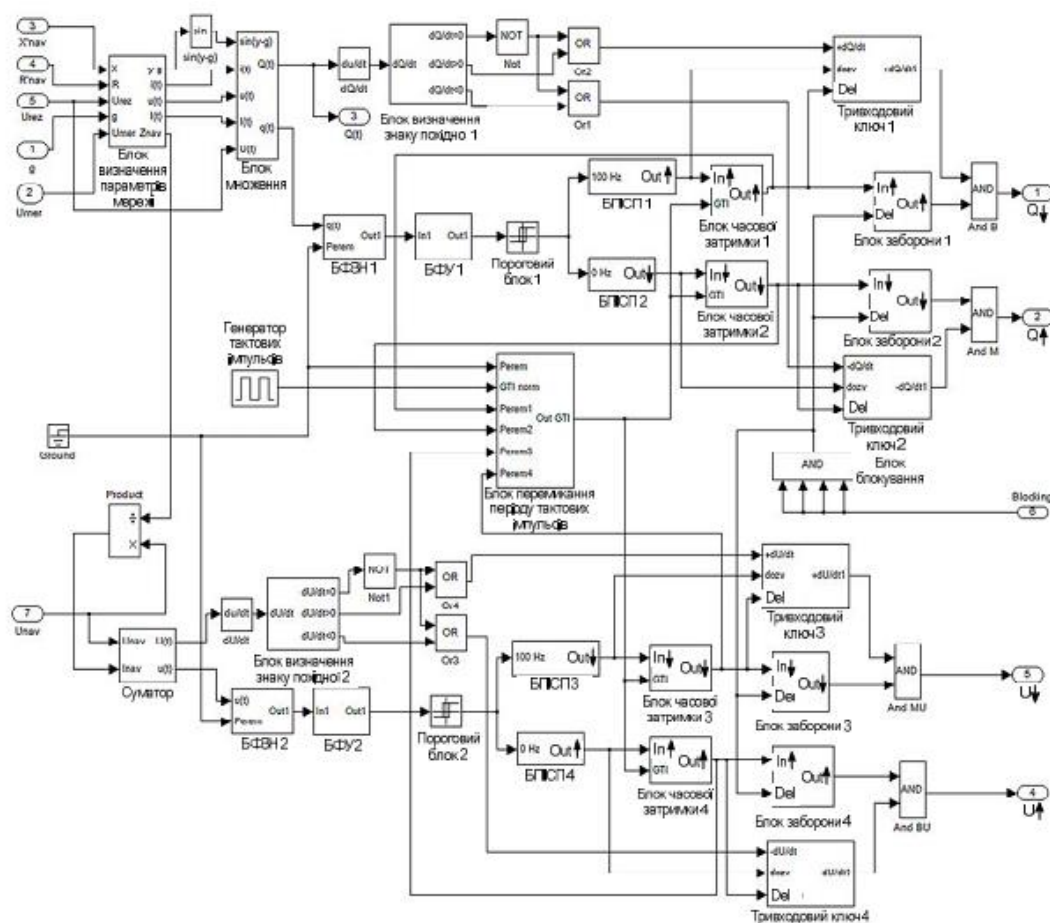


Рисунок 3.2 - Модель системи автоматичного керування трансформатором з поздовжньо-поперечним регулюванням напруги.

На рис. 3.2: блок 1 – введення коефіцієнту трансформації вторинного трансформатора ТПР; блок 2 – блок визначення результуючої напруги на первинній обмотці силового трансформатора; блок 3 – блок завдання значення напруги системи електропостачання; блок 4 – модель пристрою РПН ТПР; блок 5 – модель ТПР; блок 6 – блок спостереження вихідних параметрів системи; блок 7 – блок завдання значення приведенного реактивного опору навантаження до первинної обмотки силового трансформатора; блок 8 – блок завдання значення приведенного активного опору навантаження до первинної обмотки силового трансформатора; блок 9 – блок введення сигналу блокування роботи регулятора; блок 10 – модель регулятора; блок 11 – модель пристрою РПН силового трансформатора; блок 12 – модель силового трансформатора; блок 13 – модель введення ступеневого збурення в один із параметрів системи.

Модель регулятора напруги зображена на рис. 3.3. Вихідним сигналом регулятора являються імпульси на виходах логічних блоків І в блоці керування ТПР (And B та And M) та в блоці регулювання напруги навантаження (And MU та And BU).



Розроблена модель силового трансформатора (рис. 3.5), яка використовується з урахуванням коефіцієнта трансформації 110/10 кВ. Модель вольтодобаткового трансформатора ідентична силовому, за винятком коефіцієнта трансформації, який визначений на підставі стійкості системи регулювання напруги.

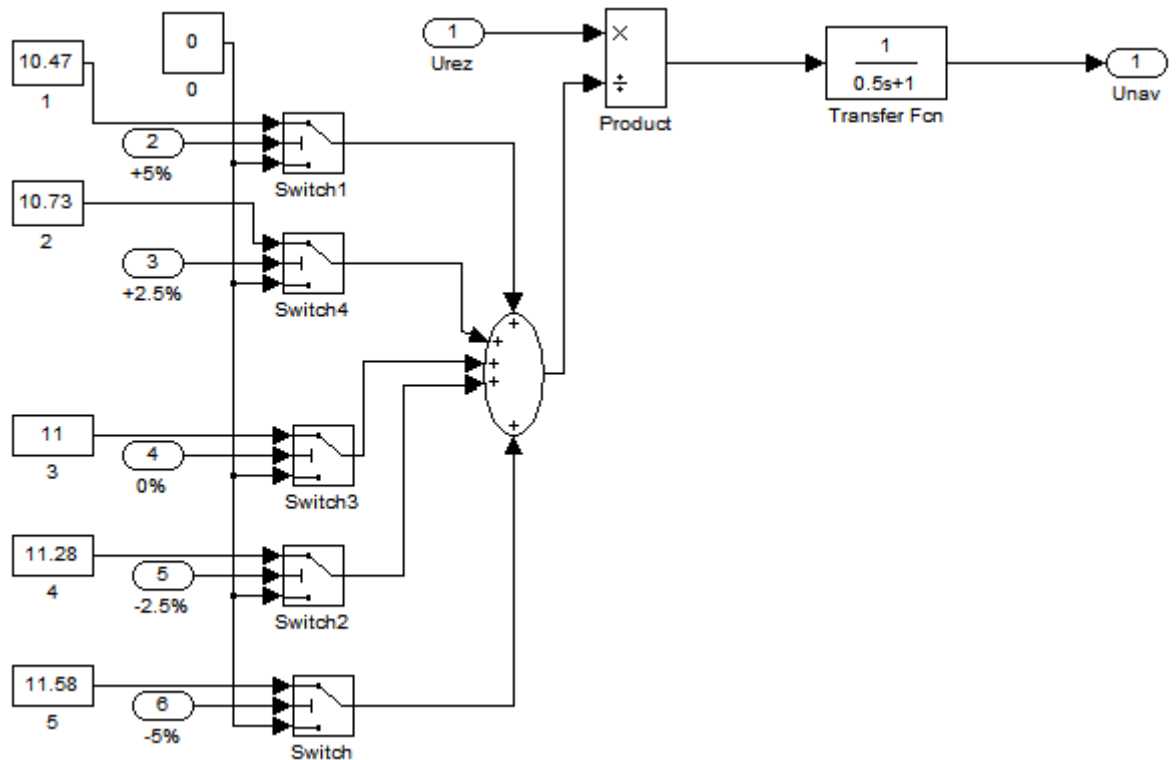


Рисунок 3.5 - Модель силового трансформатора із змінним коефіцієнтом трансформації Power transformer.

Для того, щоб врахувати вплив поперечного регулювання напруги на результуючу напругу, що подається на первинну обмотку силового трансформатора згідно з прийнятою структурою автоматичної системи регулювання, був доданий додатковий блок Sum U, який представлений на рис. 3.6. Введення поперечної складової напруги (сигнал V_{ka} , вольтодобавка, на рис. 3.2), яка випереджує напругу мережі на 90° ел., дозволяє отримати певний кут зсуву між результуючою напругою на первинній обмотці силового трансформатора та напругою мережі g . Цей кут зсуву змінюється в залежності від величини поперечної вольтодобавки.

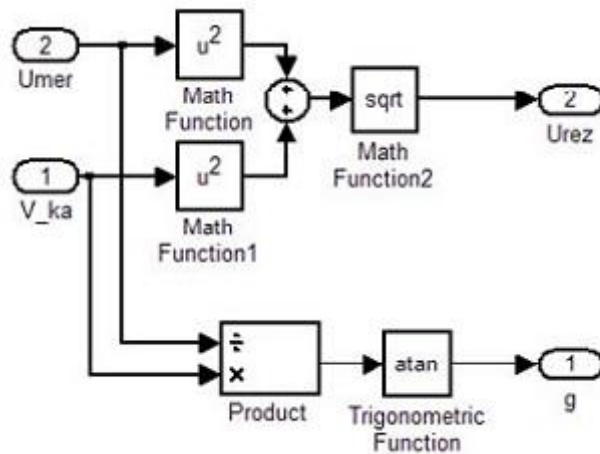


Рисунок 3.6 - Структура блоку Sum U для визначення результуючої напруги на первинній обмотці силового трансформатора

Результати моделювання представлені часовими графіками напруги мережі, напруги на навантаженні, реактивної потужності та вольтдобавки на рис. 3.7 – 3.10. Де: $U_{\text{мер}}$ – напруга мережі, кВ; $U_{\text{нав}}$ – напруга на навантаженні; $U_{\text{доб}}$ – напруга на виході трансформатора ТПР, кВ; Q – величина перетоку реактивної потужності на ділянці системи електропостачання, кВАр, $U_{\text{ВН}}$ – результуюча напруга на обмотцях ВН силового трансформатора, кВ.

