

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

С. М. Левицький, К. І. Колмачов

**СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ
ТРАНСФОРМАТОРОМ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ
РЕГУЛЯТОРОМ НАПРУГИ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2015

УДК 681.51: 621.314.222

ББК 32.965: 31.268.88

ЛЗ7

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 10 від 30.04.2015 р.)

Рецензенти:

В. М. Кутін, доктор технічних наук, професор

О. В. Садовой, доктор технічних наук, професор

Левицький, С. М.

ЛЗ7 Система автоматичного керування трансформатором з інтелектуальним регулятором напруги : монографія / С. М. Левицький, К. І. Колмачов. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 72 с.

ISBN 978-966-641-630-1

В монографії представлено математичну, структурну та комп'ютерну моделі системи автоматичного керування трансформаторної підстанції з інтелектуальним регулятором напруги, які виконано на основі синтезованого закону керування. Розроблено програмне забезпечення мікропроцесорного регулятора для системи автоматичного керування трансформаторами

Робота розрахована на інженерно-технічних працівників електроенергетичних компаній, а також може бути корисною студентам та аспірантам вузів, які спеціалізуються в галузі розробки систем автоматичного керування електротехнічними комплексами.

УДК 681.51: 621.314.222

ББК 32.965: 31.268.88

ISBN 978-966-641-630-1

© С. Левицький, К. Колмачов, 2015

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	4
ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ	7
1.1 Види регулювання напруги в електричних мережах	7
1.2 Регулювання напруги зміною коефіцієнта трансформації силових трансформаторів	11
1.2.1 Трансформатори з ПБЗ	11
1.2.2 Трансформатори з механічними пристроями РПН	12
1.2.3 Трансформатори з безконтактними пристроями РПН	27
1.3 Узагальнення результатів аналізу	31
РОЗДІЛ 2 СИНТЕЗ ЗАКОНУ ТА СТРУКТУРИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРОМ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ РЕГУЛЯТОРОМ	32
2.1 Синтез закону регулювання напруги трансформаторної підстанції	32
2.2 Синтез структури системи автоматичного керування трансформаторами з інтелектуальним регулятором напруги	36
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРОМ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ РЕГУЛЯТОРОМ	40
3.1 Математичні моделі елементів системи автоматичного керування трансформатором з інтелектуальним регулятором	40
3.2 Математична модель визначення часу затримки на перемикання відгалуження	43
3.3 Комп'ютерне моделювання роботи системи автоматичного керування трансформатором з інтелектуальним регулятором	46
РОЗДІЛ 4 Мікропроцесорна реалізація системи автоматичного керування трансформатором з інтелектуальним регулятором	56
4.1. Структурна схема віддаленого керування трансформаторною підстанцією	56
4.2 Розробка програмного забезпечення мікропроцесорного регулятора для системи автоматичного керування трансформаторами	58
ВИСНОВКИ	64
ЛІТЕРАТУРА	65

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АРМ	–	автоматизоване робоче місце
ВН	–	висока напруга
ЕОМ	–	електронна обчислювальна машина
НН	–	низька напруга
ПБЗ	–	перемикання без збудження
ПЛК	–	програмований логічний контролер
ППП	–	пакет прикладних програм
РПН	–	регулювання під навантаженням
СІФУ	–	система імпульсно-фазового управління
ТН	–	трансформатор напруги
ТС	–	трансформатор струму

ВСТУП

Актуальність роботи. Впровадження сучасних технологій та новітніх систем автоматизації у вітчизняній промисловості ставить нові вимоги до якості електроенергії та надійності електропостачання підприємства. Електроенергія розглядається як предмет споживання та продажу і повинна відповідати нормам якості [1]. Причому для надання послуг електропостачання слід підтримувати вказані показники (відхилення, несиметрію, несинусоїдність напруги, частоту та ін.) на належному рівні за допомогою спеціальних технічних засобів [2, 3], оскільки електроенергія є специфічним товаром, що споживається практично миттєво, відразу ж після її виробництва.

Існують три основні групи методів підвищення якості електроенергії [4]. В першу чергу, це раціоналізація засобів електропостачання. До цієї групи відносять підвищення потужності мережі, живлення нелінійних споживачів підвищеною напругою тощо. Друга група передбачає удосконалення самих споживачів: номінальне завантаження електродвигунів, використання багатофазних схем випрямлення, введення до складу споживача коригувальних пристроїв тощо. Третя група передбачає використання пристроїв корекції якості – регуляторів одного або деяких параметрів електроенергії.

Найкращою за економічним фактором сьогодні є третя група методів, оскільки зміна структури мережі або оновлення всіх споживачів призведе до значних затрат. Для забезпечення надійної роботи існуючого обладнання необхідне розроблення методів і засобів регулювання якості електричної енергії.

Внаслідок значної протяжності ліній електропередач від електростанцій до споживачів та багатоетапної трансформації електроенергії особливо важливе значення має підтримання норм якості електроенергії не на самих електростанціях, а безпосередньо на вводах споживачів електроенергії. Вирішення цієї проблеми необхідне саме на рівні розподільчих мереж [5]. Більшість крупних споживачів потребують надійного підтримання встановленого рівня напруги на їх вводах, оскільки інші критерії (форма та частота напруги) впливають на втра-

ти енергії в лініях електропередач та обладнанні підстанцій і, відповідно, в їх зменшенні зацікавлені електропостачальні організації [6].

Найважливішим параметром якості електроенергії є рівень напруги. Відхилення напруги, особливо в бік її зменшення, спричиняють збитки в усіх галузях промисловості [7]. Також при пониженнях напруги збільшуються втрати потужності в електромережах [8–9]. В теперішній час в енергосистемах застосовується велика кількість пристроїв, які забезпечують підтримання режиму напруги. Це в першу чергу трансформатори з регульованим під навантаженням коефіцієнтом трансформації, конденсаторні батареї, реактори, синхронні компенсатори, генератори електростанцій тощо [10]. Вказані пристрої оснащуються регуляторами, які забезпечують підтримання напруги на певному рівні.

Основними засобами регулювання напруги в електричних мережах є силові трансформатори з пристроями регулювання під навантаженням (РПН). Ресурс механічних контактів пристрою РПН силового трансформатора порівняно малий, оскільки доводиться комутувати робочі струми. Ремонт пристрою РПН – операція трудомістка (з бака трансформатора потрібно зливати масло), і вартість такого ремонту значна. Крім того, додаються збитки від припинення електропостачання споживачів. Все це приводить до того, що оперативний персонал підстанцій намагається проводити перемикання відпайок силового трансформатора якомога рідше. З цієї причини автоматичні регулятори напруги силових трансформаторів, як правило, відключаються. Відповідно, якість напруги значно знижується, а втрати від неякісного електропостачання зростають [11].

Отже, питання розробки електротехнічних комплексів для регулювання напруги та одночасного створення задовільного режиму системи електропостачання є актуальним як з технічної точки зору, що забезпечить гнучкість у вирішенні поставлених завдань, так і з економічної сторони, оскільки присутнє спрямування на зменшення втрат електроенергії та покращення її якості.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

1.1 Види регулювання напруги в електричних мережах

Для підтримання рівня напруги на затискачах споживача в допустимих межах в різних місцях електричної мережі проводять регулювання напруги, яке може бути *централізованим* і *локальним* [12].

Централізоване регулювання напруги проводиться у вузлах електричних мереж і використовується при живленні великої кількості споживачів (велике підприємство, місто). В такому регулюванні можна виділити три підходи: стабілізація напруги, двоступінчасте регулювання напруги і зустрічне регулювання напруги.

Стабілізація напруги застосовується для споживачів з практично незмінним навантаженням, наприклад для тризмінних підприємств, де рівень напруги необхідно підтримувати постійним на протязі доби. Добовий графік таких споживачів приведений на рис. 1.1.

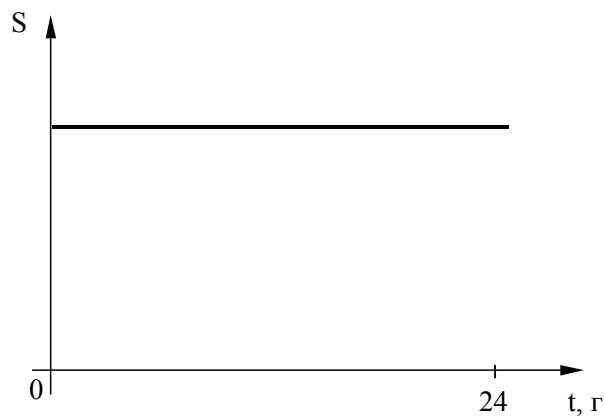


Рисунок 1.1 – Добовий графік для споживачів з незмінним навантаженням

Для споживачів з чітко вираженим двоступінчастим графіком навантаження (рис. 1.2), наприклад, для однозмінних підприємств, застосовують *двоступінчасте регулювання напруги*. При цьому підтримуються два рівні напруги впродовж доби у відповідності до графіка навантаження.

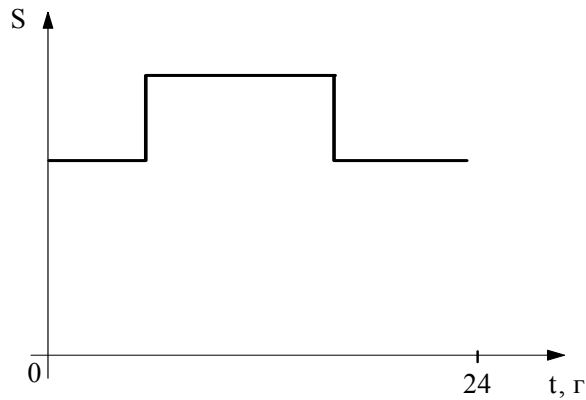


Рисунок 1.2 – Добовий графік для споживачів з двоступінчастим навантаженням

У випадку змінного протягом доби навантаження (рис. 1.3) здійснюється так зване *зустрічне регулювання напруги*. Для кожного значення навантаження будуть мати своє значення і втрати напруги, отже, і сама напруга буде змінюватись зі зміною навантаження. Для того, щоб відхилення напруги не виходили за межі допустимих значень, необхідно регулювати напругу в залежності від струму навантаження.

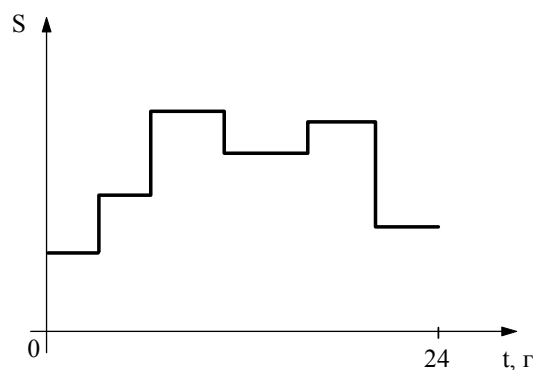


Рисунок 1.3 – Добовий графік споживачів із змінним навантаженням

Для детального розгляду зустрічного регулювання напруги використаємо схему, подану на рис. 1.4а, де трансформатор представлений як опір трансформатора та ідеальний коефіцієнт трансформації n [12].