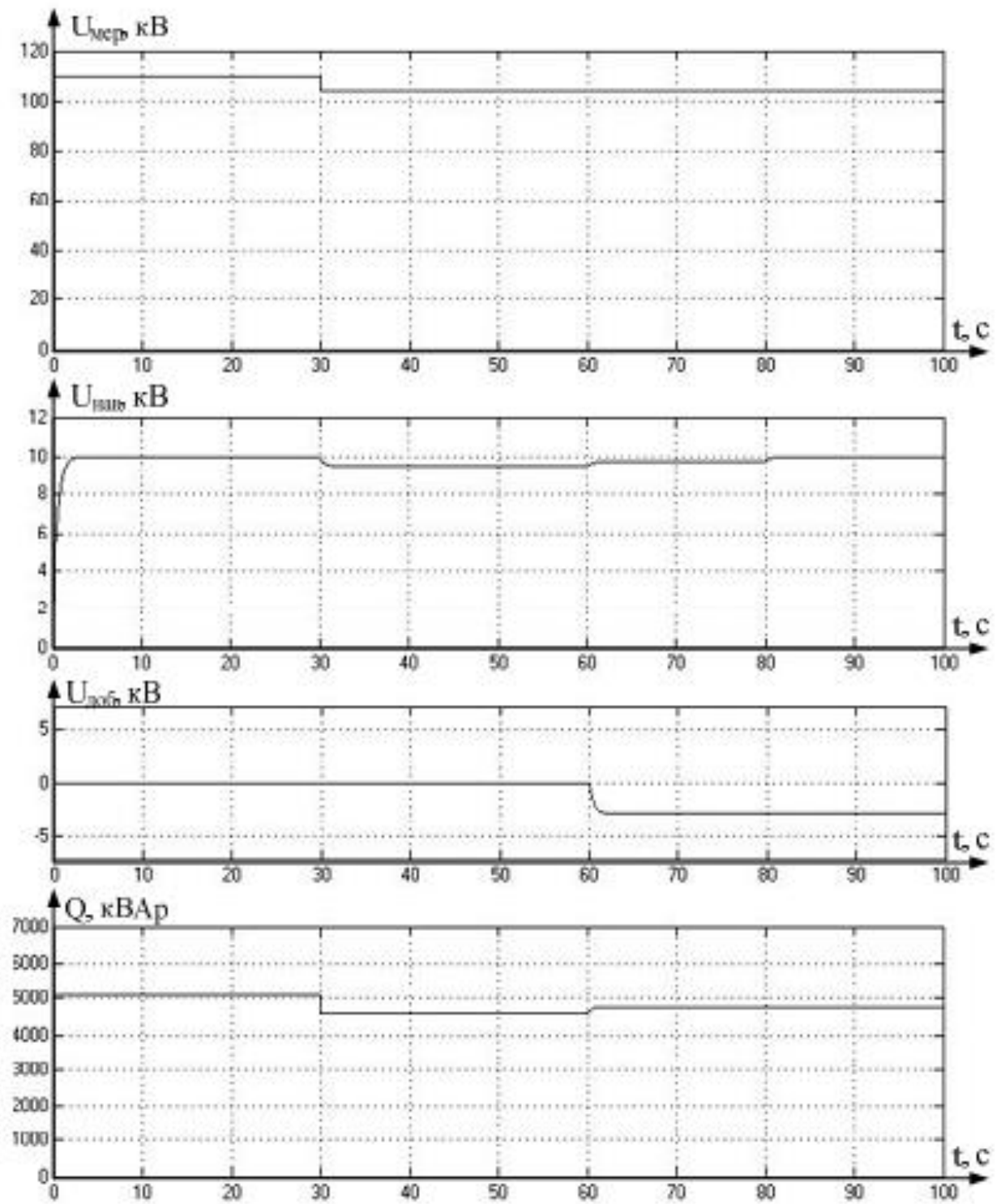


Рисунок 3.7 - Графіки роботи системи регулювання зі ступінчатою зміною напруги мережі від 110 до 102 кВ

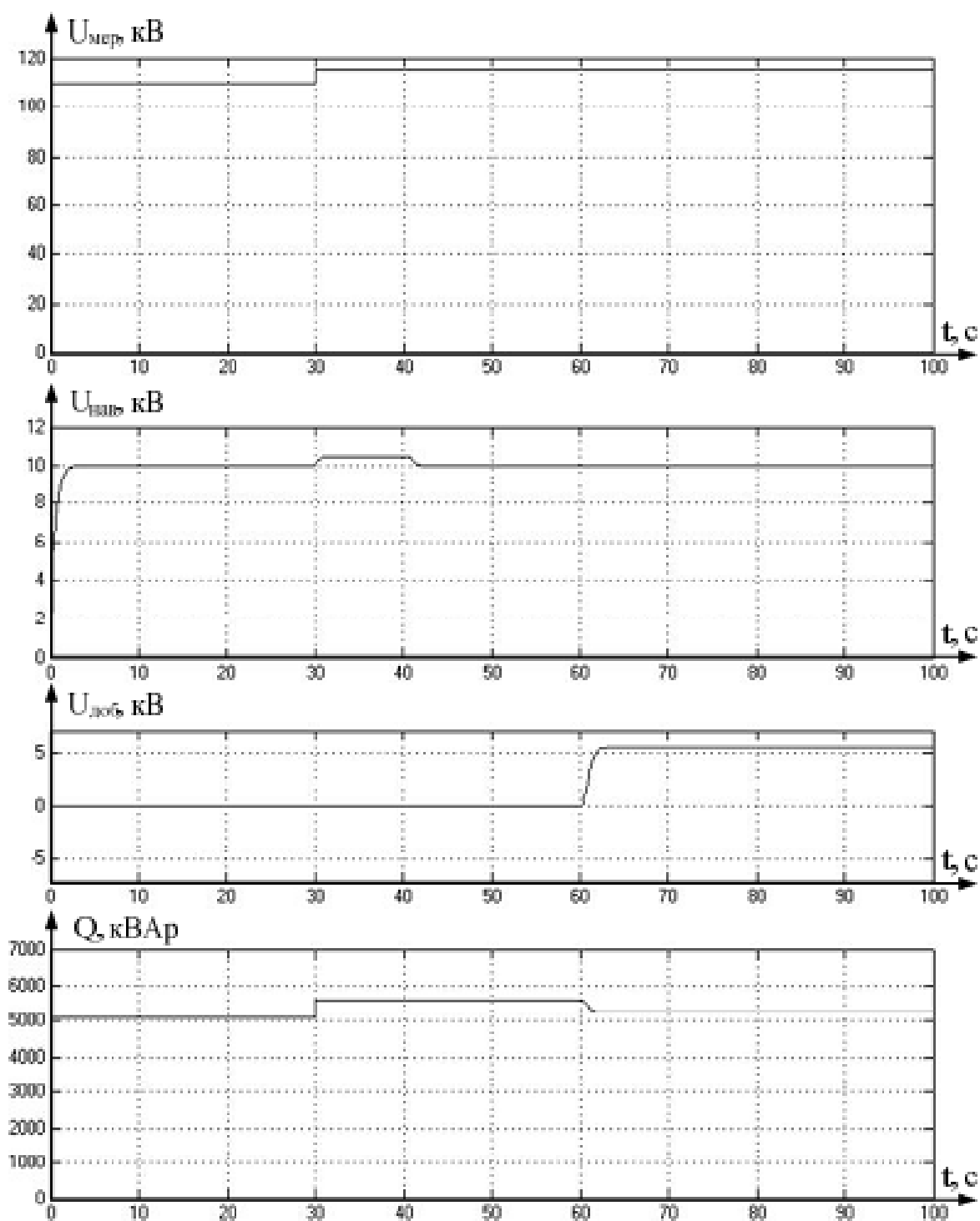


Рисунок 3.8 - Графіки роботи системи регулювання зі ступінчатою зміною напруги мережі від 110 до 114 кВ

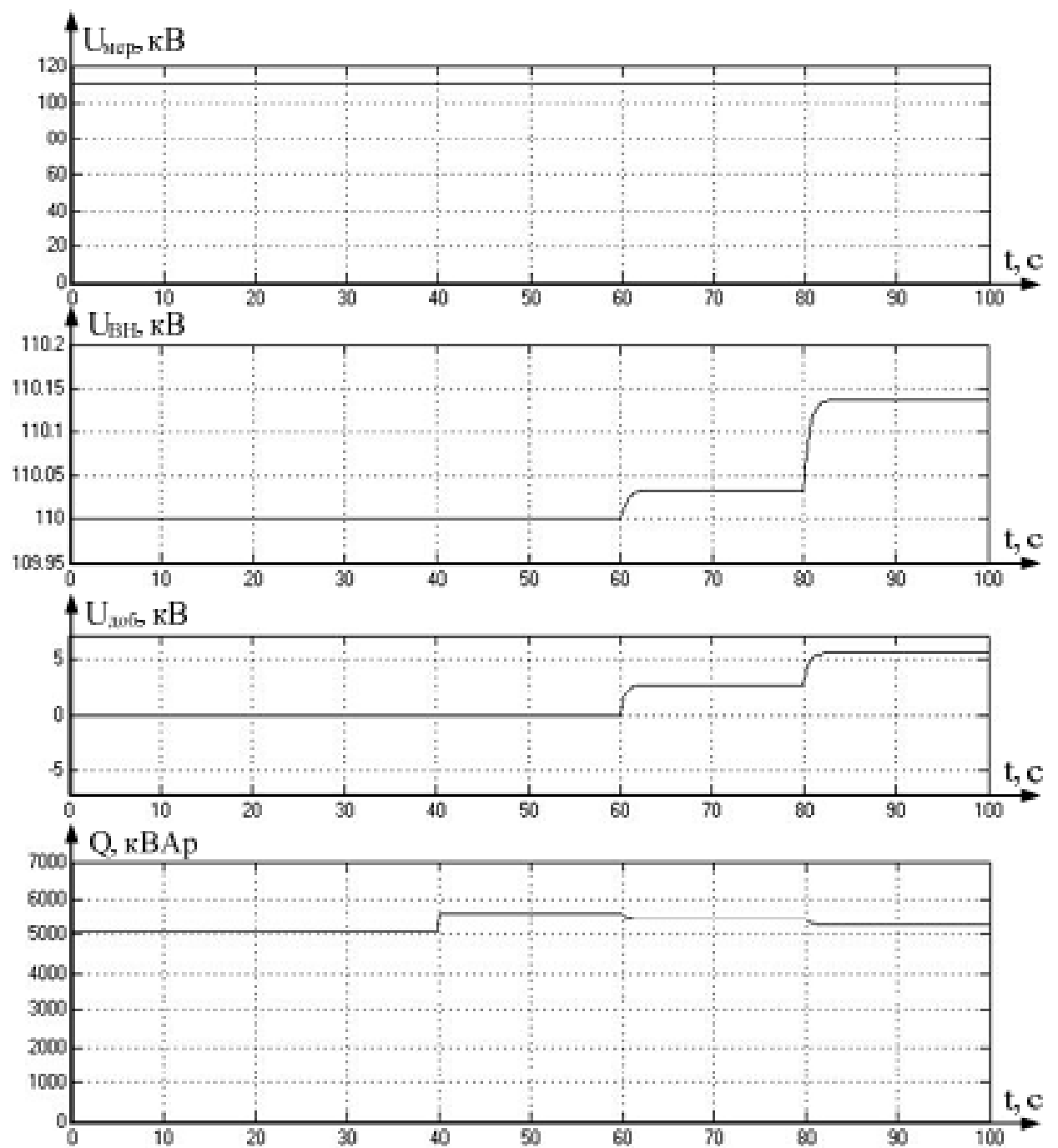


Рисунок 3.9 - Графіки роботи системи регулювання при накиді індуктивного навантаження.

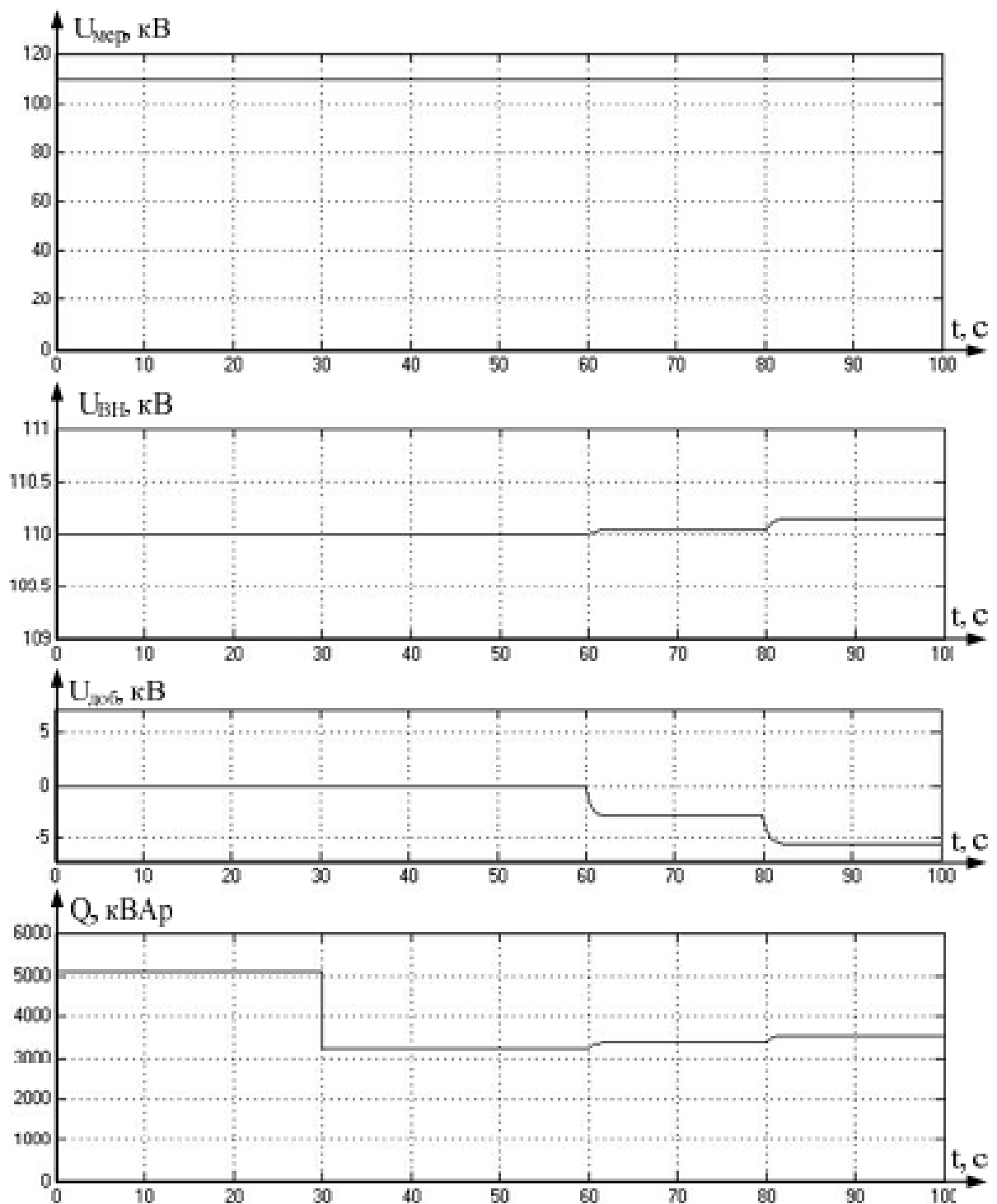


Рисунок 3.10 - Графіки роботи системи регулювання при значному зниженні індуктивного навантаження.