На рис. 1.4а прийняті такі позначення: U_1 – напруга на шинах ЦП; $U_{2В}$ – напруга на шинах високої напруги (ВН) районної підстанції; $U_{2Н}$ – напруга на шинах низької напруги (НН) районної підстанції; U_3 – напруга у споживачів.

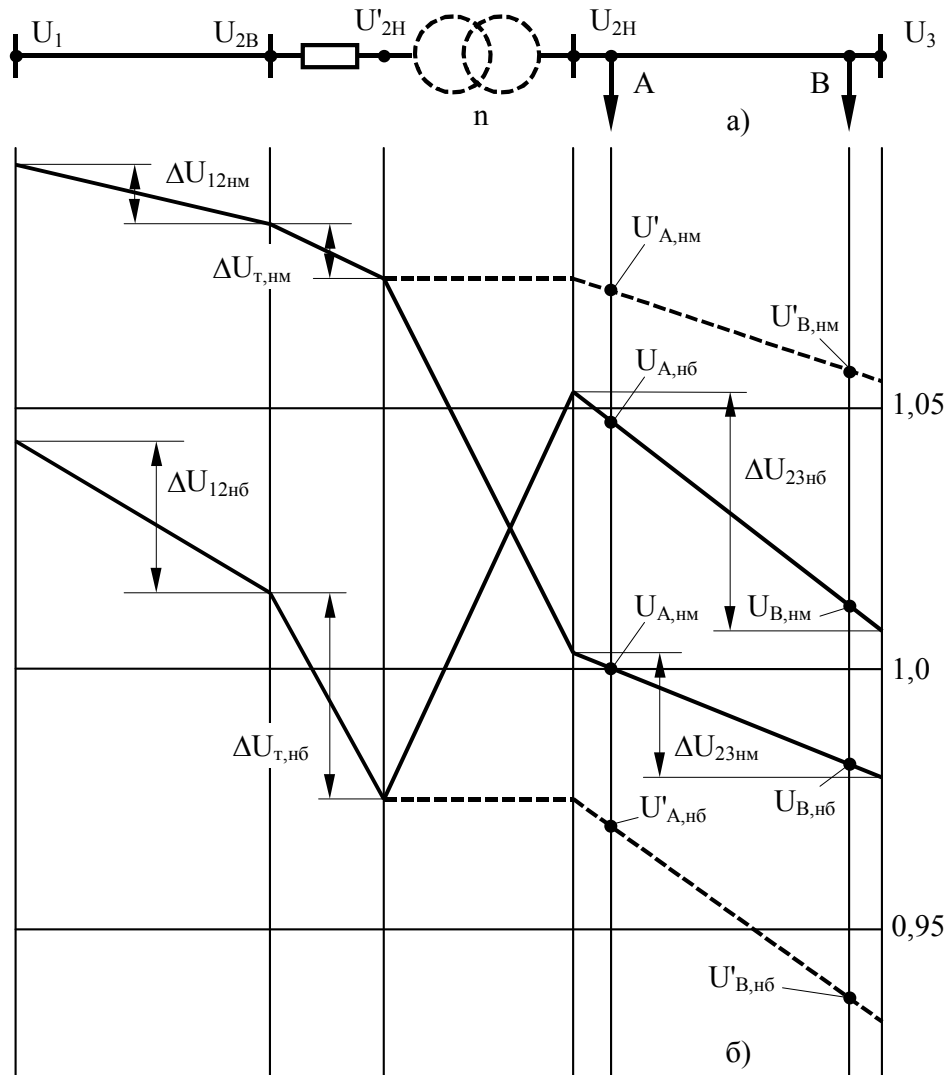


Рисунок 1.4 – Зустрічне регулювання напруги:

а – схема заміщення; б – епюри напруг

Напруга на шинах ВН районної підстанції визначається за формулою

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

Напруги на шинах ВН і НН відрізняються на величину втрат напруги в трансформаторі ΔU_T , і, крім того, в ідеальному трансформаторі напруга понижується у відповідності до коефіцієнта трансформації, що необхідно враховувати при виборі регулювального відгалуження.

На рис. 1.4б показані графіки зміни напруги для двох режимів: найменших та найбільших навантажень. При цьому по осі абсцис від-

кладені втрати напруги, а по осі ординат – значення відхилень напруги.

З рис. 1.4б (пунктирні лінії) видно, що при $n = 1$ в режимі мінімальних навантажень напруга у споживачів буде вищою, а в режимі максимальних навантажень – нижчою за допустиме значення (тобто відхилення U більші за допустимі). При цьому приймачі електроенергії, що під'єднані до мережі НН (тобто в точках А і В), працюватимуть в недопустимих умовах. Змінюючи коефіцієнт трансформації трансформатора районної підстанції n , змінюють $U_{2Н}$, тобто регулюють напругу на споживачах (суцільна лінія на рис. 1.4б).

В режимі найменших навантажень підвищують коефіцієнт трансформації n , зменшуючи вторинну напругу $U_{2Н}$ до значення, якомога ближчого до $1,0U_{ном}$. В такому режимі вибирають таке найбільше стандартне значення n , щоб виконувалась умова

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

В режимі найбільших навантажень знижують n , збільшуючи напругу $U_{2Н}$ до значення, якомога ближчого до $1,05U_{ном}$. В цьому режимі вибирають таке найбільше стандартне значення n , щоб виконувалась така умова:

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

Таким чином напруга на затискачах споживачів як віддалених, так і близькорозташованих, вводиться в допустимі межі. При такому регулюванні в режимі найбільших навантажень напруга нижча і вона підвищується, а в режимі найменших навантажень, навпаки, напруга вища і вона понижується. Тому таке регулювання напруги називається **зустрічним**.

Локальне регулювання напруги проводиться безпосередньо біля споживачів (електродвигунів, електричних печей, тощо) і поділяється на групове та індивідуальне. Групове регулювання застосовується для групи споживачів, а індивідуальне – в основному, в спеціальних цехах.

1.2 Регулювання напруги зміною коефіцієнта трансформації силових трансформаторів

Основним засобом регулювання напруги є трансформатори районних підстанцій, оскільки за їх допомогою можна узгодити вимоги до напруги близьких і віддалених споживачів [12–14].

Трансформатори можуть бути під'єднані в різних пунктах електричних мереж, в яких режим напруги заздалегідь, як правило, невідомий і, крім того, може змінюватись в процесі експлуатації мережі. Тому трансформатори мають крім основних ще й додаткові регульовальні відгалуження. Змінюючи ці відгалуження, можна дещо змінити коефіцієнт трансформації (в межах 10–20 %).

За конструктивним виконанням розрізняють трансформатори двох типів:

- з перемиканням регульовальних відгалужень без збудження, тобто з відключенням від мережі (скорочено трансформатори з ПБЗ);
- з перемиканням регульовальних відгалужень під навантаженням (скорочено – трансформатори з РПН).

Як правило, регульовальні відгалуження виконуються на стороні високої напруги ВН трансформатора, яка має менший робочий струм. При цьому спрощується пристрій перемикання.

1.2.1 Трансформатори з ПБЗ

В теперішній час трансформатори з ПБЗ виготовляють з основним і чотирма додатковими відгалуженнями. Принципова схема такого трансформатора наведена на рис. 1.5. Основне відгалуження має напругу, рівну номінальній напрузі мережі, до якої приєднується цей трансформатор (6, 10, 20 кВ). При основному відгалуженні коефіцієнт трансформації трансформатора називають номінальним. При використанні чотирьох додаткових відгалужень коефіцієнт трансформації відрізняється від номінального, відповідно, на +5, +2,5, –2,5 і –5 %.

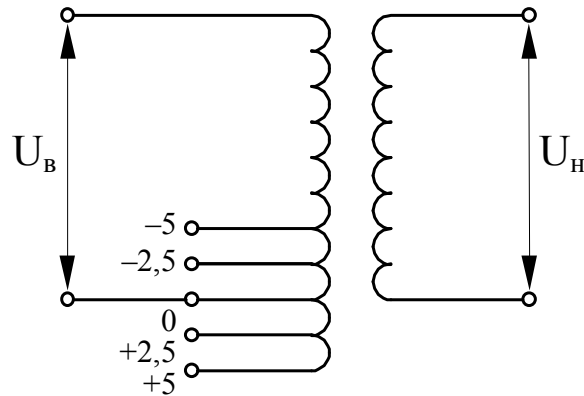


Рисунок 1.5 – Принципова схема трансформатора з ПБЗ

Для того, щоб здійснити перемикання регульовального відгалуження, необхідно відключити трансформатор від мережі. Такі перемикання виконуються рідко, практично лише при сезонній зміні навантажень. Тому в режимі найбільших і найменших навантажень впродовж доби (наприклад, вдень і вночі) трансформатор з ПБЗ працює на одному регульовальному відгалуженні і, відповідно, з одним і тим же коефіцієнтом трансформації. При цьому неможливо виконати вимоги зустрічного регулювання, що є основним недоліком трансформаторів з ПБЗ.

1.2.2 Трансформатори з механічними пристроями РПН

Трансформатори з регулюванням напруги під навантаженням [15], тобто з вбудованим пристроєм РПН [16–18] (рис. 1.6а) відрізняються від трансформаторів з ПБЗ наявністю спеціального пристрою перемикання, а також збільшеною кількістю ступенів регульовальних відгалужень і діапазоном регулювання.

На рис. 1.6б зображена принципова схема трансформатора з РПН. Обмотка високої напруги ВН цього трансформатора складається з двох частин – регульованої та нерегульованої. На регульованій частині є низка відгалужень до нерухомих контактів 1–4. Відгалуження 1–2 відповідають частині витків, які ввімкнуті узгоджено з витками основної обмотки (напрямок струму вказаний на рис. 1.6б стрілками). При вмиканні відгалужень 1–2 коефіцієнт трансформації збільшується. Відгалуження 3–4 відповідають частині витків, які з'єднані зустрічно по

відношенню до витків основної обмотки. Їх вмикання зменшує коефіцієнт трансформації, оскільки компенсує дію частини витків основної обмотки. Основним виводом обмотки ВН трансформатора є точка 0. Число витків, що діють узгоджено і зустрічно з витками основної обмотки, може бути неоднаковим.

На регульованій частині обмотки є пристрій перемикання, який складається з рухомих контактів ϵ і z , контакторів K1 і K2 та реактора P. Середина обмотки реактора з'єднана з нерегульованою частиною обмотки трансформатора. В нормальному режимі струм навантаження обмотки ВН розподіляється рівно між половинами обмотки реактора. Тому магнітний потік малий і втрати напруги в реакторі також малі.