Моделювання виконується за допомогою вибраного методу обчислень ode45 (Dormand-Prince), який рекомендується для моделювання складних нелінійних систем. Для належного моделювання блоків перетворення

імпульсного сигналу в потенційний у вікні властивостей пакету Simulink необхідно вимкнути автоматичне визначення булевих логічних сигналів (Boolean logic signal – off).

Аналіз результатів моделювання дозволяє зробити висновок, що впровадження пропонованої системи регулювання напруги призводить до зменшення кількості перемикачів механічного пристрою РПН силового трансформатора, одночасно поліпшуючи режим мережі за потужністю. При цьому середнє значення напруги на навантаженні знаходиться в припустимих межах.

4. РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРАМИ ЗА ДОПОМОГОЮ МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ ТЕХНІКИ

4.1. Мікропроцесорний регулятор напруги для поздовжньо-поперечного регулювання.

Використання мікропроцесорної техніки у технологічних процесах неперервно збільшується. В даний час обчислювальна машина, будь то мікроконтролер чи комп'ютер, є основною складовою практично кожної системи автоматичного регулювання. Окрім основної функції - регулювання процесу, такі системи виконують широкий спектр сервісних завдань, таких як збір, зберігання та обробка інформації про об'єкт регулювання, передача цієї інформації на інші рівні системи управління (наприклад, на диспетчерський пульт) та інші.

У деяких системах для ефективного управління трансформатором використовують контроль за положенням перемикального пристрою. Це дозволяє наглядати за виконанням команд перемикання і вчасно виявляти вихід з ладу механізму пристрою РПН. Важливо відзначити, що застосування сучасної елементної бази дозволяє значно знизити вартість розробки та собівартість мікропроцесорного пристрою порівняно з аналоговим, при цьому ефективність системи вища. Технічно реалізована схема підключення регулятора, що працює за законом (2.2), до зовнішніх пристроїв представлена на рис. 4.1. Для вирішення визначених завдань згідно з цією схемою контролер повинен мати 12 дискретних входів, 3 аналогові входи та 4 дискретні виходи. Контролер Zelio SR3B261BD відповідає всім цим вимогам, був обраний як потужний і компактний.

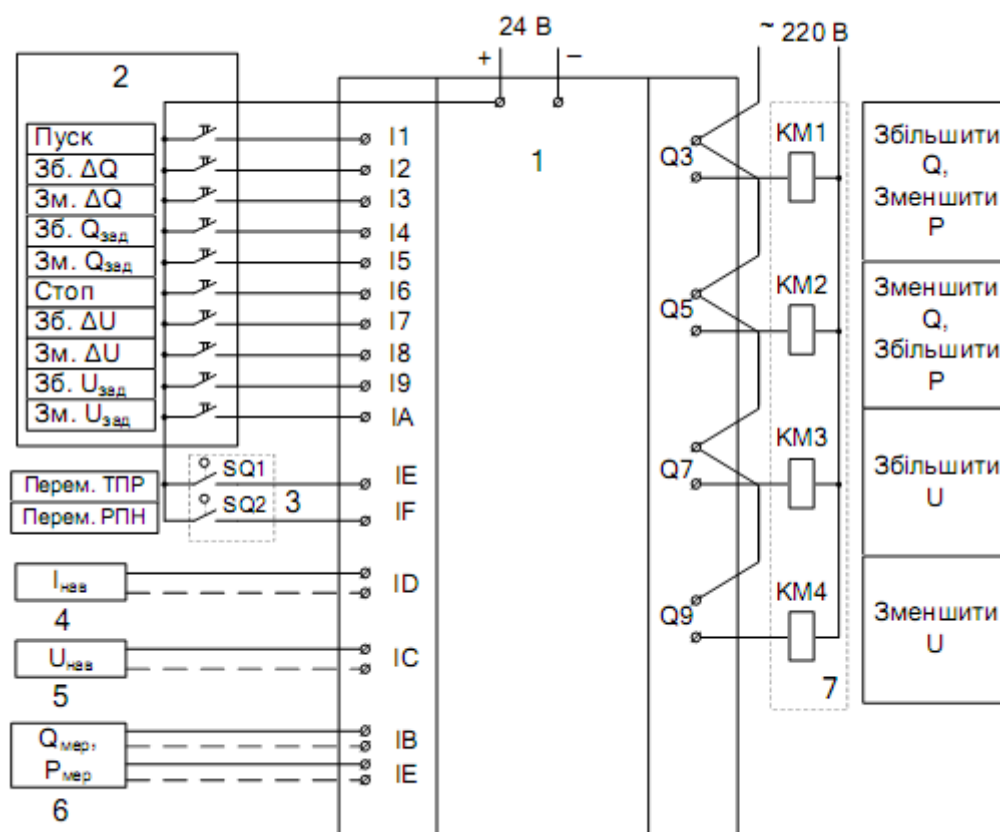


Рисунок 4.1 - Схема підключення мікропроцесорного регулятора до зовнішніх пристроїв системи автоматичного керування трансформаторами з поздовжньо-поперечним регулюванням напруги

На схемі: блок 1 - мікроконтролер Zelio SR3B261BD; 2 - блок управління на основі операторської панелі ХВТ РМ027, з якого подаються сигнали збільшення (Зб) або зменшення (Зм) параметру; 3 – датчики переключення пристроїв РПН трансформаторів; 4 – датчик струму навантаження підстанції із вихідним уніфікованим сигналом 0-10 В; 5 – датчик напруги на виводах споживачів, що має вихідний уніфікований сигнал 0-10 В; 6 – датчик потужності контрольованої ділянки системи електропостачання із вихідним уніфікованим сигналом 4-20 мА; 7 – контактори схем управління електроприводами РПН.

4.2. Розробка програмного забезпечення мікропроцесорного регулятора для системи поздовжньо-поперечного напруги.

Для використання контролера у ролі напругового регулятора було створено програму, використовуючи мову функціональних блоків FBD [6]. Лістинг програми контролера представлений на рис. 4.2. У програмі, за допомогою блоків таймерів B63, B64, B65 та B66, визначається затримка генерації сигналу для проведення перемикавання. Блоки порівняння Compare B05 – B07 та B55 – B58 визначають знак похідної в даний момент часу, порівнюючи сигнали від входів ID та IV з константою 5 В, яка задається блоком B06.

Інформація про знак похідної в момент формування сигналу перемикавання записується в тригери B70, B84 (щодо реактивної потужності) та B90, B96 (щодо напруги на споживачах). Ці тригери скидаються після проведення перемикавання, а сигнали від датчиків перемикавання подаються на входи IG та IH контролера як дискретні сигнали від датчиків перемикавання електроприводів РПН. Цей сигнал також використовується для скидання таймерів затримки генерації сигналу на перемикавання, що відбувається під час повернення програми в вихідне положення. У цьому випадку програма контролера переходить в вихідне положення незалежно від того, яким пристроєм було проведено перемикавання і який саме канал регулювання спрацював. Таким чином, сигнали від датчиків перемикавання об'єднуються в логічному блоку АБО B50 [6].

Функціональні модулі таймерів B72, B73, B75, B76, логічні компоненти АБО B77 та НІ B78, а також RS-тригер B103 втілюють генератор тактових імпульсів, який може працювати в режимі очікування (задіяні таймери B72 та B73) та в режимі перемикавання (таймери B75 та B76). Інтервал між тактовими імпульсами у режимі перемикавання більший, ніж у режимі очікування. Цей період є необхідним для завершення циклу перемикавання і залежить від розмірів та конструкції пристрою РПН.

З використанням архіваторів B105, B106 та B110, B111 виконано диференціацію каналів вимірювання напруги та реактивної потужності.

Лічильники Preset Count B36 та B44 використовуються для розрахунку області нечутливості регулятора щодо реактивної потужності та напруги на споживачах відповідно. Лічильники Preset Count B37 та B45 використовуються для встановлення заданих значень активної та реактивної потужностей та напруги на навантаженні. У суматорах B40, B42 та B47, B48 встановлюються верхні та нижні допустимі значення регульованих параметрів. За допомогою компараторів Compare B51 – B54 ці значення порівнюються з фактичними значеннями перетоку реактивної потужності і напруги на навантаженні, що надходять відповідно з блоків B01 та B61.

Останній блок функцій є суматором, де виконується розрахунок зниження напруги, враховуючи струм навантаження. Таким чином, входи суматора B61 з'єднані з аналоговими входами по напрузі B03 та по струму B04. У випадку виходу регульованого параметру за межі, передбачених областю, повинен генеруватися сигнал для відповідного перемикання пристрою РПН. Для того, щоб цей сигнал подавався безпосередньо на вихід контролера, необхідно, щоб відхилення параметра поза межі відбувалося навіть після встановленого часу затримки в таймерах B63, B64, B65 та B66, і при цьому параметр не мав тенденції повертатися в зону нечутливості (похідна регульованого параметру через час затримки дорівнює 0 або має знак, співпадаючий з напрямком виходу параметру за допустимі межі). Ця умова має перевірятися логічними блоками I B68, B82, B88 та B94.