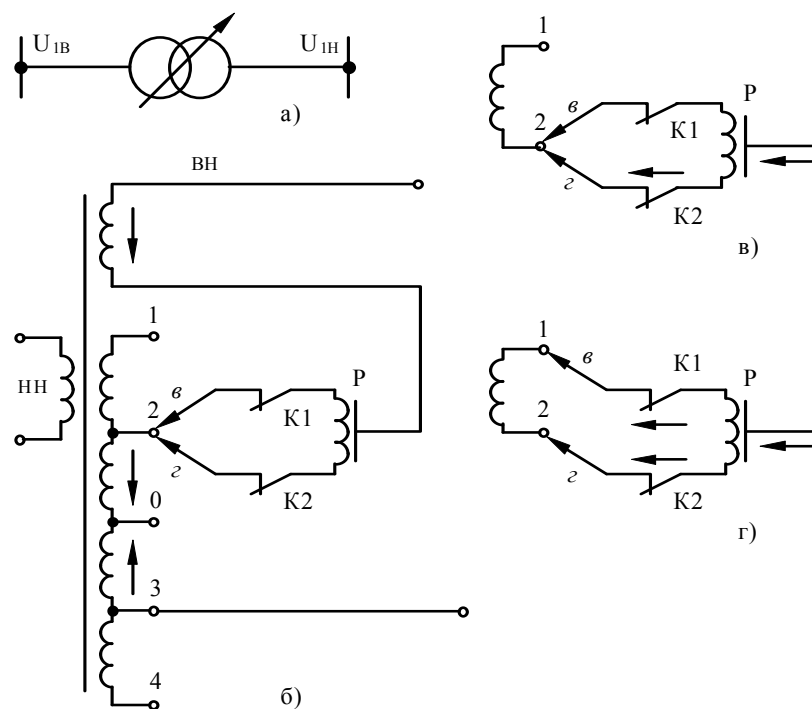


Рисунок 1.6 – Трансформатор з РПН: а–умовне позначення;
б–принципова схема; в, г–перемикання відгалужень

Припустимо, що необхідно переключити пристрій з відгалуження 2 на відгалуження 1. При цьому вимикають контактор K1 (див. рис. 1.6в), переводять рухомий контакт ϵ на відгалуження 1 і знов вмикають контактор K1 (див. рис. 1.6г). Таким чином, секція 1–2 обмотки виявляється замкнутою на обмотку реактора P. Значна індукти-

вність реактора обмежує урівнюючий струм, який виникає внаслідок наявності напруги на секції 1–2 обмотки. Після цього вимикають контактор К2, переводять рухомий контакт z на відгалуження 1 і вмикають контактор К2.

За допомогою РПН можна перемикаєти відгалуження, змінюючи тим самим коефіцієнт трансформації, під навантаженням, тобто впродовж доби. При цьому можливо вибрати в режимах найбільших і найменших навантажень необхідні відгалуження і заокруглити їх до таких найближчих значень, щоб виконувались вимоги зустрічного регулювання.

Недоліками трансформаторів з РПН є їх висока вартість і обмежена кількість перемикачів, що знижує якість регулювання. Часто трансформатори з РПН комплектуються автоматичними регуляторами, які реалізують певний закон регулювання напруги.

Найпростішим законом регулювання напруги є регулювання за її відхиленням. Відомий пристрій для регулювання напруги на силовому трансформаторі [19], який реалізує такий закон регулювання. Функціональна схема цього пристрою наведена на рис. 1.7.

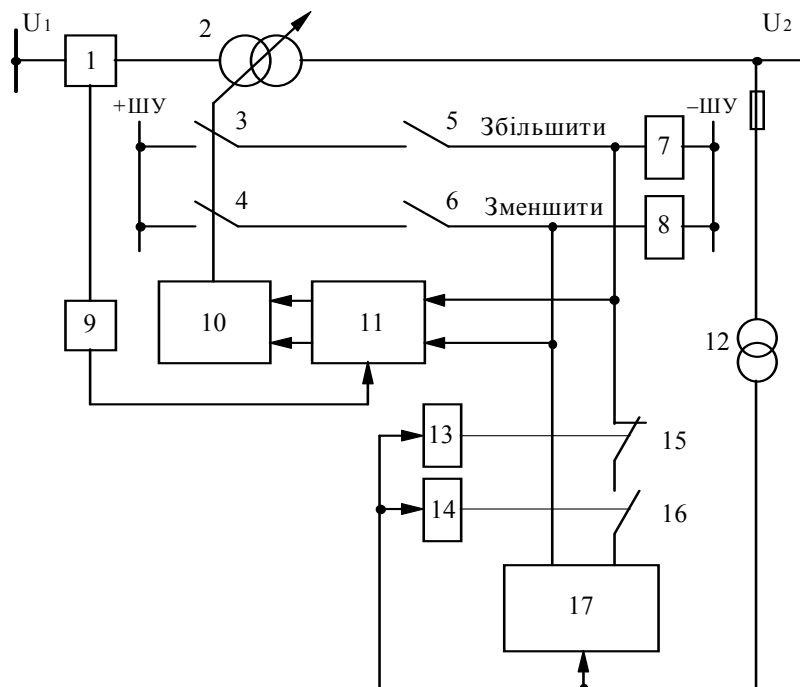


Рисунок 1.7 – Функціональна схема пристрою регулювання напруги силового трансформатора

На рис. 1.7: 1 – датчик струму; 2 – силовий трансформатор з РПН; 3, 4 – контакти слідкування веденого валу перемикача; 5 – контакти реле запам'ятовування циклу перемикання «Збільшити»; 6 – контакти реле запам'ятовування циклу перемикання «Зменшити»; 7 – реле запам'ятовування циклу перемикання «Збільшити»; 8 – реле запам'ятовування циклу перемикання «Зменшити»; 9 – реле максимального струму; 10 – електропривод пристрою РПН; 11 – блокувальний елемент; 12 – трансформатор напруги; 13 – реле мінімальної напруги; 14 – реле максимальної напруги; 15 – контакти реле мінімальної напруги; 16 – контакти реле максимальної напруги; 17 – автоматичний регулятор напруги.

При перевищенні напругою верхньої межі зони нечутливості регулятор напруги 17 подає короткочасний сигнал «Зменшити» на електропривод 10 для перемикання відгалужень трансформатора на пониження напруги. При виході напруги за нижню межу зони нечутливості регулятор подає короткочасний сигнал «Збільшити» на підвищення напруги. Сигнал «Зменшити» (або «Збільшити») також надходить на реле запам'ятовування циклу перемикання «Зменшити» 8 (або реле запам'ятовування циклу перемикання «Збільшити» 7), яке продовжує подавати команду на електропривод до закінчення процесу перемикання.

Також цей пристрій реалізує блокування електропривода при виникненні надструмів в силовому трансформаторі 2 під час перемикання за допомогою реле максимального струму 1 і блокувального елемента 11. Після зникнення надструмів блокування знімається і відбувається завершення початого перемикання. При великих пониженнях напруги сигнал «Збільшити» блокується, і перемикач не приходить до руху.

Описаний пристрій для регулювання напруги силових трансформаторів не враховує навантаження споживачів, тому за допомогою нього неможливо реалізувати закон зустрічного регулювання напруги.

Пристрій для автоматичного регулювання напруги вузла електричної мережі, який дає змогу врахувати навантаження споживачів, описано в [20]. Функціональна схема такого пристрою наведена на рис. 1.8.

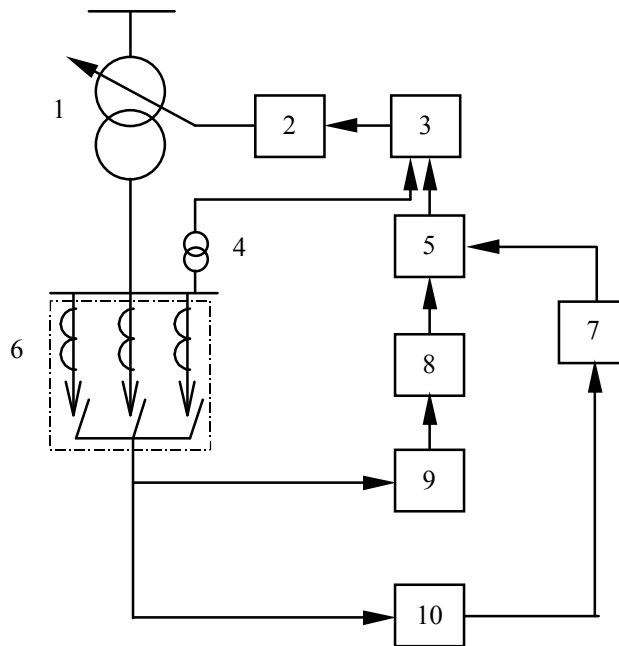


Рисунок 1.8 – Функціональна схема пристрою
для автоматичного регулювання напруги вузла електричної мережі

Постійна складова струму навантаження, яка виділяється фільтром 9 і проходить через функціональний перетворювач 8, забезпечує оптимальну напругу в центрі живлення за умовами найменшої кількості споживаної електроенергії поза допустимим діапазоном зміни напруги. Змінна складова з блоків струмової компенсації 6, яка виділяється фільтром 10 і проходить через підсилювач 7, забезпечує зміну напруги в центрі живлення при коливаннях навантаження у споживачів. Обидві складові додаються одна до одної в суматорі 5 і сума надходить на блок автоматичного регулювання напруги 3. На цей же блок надходить значення напруги вторинної обмотки силового трансформатора, яка вимірюється датчиком напруги 4.

Хоча описаний пристрій враховує зміну навантаження споживачів, при частих коливаннях цього навантаження кількість перемикачів пристрою РПН 2 буде досить великою, що призведе до швидкого спрацювання ресурсу контактів пристрою РПН.

Відомий також спосіб регулювання напруги силового трансформатора [21], в якому для зменшення зони нечутливості регулятора передбачається після перемикачів блокувати команду на перемикачів в протилежну сторону, доки не буде явної тенденції регульованої на-

пруги до зміни в сторону попереднього регулювання. На рис. 1.9 показана функціональна схема пристрою, який реалізує такий спосіб регулювання напруги.

На рис. 1.9: 1 – вхід вимірювання струму; 2 – датчик струму; 3, 9, 15 – елемент затримки часу; 4, 10 – елемент заборони; 5, 11 – виконавчі елементи; 6 – вхід вимірювання регульованої напруги; 7 – блок визначення напруги в контрольованій точці лінії електропередачі; 8 – пороговий блок; 12 – блок контролю зміни регульованої напруги; 13, 14 – елементи пам'яті; 16 – логічний елемент «АБО».

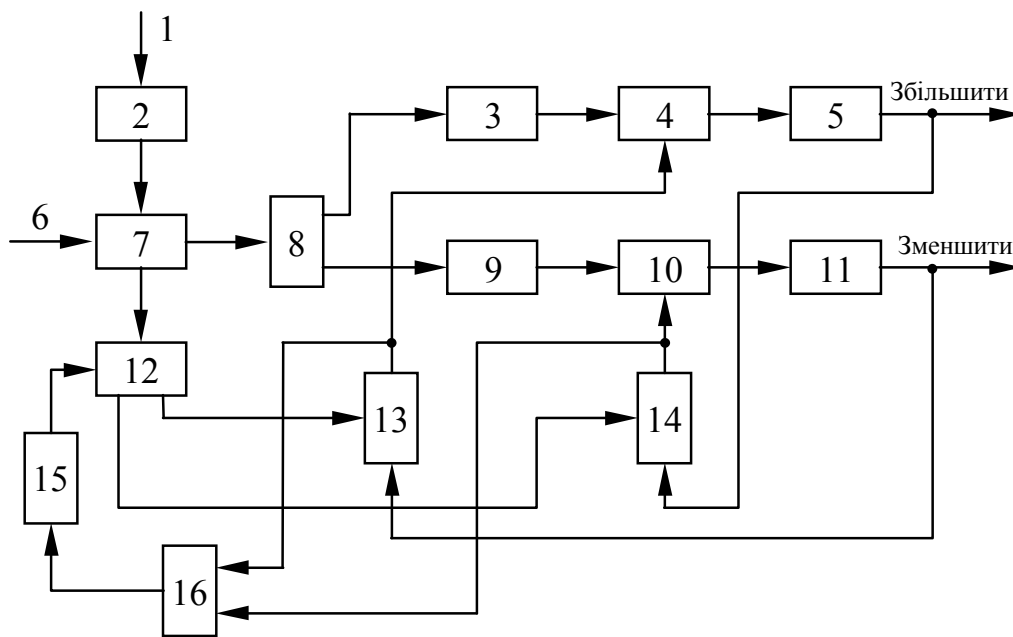


Рисунок 1.9 – Пристрій для регулювання напруги силового трансформатора

В наведеному пристрої по закінченні перемикання блок контролю зміни регульованої напруги 12 починає відслідковувати напрям зміни напруги і, якщо напруга має тенденцію до зменшення (або збільшення), то блок 12 подає сигнал скиду на блок пам'яті 14 (або 13), дозволяючи перемикання у зворотний бік. Логічний елемент «АБО» 16 і елемент часової затримки 15 необхідні для відключення блока 12 на час перемикання пристрою РПН, що забезпечує стійкий алгоритм роботи пристрою.

В описаному способі регулювання напруги на силовому трансформаторі не враховується напрям зміни напруги після виходу її за межі зони нечутливості, що призводить до зайвих перемикань пристрою РПН.

На підстанціях широко використовуються пристрої автоматичного регулювання трансформаторів під навантаженням типу АРТ-1Н [22], перевагою яких є підвищення стійкості регулювання напруги за рахунок затримки сигналу на перемикання на деякий час. Цим досягається уникнення реакції системи на короткочасні коливання напруги, а тим самим підвищується надійність системи в цілому. До того ж такий пристрій дає змогу проводити оперативну дистанційну зміну уставки, що нерідко використовується в різних системах регулювання напруги, побудованих на цьому регуляторі [23, 24].

Однак цей пристрій не відслідковує напрямок зміни напруги і тим самим нерідко виконує зайві перемикання пристрою РПН, що негативно відображається на ресурсі останнього. Також АРТ-1Н не здатний швидко реагувати на значні відхилення напруги, що знижує якість регулювання напруги.

Існує спосіб регулювання напруги силового трансформатора [25], який передбачає автоматичну зміну уставки регулятора напруги при перевищенні напругою струмової компенсації граничного значення. Це запобігає недопустимому підвищенню регульованої напруги на близькорозташованих споживачах при великому струмі навантаження лінії.

Функціональна схема пристрою, що реалізує цей спосіб, наведена на рис. 1.10, де: 1, 2 – датчики струму; 3 – пусковий орган; 4 – елемент затримки часу; 5 – виконавчий орган; 6 – елемент блокування струмової компенсації; 7 – силовий трансформатор; 8 – трансформатор напруги; 9 – електропривод; 10 – блок автоматичного регулювання.

В заданому пристрої пусковий орган 3 порівнює сумарну напругу струмової компенсації з максимально допустимою і при її перевищенні подає сигнал через блок часової затримки 4 на виконавчий орган 5, який видає команди на зміну уставки блока автоматичного регулювання 10 і блокування струмової компенсації на елемент блокування струмової компенсації 6. Кількість датчиків струму 1 і 2, кожний з

яких має два струмових входи, може бути довільною (в залежності від кількості змінних регулювання). При зменшенні сумарної напруги струмової компенсації до значення, меншого за максимально допустиме, пристрій повертає блок автоматичного регулювання 10 до нормального режиму роботи.

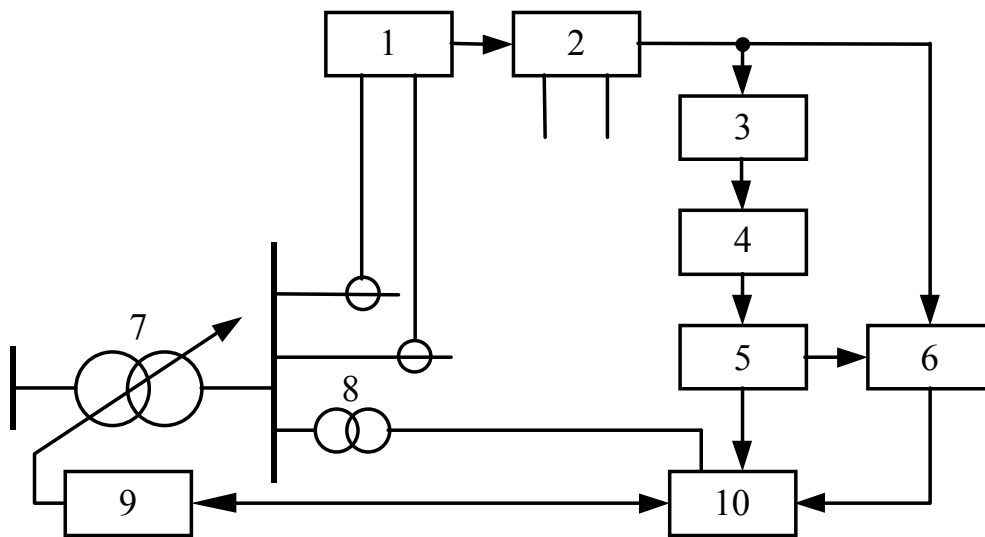


Рисунок 1.10 – Функціональна схема пристрою регулювання напруги силового трансформатора

Схожий спосіб регулювання напруги реалізує пристрій для автоматичного регулювання напруги вузла електричної мережі [26], функціональна схема якого наведена на рис. 1.11, де 1 – силовий трансформатор; 2 – пристрій РПН; 3 – блок автоматичного регулювання напруги; 4 – датчик напруги; 5 – функціональний перетворювач струму компенсації; 6 – блоки струмової компенсації.

Цей пристрій в режимі мінімальних навантажень здійснює регулювання напруги за усередненими відхиленнями напруги, а при збільшенні навантажень до максимальних відбувається перехід до регулювання за граничними відхиленнями напруги в вузлах мережі з мінімізацією споживання неякісної енергії. Якість регулювання напруги на споживачах розподільчої електричної мережі підвищується за рахунок зниження кількості електроенергії, яка споживається поза допу-

стимим діапазоном зміни напруги, при зміні навантаження в широких межах.

Обидва описані вище пристрої регулювання напруги змінюють уставку типового регулятора напруги АРТ-1Н, тому мають ті ж самі обмеження.

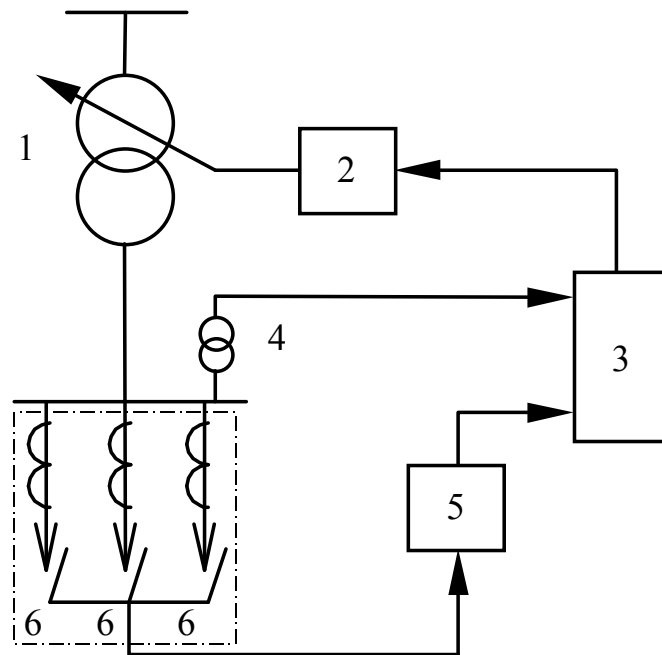


Рисунок 1.11 – Функціональна схема пристрою для автоматичного регулювання напруги вузла електричної мережі

Існує спосіб регулювання напруги за критерієм економічних збитків від відхилення напруги від нормованого значення [27]. В [28] описаний пристрій автоматичного регулювання напруги вузла електричної мережі за критерієм економічних збитків від неякісного енергопостачання, функціональна схема якого показана на рис 1.12.

На рисунку 1.12: 1 – силовий трансформатор з пристроєм РПН; 2 – блок керування відпайками трансформатора; 3 – датчик напруги; 4 – датчик активної потужності; 5 – датчик реактивної потужності; 6–8 – аналогово-цифрові перетворювачі; 9 – мікроконтролер.