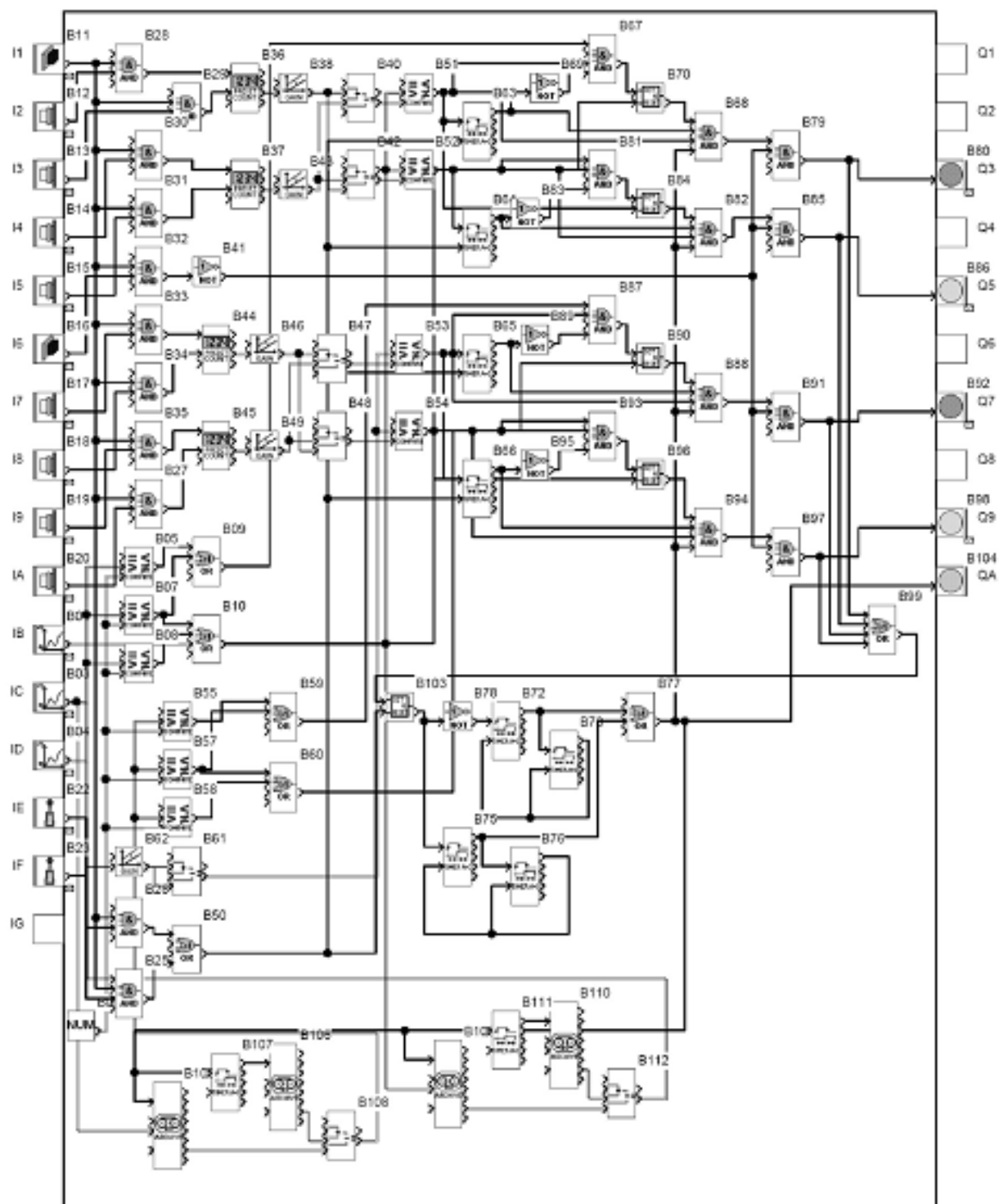


Рисунок 4.2 - Програма (FBD) мікропроцесорного регулятора напруги на базі контролера Zelio SR3B261BD

Блокування роботи пристрою здійснюється при надходженні на вхід І6 дискретного сигналу від панелі оператора (рис. 4.1).

4.3 Оцінка похибок вимірювальних каналів мікропроцесорного регулятора в системі поздовжньо-поперечного регулювання напруги.

Помилки, що характерні для вимірювальних каналів розробленого регулятора, можна класифікувати за їх джерелами виникнення. Кожен вимірювальний перетворювач має визначений клас точності і, відповідно, конкретну похибку. Функціональну схему каналів вимірювання, за допомогою якої проведено оцінку помилок, представлено на рис. 4.3.

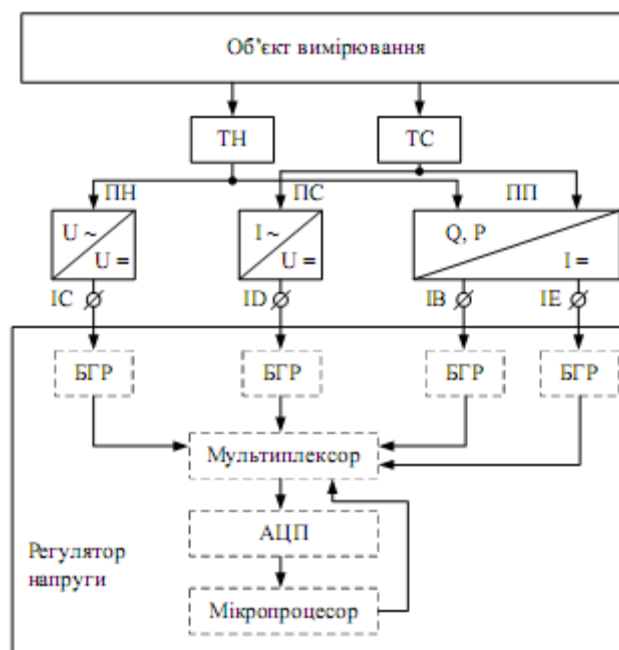


Рисунок 4.3 - Функціональна схема вимірювальних каналів регулятора в системі поздовжньо-поперечного регулювання напруги

На схемі ТН – вимірювальний трансформатор напруги; ТС – вимірювальний трансформатор струму; ПН – вимірювальний перетворювач напруги; ПС – вимірювальний перетворювач струму; ПП – вимірювальний перетворювач потужності; БГР – блоки гальванічної розв'язки контролера; IV, IC, ID – аналогові входи контролера.

4.3.1. Похибки вимірювальних трансформаторів струму та напруги.

В вимірювальних каналах системи регулювання напруги у умовах дефіциту реактивної потужності значущу роль відіграє точність первинних вимірювальних трансформаторів напруги та струму. Похибки цих пристроїв визначаються струмами намагнічування та характером навантаження. Специфічно розрізняють похибки за напругою (для трансформаторів напруги) та струмові (для трансформаторів струму), а також кутову похибку, що характерна для обох видів вимірювальних трансформаторів [6]. Похибки трансформаторів струму (струмова та кутова) обумовлені наявністю струму намагнічування та розраховуються за формулами:

$$\delta_{I_n} = \frac{33.8 \cdot l_m \cdot z_2^{0.6} \cdot I_{2n}^{1.2}}{\left(\frac{I}{I_{1n}}\right)^{0.4} \cdot f^{0.6} \cdot F_{1n}^{1.6} \cdot S_m^{0.6}} \cdot \sin(\psi + \alpha) \cdot 100\% \quad (4.1)$$

де l_i – середня довжина магнітного потоку у магнітопроводі, м;

z_2 – опір гілки вторинного струму (повний опір вторинного ланцюга і вторинної обмотки), Ом;

f – частота струму, Гц;

S_i – дійсний перетин магнітопроводу;

ψ – кут втрат, рад.;

α – кут зсуву фаз між вторинною ЕРС та струмом I_2 , рад.;

I_{1i}, I_{2i} , – номінальні струми відповідно первинної та вторинної обмоток трансформатора струму, F_{1i} – номінальна магніторушійна сила первинної обмотки, А·витків.

Кутова похибка:

$$\delta = \frac{1193.32 \cdot I_M \cdot z_2^{0.6} \cdot I_{2n}^{1.2}}{\left(\frac{I}{I_{1n}}\right)^{0.4} \cdot f^{0.6} \cdot F_{1n}^{1.6} \cdot S_M^{0.6}} \cdot \cos(\psi + \alpha) \cdot 100 \% \quad (4.2)$$

Величини похибок трансформаторів струму значущо впливають основним чином на їхнє завантаження струмом та опір вторинного кола. Граничні значення струмових і кутових похибок трансформаторів струму для вимірювань (згідно з ДЕСТ 7746-89) наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Струмові та кутові похибки вимірювальних трансформаторів струму.

Клас точності ТС	Первинний струм, % від номінального	Найбільша похибка			Вторинне навантаження, в % від номінального, при $\cos \varphi_2=0,8$
		Струмова,%	кутова		
			Мін.	Град.	
0,2	5	±0,75	±30	±0,9	25-100
	10	±0,50	±20	±0,6	
	20	±0,35	±15	±0,4	
	100-200	±0,20	±10	±0,3	
0,5	5	±1,5	±90	±2,5	
	10	±1,0	±60	±1,7	
	20	±0,75	±45	±1,35	
	100-200	±0,5	±30	±0,9	

Результати обчислення кутових та струмових похибок трансформаторів типу ТПОЛ 600 класу точності 0.5, здійснені за формулами (4.1) та (4.2), відображені на рисунках 4.4 та 4.5 відповідно. На графіках тонка лінія відображає розрахункову криву, а жирна лінія представляє апроксимацію. Форма апроксимуючого виразу та критерій узгодження розрахункової і апроксимуючої кривих також представлені на зазначених рисунках.

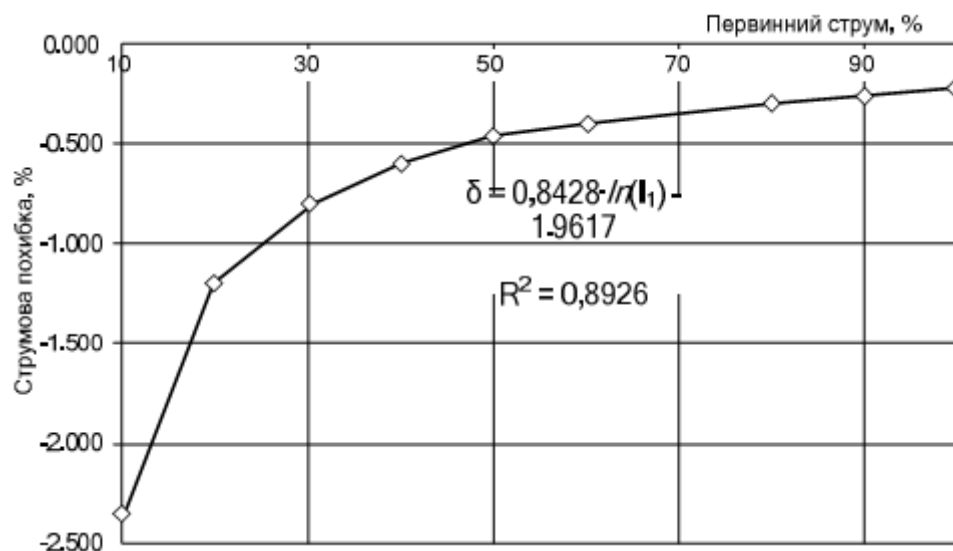


Рисунок 4.4 - Залежність струмової похибки трансформатора струму ТПОЛ 600 від первинного струму.

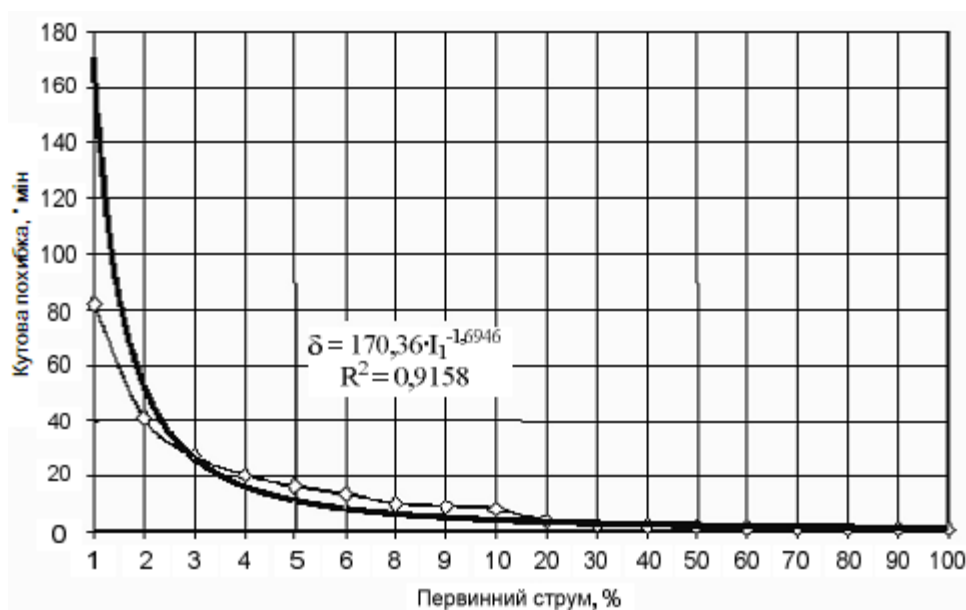


Рисунок 4.5 - Залежність кутової похибки трансформатора струму ТПОЛ 600 від первинного струму.