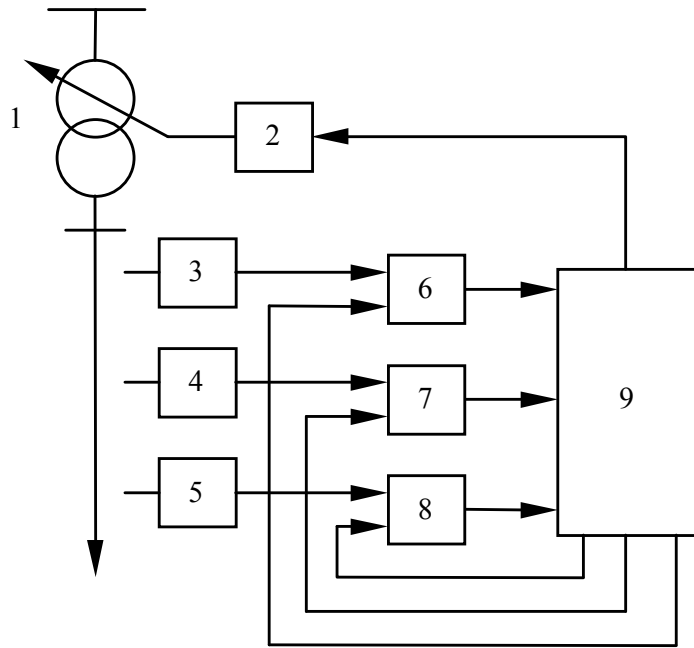


Рисунок 1.12 – Функціональна схема пристрою для автоматичного регулювання напруги вузла електричної мережі

З датчиків напруги 3, активної 4 та реактивної 5 потужності через аналогово-цифрові перетворювачі 6–8, відповідно, здійснюється паралельне програмно-синхронне введення параметрів режиму, які змінюються в часі – напруги U , активної і реактивної потужностей P і Q в мікроконтролер 9, де за заданою програмою розраховують:

– відхилення поточного значення напруги від номінального

$$v = U - U_{\text{н}}; \quad (1.4)$$

– економічну характеристику вузла навантаження електричної мережі

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

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

$$\begin{cases} \alpha = f(Q, P), \\ \beta = f(P, Q); \end{cases} \quad (1.6)$$

– функцію приналежності нечіткого обмеження відхилень напруги

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

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

– оптимальне значення відхилення напруги для даного вузла навантаження

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

– гістограму відхилень напруги від номінального значення як густину розподілу ймовірностей $P(v)$;

– значення нечіткого інтеграла від функції приналежності нечіткого обмеження за імовірнісною мірою $P(v)$ як

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

Перемикання проводиться лише в тому випадку, коли воно приведе до значного зменшення збитків від неякісної електроенергії, зменшуючи тим самим кількість перемикачів пристрою РПН.

Цей же спосіб регулювання напруги з дещо простішою реалізацією забезпечує пристрій, описаний в [29]. Як і попередні, такий спосіб регулювання напруги не дає можливості швидко відпрацювати значне різке відхилення напруги.

Спосіб регулювання напруги за розрахованими залежностями струму від напруги в центрі живлення описаний в [30]. Спосіб полягає в тому, що за залежностями $f_n = I(U)$ струму і напруги в центрі живлення для n характерних режимів розподільчої мережі визначають оптимальну залежність за мінімумом втрат електроенергії з урахуванням обмежень напруги за мінімумом і максимумом і за вимірними поточними значеннями I та U поточний режим ідентифікують з одним з n заздалегідь розрахованих характерних режимів. За оптимальною залежністю визначають оптимальну напругу для заданого режиму і здійснюють перемикання РПН з попередньою перевіркою допустимості такого перемикання.

Функціональна схема пристрою, який реалізує цей спосіб, наведена на рис. 1.13, де: 1 – шини високої напруги; 2 – ЕОМ керування; 3 – датчик-перетворювач; 4 – силовий трансформатор з пристроєм РПН; 5 – блок пам'яті; 6 – датчик струму; 7, 13 – аналогово-цифрові перетворювачі; 8, 9, 11 – блоки порівняння; 10 – блок регулятора; 12 – датчик напруги; 14 – шини низької напруги.

Кожному характерному режиму розподільчої мережі відповідає значення напруги, при якому втрати енергії мінімальні. Ці значення зберігаються в пам'яті ЕОМ керування 2. Значення напруги і повного струму на вторинній стороні трансформатора 4 постійно контролюються за допомогою датчиків струму 6 і напруги 12. Ці значення надходять через аналогово-цифрові перетворювачі 7 і 13 в блок 2 ЕОМ керування. В блоці 2 відбувається ідентифікація поточного режиму мережі з одним з заздалегідь розрахованих характерних режимів роботи даної мережі і за відомими залежностями визначається значення оптимальної напруги, яка відповідає мінімуму втрат електроенергії в усіх елементах розподільчої мережі.

Застосування цього способу регулювання напруги дає змогу зменшити кількість перемикачів пристрою РПН і тим самим підвищити надійність енергопостачання. Однак використовувати цей спосіб доцільно лише в розподільчих мережах з незмінною структурою, коли можливо розрахувати характерні режими мережі.

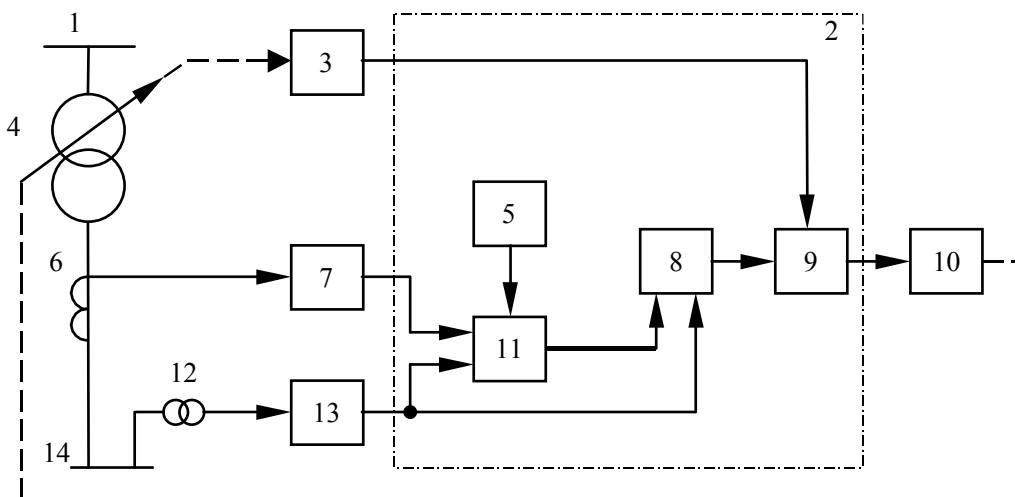


Рисунок 1.13 – Функціональна схема пристрою регулювання напруги в центрі живлення розподільчої мережі

Врахувати зміну схеми електричної мережі дає змогу пристрій автоматичного регулювання напруги в електричних мережах, описаний в [31].

Функціональна схема цього пристрою наведена на рис. 1.14, де: 1, 3, 13 – логічні елементи «НІ»; 2, 11, 14, 23, 24 – логічні елементи «І»; 4 – блок оперативної зміни уставки за напругою; 5 – блок струмової компенсації; 6 – блок контролю справності регулятора та перемикача; 7 – блок затримки сигналу; 8 – блок виконавчих органів; 9 – блок стабілізації напруги; 10, 12 – логічні елементи «АБО»; 15 – блок заборони роботи стабілізатора напруги; 16, 17 – розширювачі імпульсів; 18 – розширювач тактових імпульсів; 19 – блок телекерування; 20 – блок передачі імпульсів по телеканалі; 21 – генератор тактових імпульсів; 22 – блок контролю справності додаткових елементів; 25, 29 – елементи часу; 26 – блок порівняння; 27 – блок моделювання необхідної напруги; 28 – блок вибору уставок за напругою; струмової компенсації і допустимої напруги; 30 – блок телевимірювання напруги; 31 – блок телевимірювання струму; 32 – блок телесигналізації положення комутуючих апаратів в електромережі.

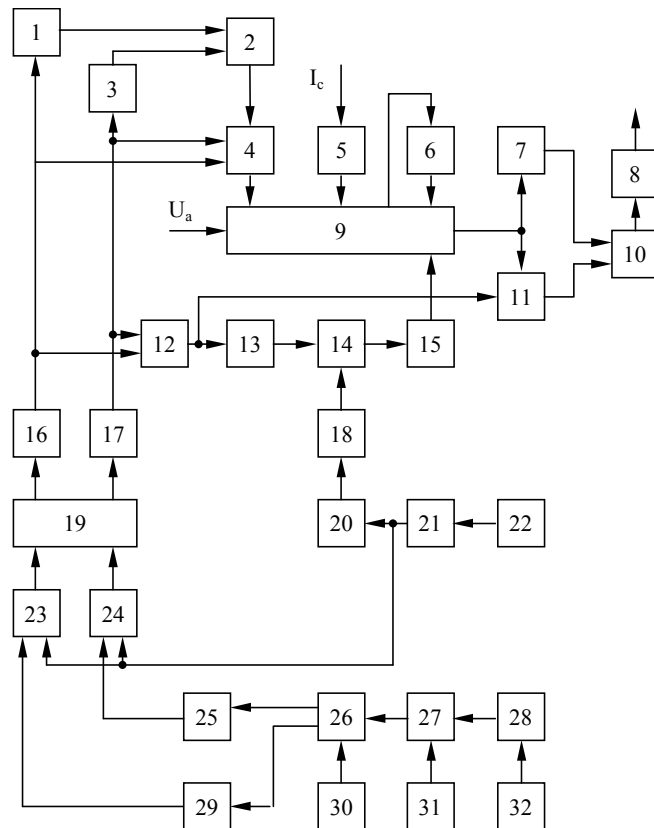


Рисунок 1.14 – Функціональна схема пристрою регулювання напруги в електричних мережах

В блоці 27 для кожного приєднання моделюється рівняння

$$U = U_0 + K \cdot I_n(t), \quad (1.10)$$

де U – значення напруги на шинах центра живлення даної мережі; U_0 – опорний рівень напруги (уставка за напругою); K – коефіцієнт статизму регулювання; $I_n(t)$ – значення струму навантаження під'єднання.

Результати цього моделювання додаються між собою або порівнюються, в залежності від обраного алгоритму регулювання. Від визначеної в результаті такої операції напруги в блоці 26 віднімається значення з блока телевимірювання напруги 30. Якщо різниця додатна і перевищує задану величину, то на вихід блока 26 подається команда «Вище», якщо від'ємна, але за модулем перевищує задану величину, то на вихід подається команда «Нижче». Ці команди через певний час затримки (елементи часу 25 або 29 в залежності від команди) запускають блок телекерування 19, який передає відповідну команду в блок оперативної зміни уставки за напругою 4, вмикаючи відповідну заздалегідь вибрану корекцію.

Блок оперативної зміни уставки за напругою 4 являє собою групу відпайок від вхідного трансформатора блока стабілізації 9 і групу релейних пристроїв для підключення відповідної відпайки, здійснюючи тим самим зміну напруги уставки блоку стабілізації 9.

Описаний спосіб регулювання напруги підвищує якість регулювання напруги при змінах схеми електричної мережі, але має обмеження, характерні для регуляторів АРТ-1Н.

В автоматичному регуляторі для силових трансформаторів [32] передбачено визначення знаку похідної огинаючої регульованої напруги, що дає змогу зменшити кількість перемикань пристрою РПН і тим самим підвищити надійність електропостачання. Функціональна схема такого регулятора наведена на рис. 1.15.

Регулятор складається з датчика струму 1, суматора 2, блока формування і зміни зони нечутливості 3, блока формування і зміни уставки напруги 4, порогового блока 5, перетворювачів імпульсного сигналу в потенційний 6 і 10, блоків часової затримки 7 і 11, блоків заборони 8 і 12, вихідних релейних елементів 9 і 13, генератора тактових

імпульсів 14, блока зміни періоду тактових імпульсів в нормальному режимі 16, блока перемикання генератора тактових імпульсів в нормальному режимі 16, блока контролю електропривода в режимі «Застрягання» 17, блока контролю схеми регулятора і електропривода в режимі «Рух відсутній» 18, блока блокування 19, блока визначення похідної огинаючої регульованої напруги 20, блока визначення знаку похідної 21, логічних елементів «АБО» 22 і 23, логічного елемента «НІ» 24, тривходових ключів 25 і 26, блоків пам'яті 27 і 28, логічних елементів «І» 29 і 30.

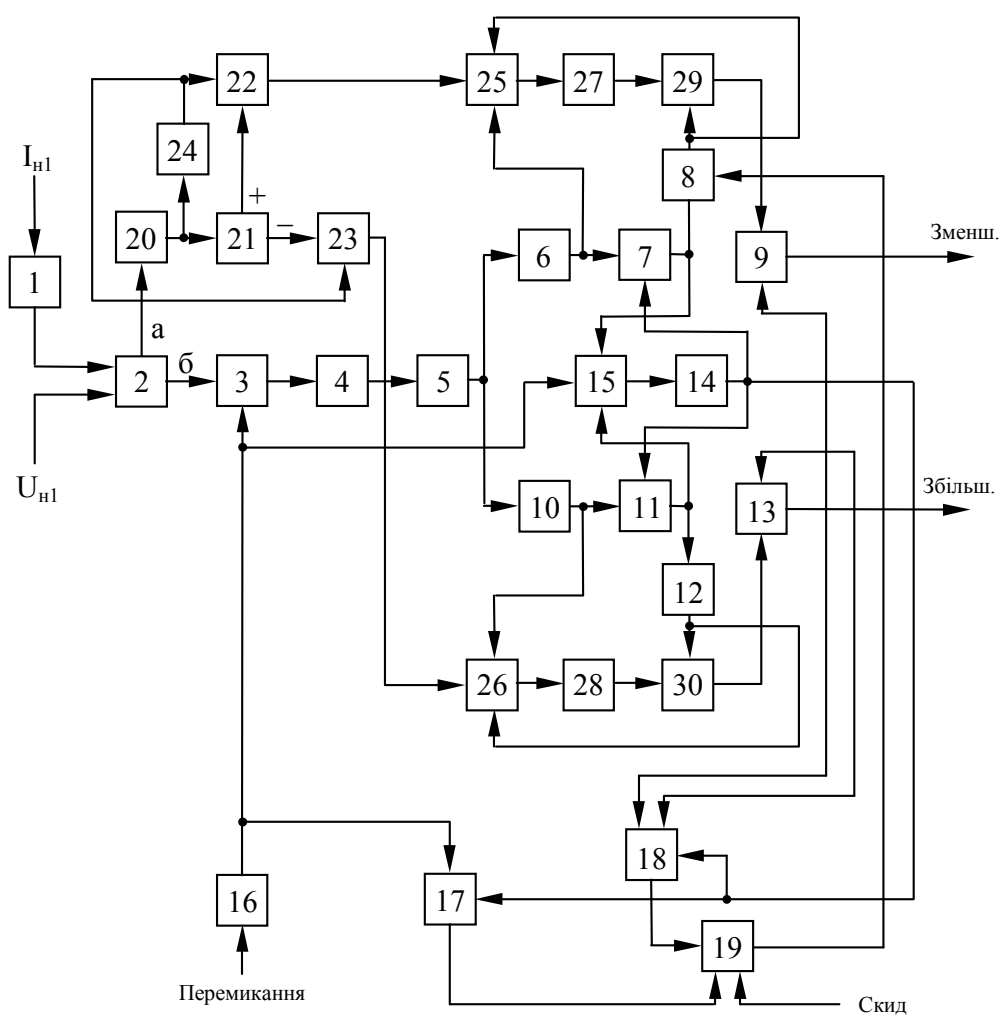


Рисунок 1.15 – Функціональна схема автоматичного регулятора для силових трансформаторів

В заданому пристрої сигнал перемикання відпайки трансформатора в сторону зменшення відхилення напруги з'являється тоді, коли значення напруги знаходиться за межами зони нечутливості протягом часу τ і не має тенденції до повернення в зону. Остання умова забезпечується блоком визначення похідної огинаючої регульованої напруги.

За допомогою блоків 16–19 проводиться діагностування схеми регулятора і електропривода і в разі несправності робота регулятора блокується.

Визначення похідної огинаючої регульованої напруги дає змогу уникнути зайвих перемикань пристроєм РПН в тих випадках, коли напруга виходить за межі зони нечутливості, але під впливом зовнішніх факторів поступово повертається до зони.

Обмеженням цього і попереднього способів регулювання напруги є те, що при їх використанні неможливо швидко вертати напругу до нормованого значення при її значних відхиленнях, оскільки кожне перемикання пристрою РПН затримується на час τ . Внаслідок цього знижується якість регульованої напруги.

1.2.3 Трансформатори з безконтактними пристроями РПН

Пристрій РПН є елементом з обмеженим ресурсом перемикання. До того ж час перемикання відпайки ≥ 5 с [33]. Цих недоліків не мають безконтактні пристрої РПН, в яких застосовуються напівпровідникові силові ключі [34]. Трансформатори, обладнані такими пристроями мають час перемикання відпайки ≥ 10 мс, а саме перемикання не супроводжується появою вищих гармонік, відповідно, покращується динамічна стійкість системи регулювання напруги [33].

В [35] описано пристрій для регулювання змінної напруги, в якому для перемикання відпайок використовуються напівпровідникові силові ключі. Функціональна схема пристрою наведена на рис. 1.16.

В режимі мінімальних навантажень ключ 1 ввімкнений, а ключ 2 – вимкнений. Напруга на вторинній обмотці трансформатора мінімальна. При максимальному навантаженні ключ 2 вмикають, а ключ 1 – вимикають. Напруга на вторинній обмотці максимальна. В проміжних

режимах необхідну напругу підтримують, змінюючи кути керування ключів 1 і 2.

Даний пристрій не забезпечує захист ключів від струмів коротких замикань. Також в проміжних режимах роботи в мережі з'являються вищі гармоніки.

В [36] запропоновано пристрій для перемикання відгалужень силового трансформатора за допомогою симісторних ключів [37, 38].

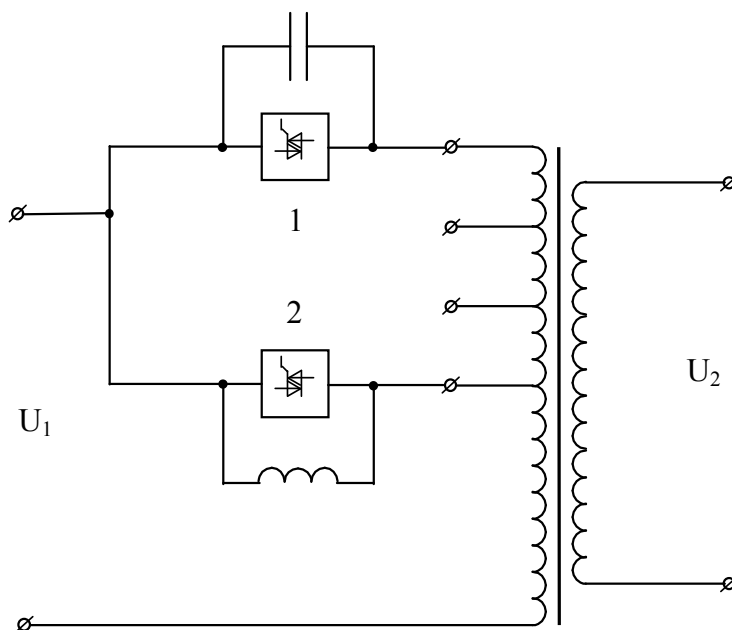


Рисунок 1.16 – Функціональна схема пристрою для регулювання змінної напруги

На рис. 1.17 наведена функціональна схема вказаного пристрою, де: 1 – система керування; 2, 3 – симісторні ключі; 4 – датчик струму короткого замикання; 5 – посилений симісторний ключ аварійного режиму; 6 – силовий трансформатор; 7 – варистор; 8 – формувач керуючих імпульсів для посиленого ключа аварійного режиму; 9 – навантаження.

При нормальній роботі пристрою система керування 1 подає імпульси на один з симісторних ключів 2, 3, 5, вмикаючи його. При виникненні короткого замикання датчик 4 посилає сигнал системі керування 1. Остання припиняє подачу імпульсів керування, працюючий симісторний ключ вимикається, варистор 7 починає пропускати

струм, живлячи формувач 8, який видає сигнал на ключ 5, і той пропускає через себе аварійний струм. Після усунення короткого замикання система керування 1 знов вступає в роботу.

Недоліком цього пристрою є те, що в процесі регулювання не враховується струмова компенсація.

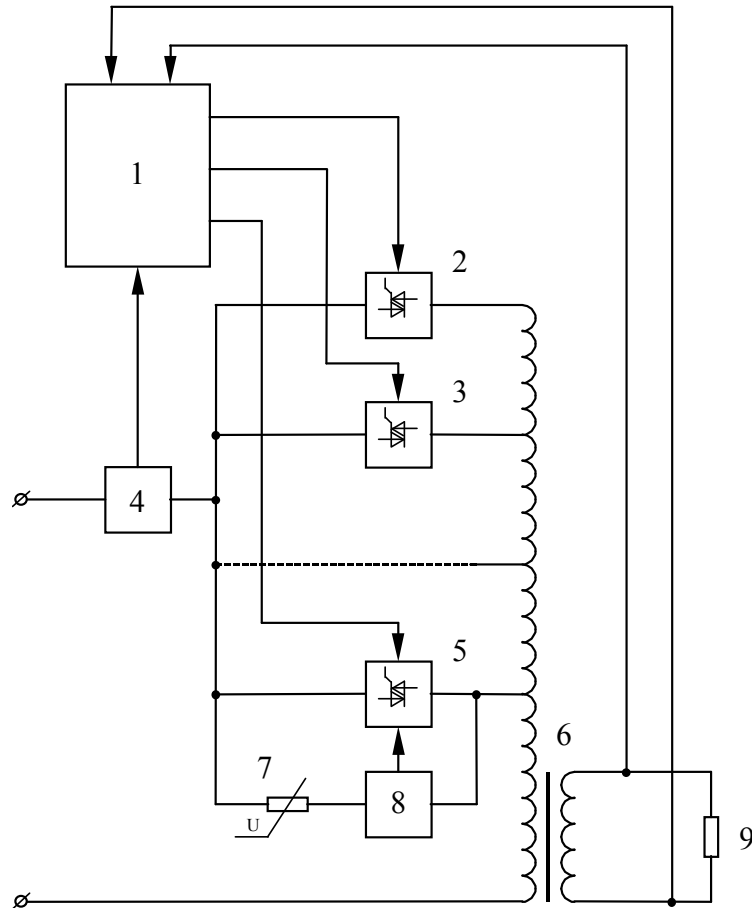


Рисунок 1.17 – Функціональна схема пристрою для перемикання відгалужень силового трансформатора

В [39] запропоновано спосіб регулювання напруги, який передбачає зміну коефіцієнта трансформації силового трансформатора шляхом зміни кількості витків вторинної обмотки. Для комутації відпайок трансформатора запропоновано використовувати тиристорні ключі. Функціональна схема пристрою, що реалізує запропонований спосіб регулювання напруги наведена на рис. 1.18, де: 1 – блок керування; 2 – система імпульсно-фазового управління (СІФУ); 3–12 – тиристорні ключі.