Для діапазонів вимірювання (1 – 10 % та 10 – 100 %) первинного струму від номінального значення математичні моделі струмової похибки найпоширеніших трансформаторів струму мають вигляд (табл. 4.2):

Іншим джерелом похибок вимірювальних каналів являється трансформатор напруги. В такому пристрої похибка обчислюється за виразом (4.3)

$$\delta_U = \delta_{U_H} + \delta_{U_X} \quad (4.3)$$

де δ_{U_H} – похибка за напругою, обумовлена струмом навантаження, %; δ_{U_X} – похибка за напругою, яка обумовлена струмом холостого ходу, %.

Таблиця 4.2 - Математичні моделі струмових похибок трансформаторів струму.

Тип трансформатора струму	Струмова похибка δ_1 [%] для $1\% < I_1 < 10\%$	Струмова похибка δ_1 [%] для $10\% < I_1 < 100\%$
ТПОЛ10-600	$\delta_1 [\%] = 0,843 \cdot \ln(I_1^*) - 1,962$	$\delta_1 [\%] = 0,084 \cdot \ln(I_1^*) - 0,392$
ТЛШ10-2000	$\delta_1 [\%] = 0,723 \cdot \ln(I_1^*) - 1,682$	$\delta_1 [\%] = 0,072 \cdot \ln(I_1^*) - 0,335$
ТПШФД10-3000	$\delta_1 [\%] = 0,599 \cdot \ln(I_1^*) - 1,226$	$\delta_1 [\%] = 0,059 \cdot \ln(I_1^*) - 0,111$

УВикористовуючи векторну діаграму трансформатора напруги, можна виразити наступним чином:

$$\delta_{U_H} = -100 \cdot I_2 \cdot \left[(r_1' + r_2) \cdot \cos \varphi_2 + x \cdot \sin \varphi_2 \right] / U_2 \quad (4.4)$$

$$\delta_{U_X} = -100 \cdot (I_a' \cdot r_1' + I_p' \cdot x_1') / U_2 \quad (4.5)$$

де U_2 – напруга вторинної обмотки трансформатора, В; I_a' – активна складова струму х.х., приведена до вторинної обмотки трансформатора, А; r_1' –приведений опір первинної обмотки трансформатора до вторинної обмотки, Ом; I_p' – приведена реактивна складова струму х.х. трансформатора до вторинної обмотки, А; x_1' – реактивний опір первинної обмотки трансформатора, приведений до вторинної обмотки

трансформатора, Ом; I_2 – струм навантаження, А; r_2 – опір вторинної обмотки, Ом; $\cos \varphi_2$ – коефіцієнт потужності, в.о.; x – індуктивний опір трансформатора, Ом.

Кутова похибка трансформатора напруги визначається згідно виразу (4.6).

$$\delta' = \delta'_x + \delta'_n \quad (4.6)$$

де δ'_x – кутова похибка, що обумовлена струмом холостого ходу;

δ'_n – кутова похибка, що обумовлена струмом навантаження.

Складові кутової похибки обчислюються наступним чином:

$$\delta'_x = \frac{3440 \cdot (I_p' - I_a')}{U_2} \quad (4.7)$$

$$\delta'_n = \frac{3440 \cdot I_2 \cdot [(r_1' + r_2) \cdot \sin \varphi_2 - x \cdot \cos \varphi_2]}{U_2} \quad (4.8)$$

Величина вторинного навантаження I_2 вважається основним фактором, що впливає на похибку трансформатора напруги, як показано на рисунках 4.6 і 4.7.

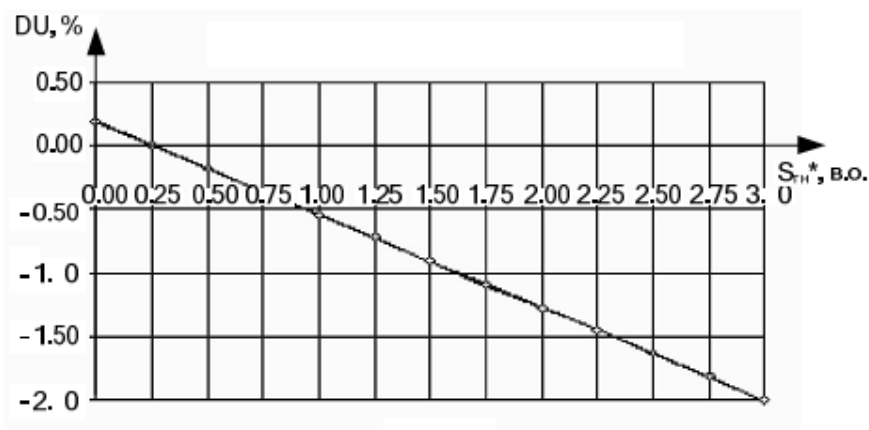


Рисунок 4.6 - Графік залежності похибки трансформатора напруги від навантаження

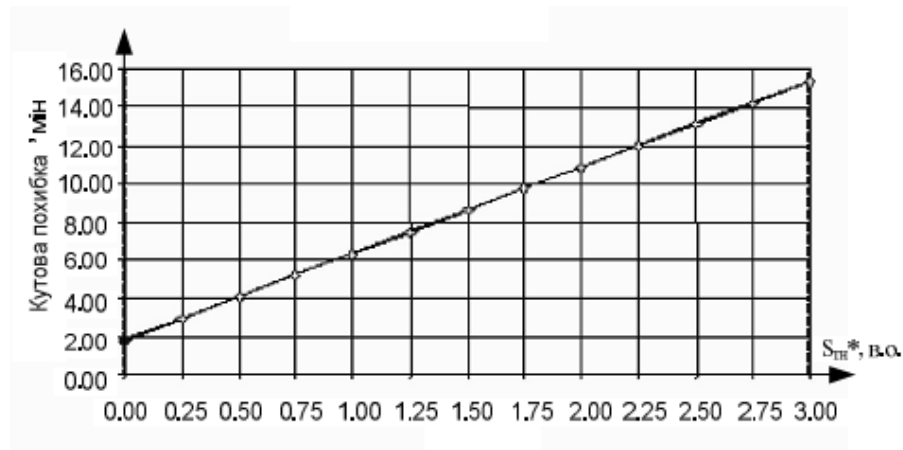


Рисунок 4.7 - Графік залежності кутової похибки трансформатора напруги від навантаження

Залежність похибки трансформатора напруги от коефіцієнта завантаження за потужністю (відношенням фактичного навантаження вторинної обмотки тр-ра напруги до номінального значення навантаження) має наступний вигляд (4.9)

$$\delta_U[\%] = -0.73 \cdot K_3 + 0.35 \quad (4.9)$$

де $\hat{E}_\zeta$ – завантаження трансформатора напруги по вторинній обмотці, в.о.

4.3.2. Похибки вимірювальних перетворювачів напруги, струму та потужності.

Для передачі даних до мікропроцесорного контролера потрібно адаптувати вихідні сигнали трансформаторів струму та напруги до діапазону вхідних сигналів контролера, який враховує аналогові входи з діапазоном 0 – 10 В постійної напруги та 0 – 5 мА постійного струму. Крім похибок вимірювальних трансформаторів, необхідно узгодити похибки, що вносяться вимірювальними перетворювачами змінної напруги, струму та потужності до вимірювальних каналів регулятора напруги. Вимірювальні перетворювачі відрізняються за принципом вимірювання, включаючи частотно-імпульсні та часо-імпульсні, а також кодуючі (з цифровим вихідним сигналом)

перетворювачі, побудовані на операційних підсилювачах тощо. На сьогоднішній день доступні промислові вимірювальні перетворювачі з нормованою похибкою вимірювальних каналів.

Оцінка точності вимірювальних перетворювачів в системі регулювання напруги вирішується вибором таких перетворювачів, які відповідають необхідній точності вимірювань. Основна похибка по кожному каналу не повинна перевищувати 0,5 % від діапазону зміни вихідного сигналу. Згідно з таблицею 4.3, підходять триканальні вимірювальні перетворювачі напруги ТІТ-865/3 та струму ТІТ-265/3, а також перетворювач активної та реактивної потужності ЕП8530/4. При цьому навантаження на трансформатори напруги з цими вимірювальними перетворювачами гарантується виробником не більше $0,5 \cdot S_n$, що відповідає максимальній основній похибці $\gamma_{TH} = 0,25 \%$ (рис. 4.4), а основна похибка перетворювача складає $\gamma_{пч} = 0,25 \%$ відповідно. Для визначення основної похибки вимірювального трансформатора струму типу ТПШФД10-3000/5 використовуємо аналітичний вираз, приймаючи навантаження 0,75 від номінального (таблиця 4.2).

$$\gamma_{тс} = 0,0597 \cdot \ln(0,75) - 0,1111 = 0,128 \%$$

Головна похибка вимірювального перетворювача струму типу ТІТ-265/3 складає 0,25 % [6].

4.3.3. Похибки аналогово-цифрового перетворювача.

При виході виміряного значення напруги за межі поля допуску, регулятор напруги автоматично викликає команду на проведення перемикання пристрою РПН у відповідному напрямку. Результат вимірювання виражається як сума залежних випадкових величин вимірюваного параметра і похибки вимірювання.

$$U_{в} = U + T + \Delta_U + m(\Delta_U) \quad (4.23)$$

Виміряні значення напруги на навантаженні описуються гістограмою імовірностей напруги на навантаженні, яка зображена на рис. 4.8.

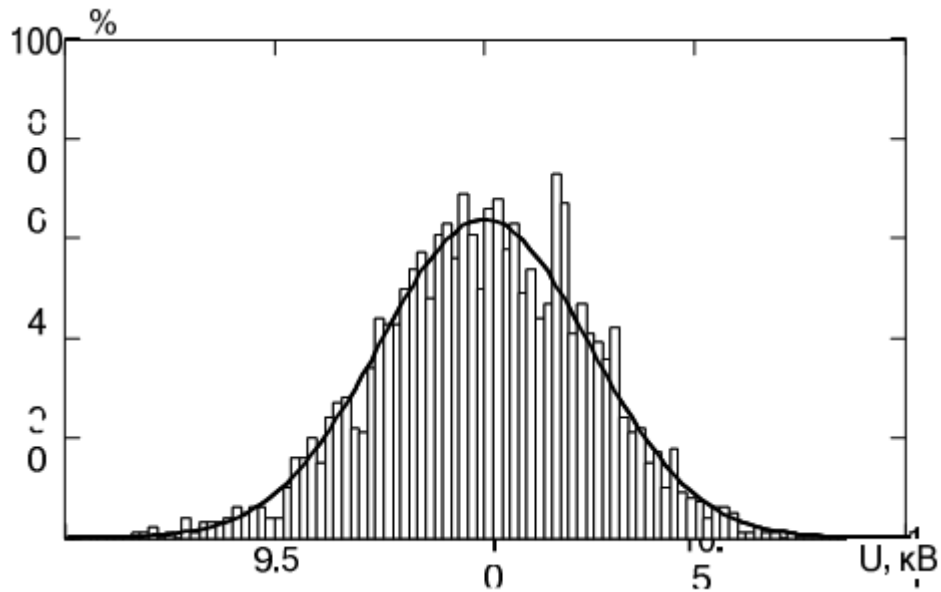


Рисунок 4.8 - Гістограма виміряного значення напруги в мережі 10 кВ

Згідно з формою гістограми приймається нормальний закон розподілу як закон розподілу напруги:

$$P(U) = \frac{1}{\sigma_U \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(U - m(U))^2}{2\sigma_U^2}\right) \quad (4.10)$$

де U – заміряне значення напруги, $m(U)$ – математичне сподівання виміряної напруги, σ_U – середнє квадратичне відхилення виміряної напруги.

Розподіл похибки в вимірювальному каналі напруги формується шляхом згортання трикутного закону розподілу похибки трансформатора напруги і рівномірного закону розподілу похибки вимірювального перетворювача напруги. Композиція цих законів розподілу визначається інтегралом згортання.

$$p(y) = \int_{-\infty}^{\infty} p_1(y-x) \cdot p_2(x) dx, \quad (4.11)$$

де $p(y)$ - закон розподілу результуючий (згортка), $p_1(x)$ та $p_2(x)$ - закони розподілу початкові.

Загальний закон розподілу напруги та похибки її вимірювання буде мати наступний вигляд:

$$P_U(T, P) = \frac{1}{\sigma_U \sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{(T - M_U)^2}{2\sigma_U^2} \right) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} p_{\text{тр}}(Q) \cdot p_{\text{тр}}(P - Q) \cdot dQ \quad (4.12)$$

де T – межі зміни вимірюваного значення напруги, P – межі зміни похибки вимірювання напруги трансформатором. Q – межі зміни похибки вимірювання напруги перетворювачем, M_U – математичне сподівання вимірюваної напруги, σ_U – середнє квадратичне відхилення (СКВ) вимірюваної напруги, $\sigma_{\text{дв}} - \text{СКВ похибки вимірювання напруги.}$

Графічне зображення сумісного закону розподілу приведено на рис. 4.9.

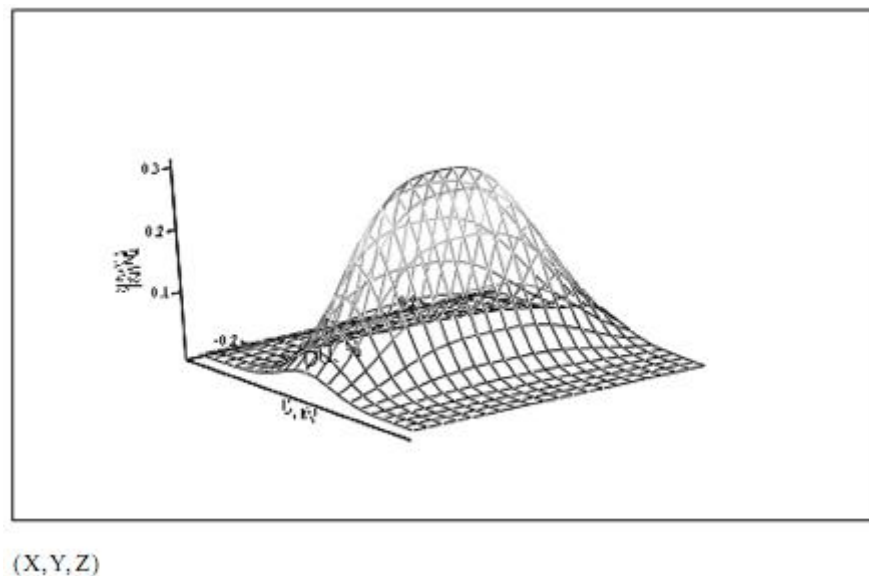


Рисунок 4.9 - Графічне представлення сумісного закону розподілу вимірювання напруги і його похибки

Імовірності помилок першого та другого роду для розрахункового середньоквадратичного значення похибки визначаються відповідно до

основних похибок, які вказані в паспортних даних вимірювального трансформатора та перетворювача

$$\alpha(\sigma_{\text{вим}}) = 0,007432; \quad \beta(\sigma_{\text{вим}}) = 0,026$$

Імовірність безпомилкового формування сигналу для проведення перемикання пристроєм РПН визначається середньоквадратичним значенням похибки каналу вимірювання напруги:

$$D = 1 - \alpha(\sigma_{\text{вим}}) - \beta(\sigma_{\text{вим}}) \quad (4.13)$$

$$D = 1 - 0,007432 - 0,026 = 0,967$$

Так, у розробленому пристрої імовірність безпомилкової роботи становить 0,967.

5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ

Впровадження пристроїв для управління компенсацією реактивної потужності необхідно обґрунтувати економічною ефективністю нового устаткування:

Застосування систем регулювання реактивної потужності має економічне підґрунтя. Економічна ефективність впровадження підтверджується наступними фактами:

- 1) оптимізується робота обладнання і покращується ефективність електроенергетичної системи;
- 2) скорочуються втрати потужності в системі електропостачання;
- 3) знижується плата за реактивну потужність;
- 4) знижується струм, який проходить по лініях електропередач;
- 5) зменшується навантаження на трансформатори та інші електроенергетичні пристрої, що впливає на їхню тривалість служби та знижує ризик витрат на ремонт та обслуговування.

Нове устаткування включає в себе встановлення пристрою для плавного регулювання, що функціонує як еквівалент конденсаторної батареї. Цей пристрій призначений для компенсації реактивної потужності, а зменшення споживання реактивної потужності призводить до підвищення коефіцієнта потужності.

У конкретному випадку використовується асинхронний двигун із номінальною потужністю 200 кВт. Важливо враховувати, що на підприємствах реактивної потужності головним чином використовуються: приблизно 65—70% - асинхронні двигуни, близько 20—25% - трансформатори, і близько 10% - повітряні електричні мережі та інші пристрої (такі як реактори, індуктивні прилади і т.д.).

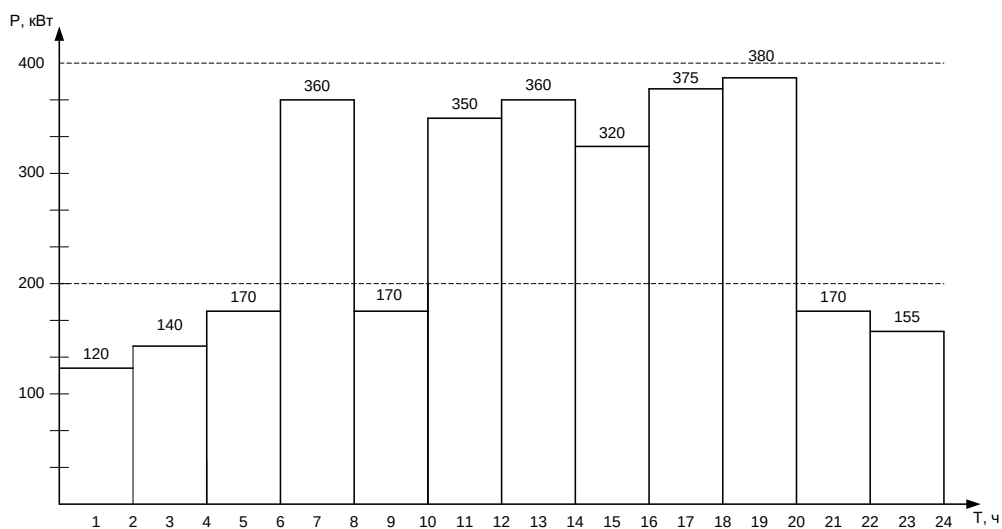
Цей розподіл використання реактивної потужності служить важливим вказівником при плануванні та обслуговуванні насосних станцій, дозволяючи

оптимізувати їхню роботу відповідно до конкретних вимог і умов водопостачання для населених пунктів.

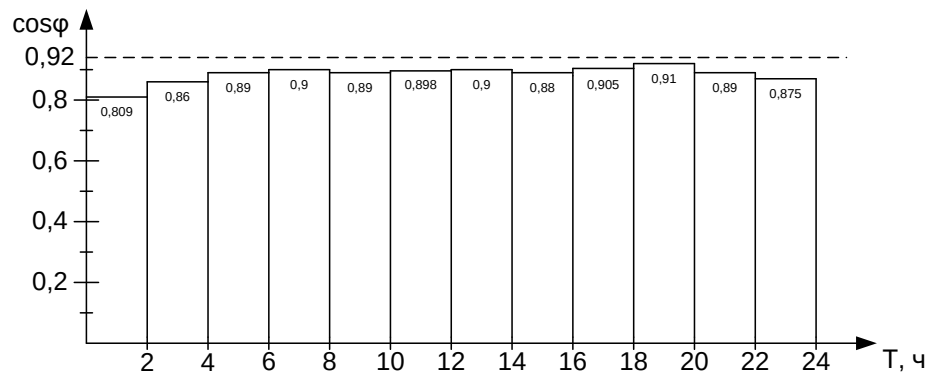
Величина споживання асинхронними двигунами реактивної потужності залежить від коефіцієнта завантаження двигуна і від номінального коефіцієнта потужності двигунів.

Для розрахунку кількості зекономленої електроенергії при зменшенні втрат потужності за використання системи компенсації реактивної потужності, слід врахувати, що насосна станція не завжди працює в номінальному режимі через непостійне споживання води протягом доби.

Аналіз графіка роботи показує, що завантаженість насосів протягом доби нерівномірна, і не завжди обидва насоси працюють одночасно. При різному завантаженні насоса значення реактивної та активної потужності будуть змінюватися, і ця залежність не є лінійною. Це призводить до зміни значень коефіцієнтів потужності ($\cos \varphi$) на кожному проміжку часу. Зміни в потужності споживання відображаються на зміні значень реактивних і активних складових потужності, як показано на графіку зміни на рисунку 5.2. Дані зміни дозволяють оцінити економію електроенергії при використанні системи компенсації реактивної потужності в умовах незавершеного навантаження та непостійної роботи насосів.



Рисунку 5.1 – Графік електроспоживання протягом доби.



Рисунку 5.2 – Зміна $\cos\varphi$ відповідно до часу доби.

На насосній станції компенсація реактивної потужності здійснюється на ділянці від насоса до розподільного пристрою. Таким чином, розрахунок економії втрат потужності проводиться лише для цієї ділянки, як зображено на рисунку 5.3. Для визначення втрат потужності в системі електропостачання на кожному інтервалі часу враховується те, що компенсована потужність досягатиме значення $\cos\varphi = 0.99$.

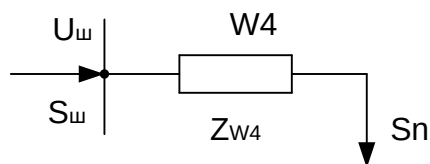


Рисунок 5.3 – Схема заміщення ділянки.

Розрахуємо втрати потужності для кабельної лінії ділянки W4:

$$\Delta P = \frac{(P_{роз}^2 + (Q_{роз} - Q_{БАЗ})^2) \cdot R_{W4}}{U^2}, \quad (5.1)$$

де $R_{W4} = 0.078 \text{ Ом}$;

$Q_{БАЗ}$ - величина бажаної реактивної потужності, яку потрібно компенсувати для отримання $\cos\varphi = 0.99$;

$P_{роз}, Q_{роз}$ - розрахункові величини активної та реактивної потужності.

$$\Delta Q = \frac{(P_{роз}^2 + Q_{роз}^2 - Q_{БАЗ}^2) \cdot X_{W4}}{U^2}, \quad (5.2)$$

де $X_{w4} = 1.8 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$

Бажана реактивна потужність насосної станції визначається з виразу:

$$Q_{БАЗ} = Qi_{роз} - \sqrt{\frac{Pi_{роз}^2}{\cos^2 \varphi_{БАЗ}} - Pi_{роз}^2}, \quad (5.3)$$

де $\cos \varphi_{БАЗ} = 0,99$

$$Q_{БАЗ} = 250 - \sqrt{\frac{310^2}{0,99^2} - 310^2} = 206 \text{ кВАр}$$

З урахуванням потужності, яка компенсується, обчислюємо втрати потужності:

$$\Delta P = \frac{(310^2 + (250 - 206)^2) \cdot 0,078}{0,4^2} = 47,8 \text{ Вт}$$

$$\Delta Q = \frac{(310^2 + (250 - 206)^2) \cdot 1,76 \cdot 10^{-3}}{0,4^2} = 0,52 \text{ ВАр}$$

Зменшення струму мережі приводить до зменшення падіння напруги в лінії L3 та згідно закону Ома складає:

$$\Delta U_{L3} = \sqrt{3} I_i \cdot Z, \quad (5.4)$$

де I_i - струм для i – того інтервалу часу кабельної лінії;

Z - повний опір кабельній лінії.

$$I_i = \frac{\sqrt{P_{роз}^2 + Q_{роз}^2 - Q_{БАЗ}^2}}{U_n}, \quad (5.5)$$

де $P_{роз}, Q_{роз}$ - розрахункові величини активної і реактивної потужностей;

U_n - номінальна напруга (0,4 кВ);

При використанні некерованої конденсаторної батареї для компенсації реактивної потужності у системі електропостачання можуть виникати ситуації, коли навантаження споживача не залишається сталим. Це може призводити до недостатньої чи надмірної компенсації, внаслідок чого виникають режими недокомпенсації або перекомпенсації.