Спосіб реалізується таким чином. На блок керування 1 надходить сигнал, відповідний необхідній величині напруги на навантаженні. Блок 1 формує пропорційний сигнал для блока СІФУ 2, який в свою чергу формує і подає на один з блоків 3–12 відповідні імпульси, що вмикають відповідний ключ. З метою уникнення міжвиткових коротких замикань необхідно, щоб лише один ключ був відкритий, тому відкриття наступного ключа відбувається лише після закриття попереднього. У випадку, коли включений блок 8, вторинна напруга відповідає номінальному значенню. При включенні інших ключів одержують значення напруг: 0,9; 0,92; 0,94; 0,96; 0,98; 1,02; 1,04; 1,06; 1,08, відповідно включенню блоків 3–7, 9–12.

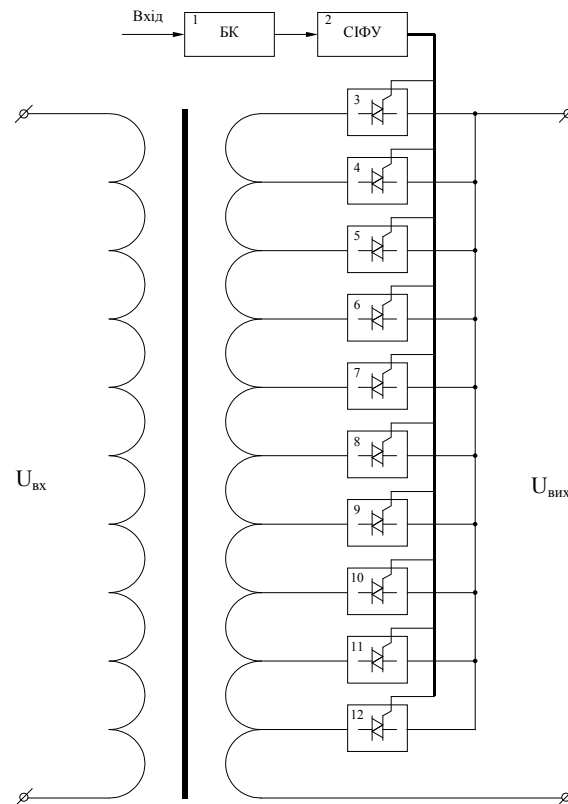


Рисунок 1.18 – Функціональна схема пристрою регулювання напруги трансформатора з тиристорним пристроєм РПН

Схожий пристрій регулювання напруги силового трансформатора з перемиканням відпайок вторинної обмотки трансформатора описано в [40]. Недоліком способу регулювання напруги, який реалізують два вищезначених пристрої, є те, що комутація проводиться по вторин-

ній стороні силового трансформатора, де при значній потужності трансформатора струми досягають декількох тисяч ампер. Таким чином, кожен ключ буде складений з декількох паралельних тиристорів, що є економічно не вигідним.

1.3 Узагальнення результатів аналізу

Аналіз існуючих пристроїв для регулювання напруги силових трансформаторів з пристроями РПН показав, що всі вони розв'язують лише одну з головних задач регулювання напруги: або підвищують якість напруги на споживачах, внаслідок чого збільшується кількість перемикачів пристроїв РПН, або підвищують надійність енергопостачання за рахунок зниження якості напруги. В останньому випадку особливо несприятливими є режими, в яких мають місце суттєві відхилення напруги від номінального значення, що призводить до тривалого живлення споживачів напругою низької якості.

Застосування тиристорних пристроїв РПН є перспективним напрямком розвитку систем регулювання напруги, але на теперішній час використання цих пристроїв обмежується вузлами середньої і низької напруги з невеликою потужністю трансформаторів внаслідок відсутності напівпровідникових ключів на великі напруги і струми.

Для розв'язання задачі створення високоефективних систем автоматичного регулювання напруги силових трансформаторів з пристроями РПН можна запропонувати такий алгоритм:

- на основі аналізу недоліків систем регулювання напруги розробити закон регулювання напруги силового трансформатора з пристроєм РПН, застосування якого дасть можливість підвищити якість регулювання напруги порівняно з попередніми законами;
- розробити підходи до синтезу систем регулювання напруги, які реалізують розроблені закони регулювання;
- розробити функціональні схеми систем регулювання напруги;
- створити систему віддаленого диспетчерського керування;
- провести дослідження якості розроблених систем автоматичного регулювання напруги трансформаторної підстанції;

Реалізації вищезазначених етапів алгоритму розв'язання поставленої задачі призначені всі наступні розділи монографії.

РОЗДІЛ 2
СИНТЕЗ ЗАКОНУ ТА СТРУКТУРИ СИСТЕМИ
АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРОМ
З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ РЕГУЛЯТОРОМ

2.1 Синтез закону регулювання напруги
трансформаторної підстанції

На вузлових підстанціях електричної мережі реалізується закон зустрічного регулювання напруги, у відповідності з яким на шинах вузлової підстанції підтримується номінальна напруга $U_{\text{ном}}$ при мінімальних навантаженнях, а з ростом навантаження з метою компенсації втрат напруги в елементах мережі цю напругу підвищують до $1,05U_{\text{ном}}$. Для ступінчатого регулювання пристроями РПН такий закон можна записати у вигляді [2]:

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

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

де K_m – коефіцієнт трансформації трансформатора з РПН; $u(t)$ – приведена напруга на шинах підстанції з урахуванням струмової компенсації; $u_{\text{н.з.}}$, $u_{\text{в.з.}}$ – нижня і верхня границі зони нечутливості регулятора напруги, які задаються з умов надійності; U_y – уставка регулятора, яка відповідає номінальній нарузі $U_{\text{ном}}$ на шинах підстанції; $U(t)$ – поточне значення цієї напруги; I_{\min} – струм, що знімається з шин підстанції в режимі мінімуму навантаження; $I(t)$ – поточне значення струму з шин підстанції; $U_{\text{н.н}}$ – напруга на шинах низької напруги трансформатора; U_i – напруга, що індукується в обмотці високої напруги транс-

форматора при підключенні і-го відгалуження; K_1 – коефіцієнт, який характеризує чутливість регулятора; K_2 – коефіцієнт, який визначає нахил характеристики зустрічного регулювання:

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

I_{max} – струм навантаження в режимі максимуму.

В умовах експлуатації намагаються по можливості зменшити кількість перемикачів відгалужень трансформатора, свідомо ідучи на деяке зниження якості регулювання, але збільшуючи тим самим надійність. З цією метою закон регулювання синтезують нечутливим до короточасних коливань напруги і орієнтують його тільки на відпрацювання відхилень, що досягається введенням у вираз (2.1) часової затримки τ_3 і логічної умови, які перетворюють цей вираз до вигляду:

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

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

де τ_3 – час затримки сигналу.

Для того, щоб підвищити стійкість регулювання, в закон (2.3) ввели додаткову логічну умову, основу на врахуванні знаку похідної огинаючої $U_{\text{ог}}$ регульованої напруги $U(t)$. Ця умова дає змогу не проводити перемикачів відгалужень трансформатора, якщо регульований параметр знаходиться поза зоною нечутливості регулятора, але під впливом зовнішніх факторів сам прямує до зони. Закон регулювання в цьому випадку запишеться так:

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

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

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

Однак вищевказаний закон не передбачає швидкої реакції регулятора на значне відхилення контрольованої напруги, внаслідок чого тривалий час напруга на навантаженні має ненормоване значення через затримку сигналу керування на час τ_3 .

В результаті змінюється режим роботи споживачів, що призводить до недовипуску продукції, зниження її якості, а іноді до виробничого браку [41, 42]. Тому закон регулювання (2.4) доповнюють додатковою умовою, яка дозволяє виконувати перемикання пристрою РПН без часу затримки сигналу τ_3 , коли контрольована напруга має значення, що суттєво відрізняється від $U_{ном}$. З урахуванням такої умови закон регулювання буде мати вигляд

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

$$K_m = \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{н.н}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \leq u_{н.з}; \\ u(t - \tau_3) \leq u_{н.з}; \\ \frac{dU_{ог}}{dt} \leq 0; \end{cases} \\ \frac{U_i}{U_{н.н}}, \text{ якщо } u_{н.з} < u(t) < u_{в.з}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{н.н}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \geq u_{в.з}; \\ u(t - \tau_3) \geq u_{в.з}; \\ \frac{dU_{ог}}{dt} \geq 0; \end{cases} \end{cases} \quad (2.5)$$

$$U(t) \xrightarrow[t_{пер} \rightarrow min]{} U_{ном} \pm \Delta U, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) < u_{н.з1}, \\ u(t) > u_{в.з1}. \end{cases}$$

де $u_{в.з1}$, $u_{н.з1}$ – верхня і нижня границі зони нечутливості, обумовленої якістю регулювання напруги; $t_{пер}$ – час регулювання, протягом якого значення напруги повертається в зону нечутливості, обумовлену надійністю роботи системи. ΔU – зона нечутливості регулятора;

$$\Delta U = U_{в.з} - U_{ном} = U_{ном} - U_{н.з}, \quad (2.6)$$

де $U_{в.з}$, $U_{н.з}$ – напруга електричної мережі, яка відповідає верхній і нижній границям зони нечутливості регулятора, що задається з умов надійності.

Очевидно, що для пристроїв РПН, які відпрацювали (відпрацьовують) свій залишковий ресурс, перемикання потрібно проводити рідше, ніж для тих, які щойно введені в експлуатацію. Чіткої залежності між тривалістю експлуатації та категоріями, наприклад, «нового» та «зношеного» пристроїв РПН не існує, оскільки це враховується цілою низкою параметрів, які аналізуються в роботі [43].

Таким чином в законі регулювання напруги (2.4) величину часу затримки сигналу τ_3 варто розглядати як основну змінну, яка з однієї сторони визначатиметься ресурсом пристрою РПН, а з іншої однозначно впливатиме на якість електроенергії на вводах споживачів (тривалість і величину провалів напруги, флікерів, перенапруг і т. д.). Для формування залежності часу затримки в системі керування трансформатором від ресурсу пристрою РПН скористаємось апаратом нечітких множин та визначеними вхідними величинами в роботі [43].