Активне споживання потужності буде залежати від графіка навантажень протягом першого інтервалу часу:

$$W_p = t \cdot P_{II}, \quad (5.6)$$

де t – проміжок часу 2 год.;

P_{II} - величина активної потужності 1 – го інтервалу.

$$W_p = 2 \cdot 310 = 620 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Споживання реактивної потужності потужність залежить від графіка навантажень. Протягом 1-го інтервал часу потужність обчислюється:

$$W_Q = t \cdot Q_{II}, \quad (5.7)$$

де Q_{II} - реактивна потужність на і-му інтервалі часу.

$$W_Q = 2 \cdot 206 = 412 \text{ кВАр} \cdot \text{ч}$$

Сумарне споживання активної потужності буде визначатися відповідно до графіка навантажень протягом одного дня:

$$W_{P_{\Sigma}} = \sum W_{Pi}$$

Сумарне споживання реактивної потужності буде визначатися відповідно до графіка навантажень протягом одного дня:

$$W_{Q_{\Sigma}} = \sum W_{Qi}$$

Витрати на споживання активної потужності протягом року складуть:

$$З_p = T_{\phi} \cdot t \cdot W_{P_{\Sigma}}, \quad (5.8)$$

де T_{ϕ} - ціна на електроенергію (2,4 грн);

t - години роботи насосної станції протягом року (8736 ч)

P_{Σ} - сумарна потужність, яка споживається насосною станцією за протягом дня (4276,3 кВт):

$$З_p = 2,4 \cdot 8736 \cdot 4276,3 = 89,6 \text{ тис. грн.}$$

Плата за споживання та генерацію реактивної електроенергії обчислюється за виразом:

$$\Pi = \Pi_1 + \Pi_2 - \Pi_3 \quad (5.9)$$

де Π_1 - основна плата за споживання та генерацію реактивної електроенергії;

Π_2 - надбавка за недостатнє обладнання електричної мережі засобами для компенсації реактивної потужності;

Π_3 - зменшення вартості електроенергії за реактивне, якщо споживач бере участь у оптимальному добовому регулюванні режимів мережі електропередачі протягом розрахункового періоду:

$$\Pi_1 = (WQ_{cn} + K \cdot WQ_z) \cdot D \cdot T, \quad (5.10)$$

де WQ_{cn} - споживання реактивної енергії в точці обліку протягом розрахункового періоду, $\text{kVar} \cdot \text{год}$;

WQ_z - генерація реактивної енергії в мережу протягом розрахункового періоду;

K - нормативний коефіцієнт, що враховує збитки енергосистеми від генерації реактивної потужності з мережі споживача;

$D = 0.087$ - коефіцієнт для підприємств, що характеризує частку впливу реактивного перетікання в точці обліку на техніко-економічні, kVar / kVt ;

$T = 2,4$ - ціна на електроенергію за розрахунковий період (розраховується відповідно до нормативних документів НКРЕ) $\text{грн} / \text{kVt} \cdot \text{год}$.

$$\Pi_2 = \Pi_1 \cdot C_{\text{баз}} \cdot (K_\phi - 1), \quad (5.11)$$

де Π_1 - сумарна вартість;

$C_{\text{баз}} = 1$ - нормативний базовий коефіцієнт стимулювання капітальних вкладень в засоби компенсації реактивної потужності;

K_ϕ - середній коефіцієнт, який залежить від фактичного коефіцієнта потужності споживача $\tan \phi$. Надбавка починає впливати, якщо фактичний коефіцієнт потужності менший $\cos \phi$. Для нашої системи значення $\cos \phi = 0.884$ ($\tan \phi = 0.528$) коефіцієнт буде дорівнювати $K_\phi = 1.0784$

Розрахуємо плату за споживану реактивну потужність в засобах некерованої компенсації. Споживання реактивної потужності протягом року

становить $WQ_{cn} = 84323128,0 \text{ кВАр} / \text{год}$, генерація $WQ_g = 16394275 \text{ кВАр}$: основна плата за спожиту реактивну потужність:

$$\Pi_1 = (84323128 + 3 \cdot 16394275) \cdot 0.087 \cdot 2,4 = 186313 \text{ тис.грн.},$$

Надбавка за недостатнє обладнання мережі електроспоживача приладами компенсації реактивної потужності:

$$\Pi_2 = 186313 \cdot 1 \cdot (1,0121 - 1) = 2254,3 \text{ тис.грн.},$$

Протягом року:

$$\Pi_2 = 12 \cdot 2254,3 = 27052,7 \text{ тис.грн.}$$

Повна плата за спожиту реактивну потужність при некерованій системі:

$$\Pi_{nc} = 186313 + 27052,7 = 213365 \text{ тис.грн.},$$

При впровадженні керованої системи компенсації реактивної потужності величина реактивної потужності, що споживається протягом року становить $WQ_{cn} = 959841 \text{ кВАр} / \text{год}$, генерація $WQ_g = 18345611 \text{ кВАр}$: тоді основна плата за спожиту реактивну енергію:

$$\Pi_1 = (959841 + 3 \cdot 18345611) \cdot 0.087 \cdot 2,4 = 11692 \text{ тис.грн.},$$

Надбавка за недостатнє обладнання мережі електроспоживача приладами компенсації реактивної потужності:

$$\Pi_2 = 0 \text{ грн.}$$

Повна плата за спожиту реактивну потужність при керованій системі:

$$\Pi_{kc} = 11692 \text{ тис.грн.}$$

Величина прибутку при впровадженні системи плавного регулювання становить:

$$\Delta m = \Pi_{nc} - \Pi_{kc}, \quad (5.12)$$

$$\Delta m = 213365 - 11692 = 201673 \text{ тис.грн.}$$

Обчислюємо капіталовкладення:

$$K_B = C_{CK} + C_{ВП} + C_{ТР} + C_D + C_{КБ} + C_{\Phi} + C_M, \quad (5.13)$$

де $C_{СК}$ - ціна системи керування; $C_{ВП}$ - ціна вимірюючих пристроїв; $C_{ТР}$ - в ціна транзистора; $C_{Д}$ - ціна діодів; $C_{КБ}$ - ціна конденсаторних батарей; $C_{Ф}$ - ціна фільтрів; $C_{М}$ - вартість монтажу.

$$K_B = 10200 + 6000 + 800 + 1200 + 258600 + 6200 + 25000 = 308000 \text{ грн.};$$

Економічна ефективність становить:

$$E = \Delta m_1 / K_B, \quad (5.14)$$

$$E = 201673 / 308000 = 0,65$$

Термін окупності становить:

$$T = \frac{1}{E}, \quad T = \frac{1}{0,65} = 1,54 \quad (5.15)$$

Використання системи управління компенсацією реактивної потужності, яка ґрунтується на транзисторному перетворювачі і володіє підвищеними регульовальними властивостями коефіцієнта потужності, є економічно обґрунтованим вкладенням у розвиток системи для зниження рівня споживання реактивної потужності. У результаті впровадження такої системи ми спостерігаємо зменшення втрат потужності в системі електропостачання, зниження струму, що протікає по лініях електропередач, а також зниження витрат на реактивну потужність. Крім того, система допомагає розвантажити мережу від надмірної реактивної потужності. Термін окупності цієї системи становить приблизно 1,5 роки.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1. Основні законодавчі акти про охорону праці.

Правовою основою законодавства, що стосується охорони праці, є низка нормативних актів в Україні. Зокрема, ці нормативи включають в себе Конституцію України, Закони України, такі як "Про охорону праці", "Про охорону здоров'я", "Про пожежну безпеку", "Про використання ядерної енергії й радіаційний захист", "Про забезпечення санітарного й епідеміологічного благополуччя населення", а також Кодекс законів про працю України (КЗПП).

В статті 43 Конституції України визначено, що кожна особа має право на працю, яке включає можливість заробляти собі на життя роботою, що вона вільно обирає, або на яку вона вільно погоджується. Також закріплені права на належні, безпечні й здорові умови праці, на отримання заробітної плати не нижче визначеної законом суми. Використання праці жінок і неповнолітніх на небезпечних для їхнього здоров'я роботах забороняється.

Кожна особа, яка працює, має право на відпочинок, згідно зі статтею 45 Конституції України. Це право гарантується наданням щотижневого відпочинку, оплачуваної щорічної відпустки та встановленням скороченого робочого дня для окремих професій і виробництв, а також скороченої тривалості роботи в нічний час.

У статті 46 Конституції України визначено, що громадяни мають право на соціальний захист. Це право включає забезпечення у випадках повної, часткової або тимчасової втрати працездатності, втрати годувальника, безробіття через обставини, які не залежать від них, а також у старості й інших випадках, визначених законом.

Одним із ключових законодавчих актів у сфері охорони праці є Закон України «Про охорону праці». Цей закон застосовується до всіх підприємств,

установ і організацій, незалежно від їхньої форми власності та видів діяльності, а також до всіх громадян, які зайняті на цих підприємствах.

Основні положення Закону України «Про охорону праці», прийнятого 14 жовтня 1992 року, визначають основні аспекти реалізації конституційного права громадян на охорону життя та здоров'я під час трудової діяльності. Закон також регулює відносини між власниками підприємств та працівниками з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища, встановлюючи єдиний порядок організації охорони праці в Україні за участю відповідних державних органів.

Особливістю українського Закону, який регламентує правову основу охорони праці, є високий рівень прав і гарантій для робітників. Вперше в історії країни робітникам було надано право відмовитися від роботи у випадку, якщо існує загроза для їхнього здоров'я та життя на виробництві. Значно розширено права робітників у соціальних гарантіях, зокрема, у випадку ушкодження їхнього здоров'я на робочому місці. Передбачена нова система фінансування охорони праці, а також формування системи страхування від нещасних випадків і професійних захворювань, при цьому підсилена централізація планування.

Договірне регулювання питань охорони праці визнано високим і передбачає значну участь суспільних установ у цьому процесі. З позицій законодавчої регламентації прав і гарантій робітників у сфері охорони праці, Закон України «Про охорону праці» та відповідні нормативно-правові документи отримали високу оцінку експертів Міжнародної організації праці.

6.2. Пристрої заземлення. Вимоги та конструктивне виконання.

Виділяють три різновиди заземлення:

1. **Захисне заземлення** - Забезпечує безпечне обслуговування електроустановок (ЕУ) і гарантує захист від небезпеки електричного струму.

2. Робоче заземлення - забезпечує нормальну роботу електроустановок у вибраних режимах експлуатації.

3. Заземлення блискавковідводів і розрядників - має на меті захист електроустановок та споруд від атмосферних перенапруг, які виникають під час блискавкових розрядів.

Заземлення повинно бути застосоване до всіх металевих частин електроустановок, які зазвичай не знаходяться під напругою, але можуть опинитися під нею у випадку пошкодження ізоляції.

Правила експлуатації електроустановок (ПУЕ) встановлюють вимоги для заземлення підтримуючих засобів:

- В ЕУ з напругою до 1 кВ, де використовується ізольована нейтраль, опір повинен бути не більше 4 Ом (у випадку установок із сумарною потужністю генераторів та трансформаторів до 100 кВА, опір може складати не більше 10 Ом).

- В ЕУ з напругою до 1 кВ із глухозаземленою нейтраллю, опір підключених до неї трансформаторів, генераторів або виводів джерела струму повинен бути не більше 2, 4, 8 Ом для лінійних напруг 660, 380, 220 В у відповідному порядку.

- В ЕУ з напругою понад 1 кВ із глухозаземленою нейтраллю при великих струмах на землю (110 кВ і вище), опір повинен бути не більше 0,5 Ом.

- В ЕУ з напругою понад 1 кВ із ізольованою нейтраллю при малих струмах на землю (3, 6, 10, 20 і 35 кВ), опір повинен відповідати визначеним умовам.

У випадку, коли захисна заземлювальна система (ПЗ) використовується для електроустановок (ЕУ) різних напруг, розрахунковим параметром опору заземлення приймається найменше значення, визначене відповідними нормативами.

Для створення конструктивної заземлювальної системи використовують як природні, так і штучні заземлювачі.

Природні заземлювачі представлені металевими елементами будівель і споруд, трубопроводами для негорючих і невибухових рідин і газів, а також іншими подібними структурами, які мають надійний контакт з ґрунтом.

У випадках, коли природні заземлювачі не забезпечують необхідних параметрів для захисної заземлювальної системи, використовують штучні заземлювачі як додатковий елемент. В ЕУ найбільш раціональними є два типи таких заземлювачів: вертикальні стрижневі та горизонтальні заглиблені.

Зокрема, вертикальні заземлювачі виготовляють із круглої сталі діаметром 12-20 мм і довжиною 3-5 м для вкручування або довжиною 3 м для забивання. Їх з'єднують на глибині 0,6-0,8 м від поверхні ґрунту шляхом зварювання з горизонтальними заземлювачами, які виготовляють зі смужової сталі товщиною 4x40 мм або з круглої сталі діаметром 12-20 мм.

Магістральні захисні провідники установок проводяться відкрито. У системах з напругою від 1 кВ з ізолюваною нейтраллю вимоги до їхнього перерізу становлять не менше 120 мм² для сталі, 35 мм² для алюмінію і 25 мм² для міді.

Повна провідність нульового захисного провідника повинна бути не меншою ніж 50% провідності фазного провідника. Крім того, нульовий робочий провідник повинен бути розрахований на тривале протікання струму.

Кожен елемент, який підлягає заземленню, повинен бути підключений до заземлювальної мережі окремим відгалуженням. Внутрішню заземлювальну мережу слід з'єднати з зовнішнім заземлювальним контуром не менше, ніж в двох місцях, для забезпечення надійності заземлення.

6.3. Розрахунок заземлення.

Захисне заземлення визначається як умисне електричне з'єднання з землею або її еквівалентом, що складається з металевих неструмовідводячих частин, які можуть опинитися під напругою. Його основною метою є

усунення можливості травмування від ураження електричним струмом у випадку дотику до корпусу та інших неструмопровідних частин електроустановки, що стали під напругу. Наприклад, корпуси електричних машин, трансформаторів, світильників, апаратів та інших металевих неструмовідводячих частин можуть опинитися під напругою при короткому замиканні їхніх струмопровідних частин на корпус. У випадку, коли корпус не має контакту з землею, дотик до нього так само небезпечний, як і дотик до фази. Захисне заземлення допомагає уникнути цієї небезпеки.

В електроустановках напругою більше 1000 В та струмі більш ніж 500А опір заземлювального пристрою R_z не повинен перевищувати 0,5 Ом.

Розрахуємо питомий опір ґрунту:

$$R_{розр} = \psi \rho_{изм}, \quad (6.1)$$

де $\rho_{изм}$ – питомий опір ґрунту для чорнозему $\rho_{изм} = 20 \text{ Ом} \cdot \text{см}$;

ψ – коефіцієнт, який враховує підвищений питомий опір землі біля річки, дорівнює 1,8.

$$R_{розр} = 1,8 \cdot 20 = 36 \text{ Ом/м.}$$

Обираємо тип заземлювача: заземлювач трубковий у землі. Схема заземлювача представлена на рис. 6.1.

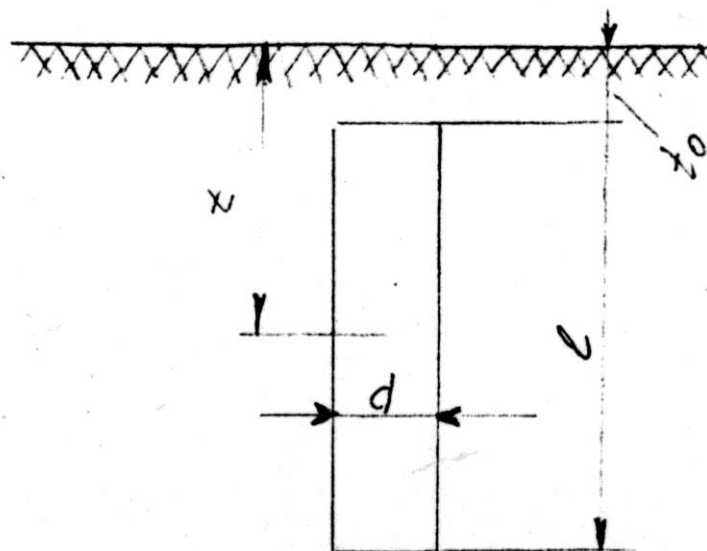


Рисунок 6.1 - Схема розташування заземлення:

l – довжина заземлювача, $l = 300 \text{ см}$; d – діаметр заземлювача, $d = 0,5 \text{ см}$;

t_0 – глибина монтажу заземлювача, $t_0 = 80 \text{ см}$; $t = 80 + 150 = 230 \text{ см}$.

Опір заземлювача обчислюємо за формулою:

$$R_3 = \frac{\rho_{розр}}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right), \quad (6.2)$$

де $\rho_{розр}$ – розрахований питомий опір землі, $\rho_{розр}=36$ Ом/м;

$$R_3 = \frac{36}{2 * 3,14 * 300} \left(\ln \frac{2 * 300}{0,5} + \frac{1}{2} \ln \frac{4230 + 300}{4230 - 300} \right) = 0,2 \text{ Ом.}$$

Отримане значення опору заземлювача відповідає вимогам $R_3=0,2<0,5$.

6.4. Вимоги до виробничих територій, приміщень і приладів.

Місця для підготовки двигунів до ТЕ-2, ТЕ-3 і ТР, які включають в себе процеси обдування, очищення, обмивання та сушіння, розташовані у закритих стійлах. Ці стійла слід відокремлювати від інших цехів та відділень депо за допомогою стін, що не пропускають звук. Зазвичай ці стійла розташовані поруч із цехами ТЕ та ТР і обладнані необхідними засобами для механізованого обдування, сушіння та очищення електровозів та їхніх вузлів.

Пульт керування вказаним обладнанням повинен знаходитися в ізольованому приміщенні, відокремленому від місць обмивання та машинних відділень.

Відділення для випробувань станції електричних машин повинно бути розташоване в прольоті електромашинного цеху та обгороджене металевою сіткою висотою не менше 1,8 метра. Стенди для установки електричних машин для випробувань повинні розташовуватися в підкрановому полі електромашинного цеху.

Замок на двері огороження іспитової станції повинен мати систему блокування в ланцюгу, яка активує попереджувальну сигналізацію про подачу напруги. Огородження електроустаткування на іспитовій станції, таке

як щити і пульти, має бути обладнане блокуванням, що унеможливило подачу напруги на об'єкти іспиту при відкритті напруги.

Машинні агрегати та інші джерела шуму, наскільки це можливо, повинні бути винесені в окремі приміщення або розміщені під підлогою.

Відділення для просочувально-сушильних робіт повинно мати окреме приміщення, відокремлене від сусідніх відділень за допомогою вогнестійких перегородок. Приміщення цього відділення має бути обладнане системою проточно-витяжної вентиляції.

Електроустаткування, яке розташоване на висоті до 2 метрів від підлоги просочувально-сушильного відділення, повинно відповідати вибухобезпечному класу В-1б відповідно до Правил приводу електроустановки.

Апарати відкритого виконання для включення та вимикання обладнання просочувально-сушильного відділення повинні бути встановлені за межами цього приміщення.

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі проведено теоретичне узагальнення та розроблено новий підхід до задачі створення системи автоматичного керування трансформаторами з поздовжньо-поперечним регулюванням напруги. Цей підхід відрізняється від відомих методів регулювання, оскільки включає напругу, активну та реактивну потужності як основні регульовані параметри. У якості додаткових критеріїв формування регулюючого впливу використовуються похідні за напругою та реактивною потужністю. Технічна реалізація цього підходу створює умови для підвищення надійності та якості системи електропостачання.

Проведено дослідження існуючих методів та засобів поздовжнього та поздовжньо-поперечного регулювання напруги. Математична модель системи автоматичного керування трансформаторами була вдосконалена для врахування розробленого закону та структури регулюючого пристрою, використовуючи передаточні функції. Це дозволило провести комп'ютерне моделювання системи та оцінити її динамічні характеристики.

На основі вдосконаленої математичної моделі системи автоматичного керування була побудована модель автоматичного регулятора напруги. Ця модель дозволяє отримувати параметри налагодження регулятора. Крім того, було створено програмне забезпечення для мікропроцесорного контролера з метою виконання функцій регулятора системи автоматичного керування.

Розроблена комп'ютерна модель та програмне забезпечення для мікропроцесорного регулятора системи автоматичного керування трансформаторами, спроектовані відповідно до умов, але можуть бути адаптовані до вимог інших електропостачальних компаній та підприємств.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кваліфікаційна робота магістра : метод. рекомендації до змісту, структури та оформлення кваліфікаційної роб. : для студ. спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков, К. Г. Петрова, Н. Ю. Гарасьова та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 74 с.
2. Грабко В. В. Синтез закону регулювання напруги в електричній мережі в умовах оптимального споживання реактивної потужності / В. В. Грабко, С. М. Левицький, М. П. Свиридов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2007. — № 2. — С. 34 — 37.
3. Левицький С. М. Синтез структури регулятора напруги в системах з обмеженим споживанням реактивної потужності / С. М. Левицький // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. — 2008. — № 4 (51). — Частина 2. — с. 53 — 56.
4. Грабко В. В. Система регулювання напруги електричної мережі за умови обмеженого споживання реактивної енергії / В. В. Грабко, С. М. Левицький. // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія й практика». — 2007. — С. 536 — 538.
5. Левицький С. М. Комп'ютерне моделювання системи регулювання напруги в умовах дефіциту реактивної потужності / С. М. Левицький // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2007. — № 6. — С. 80 — 83.
6. Левицький С. М. Мікропроцесорний двоканальний регулятор напруги на базі контролера Zelio Logic / С. М. Левицький // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. — 2008. — № 1 (11). — С. 150 — 153.

7. Грабко В. В. Моделі і засоби регулювання напруги за допомогою трансформаторів з пристроями РПН [монографія] / В. В. Грабко. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. — 109 с.
8. Лежнюк П. Д. Оптимальне керування потоками потужності і напругою в неоднорідних електричних мережах [монографія] / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. — 188 с.
9. Рогальський Б. С. Визначення технічних значень вхідної реактивної потужності для споживачів електроенергії / Б. С. Рогальський, Л. Н. Добровольська, О. М. Нанака, В. В. Вержук // Вісник ВПІ. — 2007. — № 5. — С. 58 — 64.
10. Карпов Ю. О. Прогнозування якості функціонування пристроїв регулювання під напругою трансформаторів в умовах нечітких результатів випробовувань / Ю. О. Карпов, П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, М. І. Пиріжок // Вісник ВПІ. — 2007. — № 2. — С. 61 — 65.