Затримка часу на перемикання визначається як

$$\tau_3 = \text{fuzzy} \left(I_d, \text{tg } \delta, W, C, CO_2, C_n H_m, R \right), \quad (2.7)$$

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

2.2 Синтез структури системи автоматичного керування трансформаторами з інтелектуальним регулятором напруги

Структура системи автоматичного керування трансформатором, яка функціонує у відповідності до закону керування (2.4), в котрій затримка часу визначається виразом (2.6), наведена на рис. 2.1.

В схемі на рис. 2.1: 1, 3 – елементи АБО; 2 – блок визначення знаку похідної огинаючої напруги на навантаженні; 4, 14 – перетворювачі імпульсного сигналу в потенційний; 5, 15 – блоки часової затримки; 6, 16 – імпульсні елементи; 7, 17 – елементи І; 8 – електрична мережа; 9 – вимірювальний канал напруги на вводах споживачів; 10 – вимірювальний канал струму навантаження підстанції; 11 – масштабатор; 12 – підсилювач; 13 – пороговий блок; 18 – електропривод пристрою перемикання відгалужень, 19 – перемикаючий пристрій; 20 – *fuzzy*-контролер.

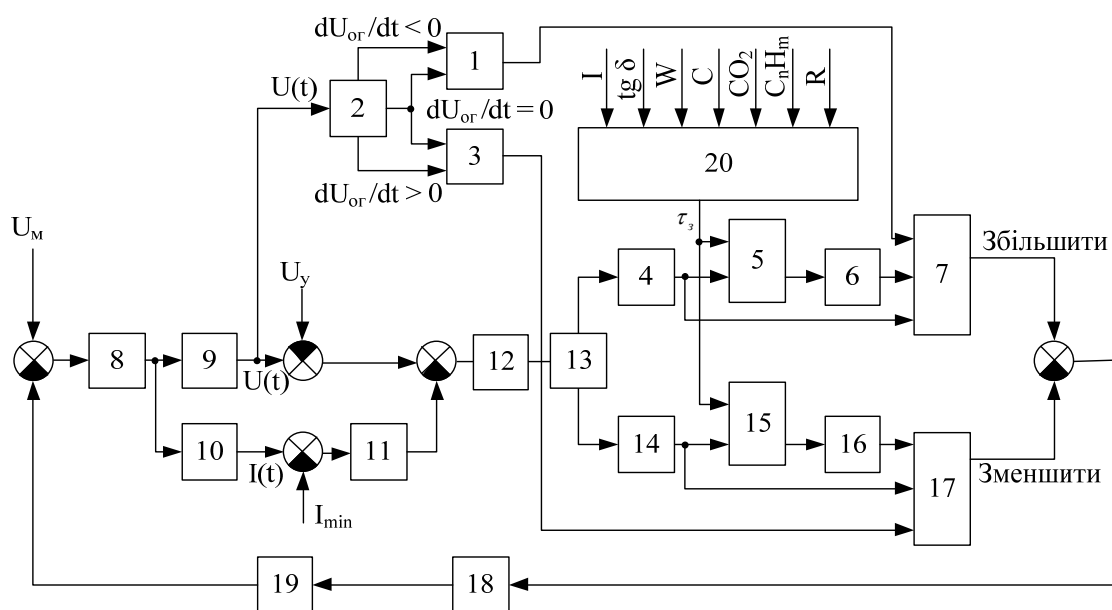


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи автоматичного керування трансформатором з керованою затримкою сигналу

Система автоматичного керування трансформатором з інтелектуальним регулятором працює таким чином: напруга розподільчої мережі вимірюється за допомогою датчика напруги 9, з якого надходить сигнал на вхід блока визначення знаку похідної огибаючої напруги на навантаженні 2, якщо внаслідок деяких причин напруга на навантаженні збільшується, то значення похідної огибаючої функції стає додатнім і сигнал з першого та другого виходів подається до першого та другого входів першого елемента «АБО» 1, на виході якого з'являється сигнал, який подається на перший вхід першого елемента «І» 7. Сигнал з датчика напруги 9 надходить на перший вхід другого суматора 21, на другий вхід якого подається значення напруги, яке відповідає номінальній напрузі на шинах підстанції, якщо ці напруги відрізняються, то на виході другого суматора 21 з'являється сигнал, який надходить на перший вхід третього суматора 23, на другий вхід якого надходить сигнал з виходу масштабатора 11, на вхід якого надходить сигнал з виходу першого суматора 22, на перший вхід якого подається сигнал з датчика струму 10, вихід якого підключений до кола струму наванта-

ження, на другий вхід першого суматора 22 подається значення струму, що знімається з шин підстанції в режимі мінімуму навантаження. Після третього суматора 23 сигнал подається на вхід підсилювача 12, вихід якого підключено до входу порогового елемента 13, який формує імпульси, що подаються на вхід першого та другого перетворювачів імпульсного сигналу в потенційний 4 та 14. Вихід першого перетворювача імпульсного сигналу в потенційний 4 підключений до другого входу першого блока часової затримки 5, на перший вхід якого надходить сигнал керованої затримки з виходу fuzzy-контролера 20, на входи якого надходить інформація від семи датчиків стану, на основі яких робить нечіткий висновок про затримку часу, сигнал з виходу першого перетворювача імпульсного сигналу в потенційний 4 підключений до третього входу першого елемента «І» 7, до другого входу якого підключено вихід першого імпульсного елемента 6, який з'єднаний з виходом блока часової затримки 5. При одночасній появі сигналів на першому, другому та третьому входах першого елемента «І» 7 на його виході з'являється сигнал, який подається на перший вхід четвертого суматора 24, вихід якого підключено до електропривода пристрою перемикання відгалужень силового трансформатора 18, вихід якого з'єднано з входом пристрою перемикання 19, який відпрацьовує команду на зміну положення РПН, що відповідає більшій кількості витків трансформатора, а, як наслідок, зменшення напруги на шинах підстанції.

При зменшенні напруги на шинах підстанції значення похідної огинаючої функції стає від'ємним, то сигнал з другого та третього виходів подається до першого та другого входів другого елемента «АБО» 3 на виході якого з'являється сигнал, який подається на третій вхід другого елемента «І» 17, другий вхід якого підключено до виходу другого перетворювача імпульсного сигналу в потенційний 14, вхід якого з'єднано з виходом пороговим блоком 13, вихід другого перетворювача імпульсного сигналу в потенційний 14 підключено до другого блока часової затримки 15, на перший вхід якого надходить сигнал керованої затримки з виходу fuzzy-контролера 20, на входи якого надходить інформація від семи датчиків стану, на основі яких робить

нечіткий висновок про затримку часу, вихід другого елемента часової затримки 15, підключений до входу другого імпульсного елемента 16, вихід якого з'єднано з першим входом другого елемента «І» 17, при одночасній появі сигналів на першому, другому та третьому входах другого елемента «І» 17 на його виході з'являється сигнал, який подається на другий вхід четвертого суматора 24, вихід якого підключено до електропривода пристрою перемикавання відгалужень силового трансформатора 18, вихід якого з'єднано з входом пристрою перемикавання 19, який відпрацьовує команду на зміну положення РПН, що відповідає меншій кількості витків трансформатора, а, як наслідок, збільшення напруги на шинах підстанції.

Втілення запропонованого інтелектуального регулятора напруги трансформаторної підстанції дозволить за рахунок введення контролера з нечіткою логікою (fuzzy-контролера), що враховує ресурс РПН трансформаторів та формує варіативну затримку на проведення перемикавання, збільшити швидкодію регулювання при експлуатації нових РПН, що сприятиме більш ефективному використанню ресурсу пристроїв РПН в системах регулювання напруги.

Синтезована система автоматичного керування трансформаторами з інтелектуальним регулятором захищена патентом [44].

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРОМ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ РЕГУЛЯТОРОМ

Відомо [45], що аналіз будь-якої системи автоматичного керування після її ідентифікації починають з оцінювання стійкості. Для цього насамперед використовують різні критерії стійкості [46]. Але дослідити стійкість систем, до складу яких крім лінійних входять нелінійні, імпульсні та цифрові елементи, за допомогою відомих критеріїв стійкості неможливо.

Тому оцінку стійкості досліджуваної системи автоматичного керування доцільно сумістити з оцінкою якості її перехідних процесів, які у випадку стійкої системи будуть з часом затухати. В свою чергу перехідний процес в системі зручно оцінювати за її реакцією на найбільші можливі стрибки задавальних або збурювальних впливів.

Очевидно, що синтезована система також відноситься до суттєво нелінійних, дослідження стійкості якої можна здійснити тільки шляхом комп'ютерного моделювання.

3.1 Математичні моделі елементів системи автоматичного керування трансформатором з інтелектуальним регулятором

Математичне моделювання процесів в системах регулювання дозволяє значно спростити налагодження елементів системи регулювання, виходячи з критеріїв стійкої роботи [47]. При цьому рівняння, що входять до складу математичної моделі і якими описуються перехідні процеси в системі, повинні адекватно відображати фізичну сутність об'єкта дослідження та бути достатньо простими.

Диференціальні рівняння мають досить складну методику розв'язання та пошуку коренів [48], а тому їх прийнято аналізувати за допомогою передаточних функцій, які отримують з цих рівнянь з використанням перетворень Лапласа для сигналів об'єктів [49].

Структурна схема системи автоматичного керування трансформатором з керованою затримкою сигналу зображена на рис. 2.1.

Функціональне призначення блоків часової затримки 5, 15 полягає в тому, щоб через деякий час τ після подачі вхідного сигналу відтворити на виході цей же сигнал без спотворення і підсилення. Такий блок описується рівнянням вигляду

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

причому $t > \tau$.

Передатна функція такого блока має вигляд

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

де τ – час затримки сигналу.

Електропривод 18 пристрою РПН має власний час перемикання контактів від 3 до 12 с в залежності від його типу. Тому передатна функція електропривода має вигляд

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

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

Пристрій РПН 19 описується залежністю, яка має суттєво нелінійний характер

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

де u_0 – напруга ступені перемикання.

Імпульсні елементи 6, 16 виконують амплітудноімпульсну модуляцію і описуються передатною функцією

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

Пороговий блок 3 описується залежністю вигляду

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

де Δ – значення зони нечутливості; k – тангенс кута нахилу характеристики порогового блока.

Логічні елементи І 7 та 17 мають передаточну функцію [50]:

$$W(p)_I = \begin{cases} y > 0, & \text{якщо } \begin{cases} x_1 > 0, \\ x_2 > 0, \\ x_3 > 0, \end{cases} \\ y \leq 0, & \text{якщо } x_1 \leq 0, \\ y \leq 0, & \text{якщо } x_2 \leq 0, \\ y \leq 0, & \text{якщо } x_3 \leq 0. \end{cases} \quad (3.7)$$

де x_1, x_2, x_3 – вхідні сигнали; y – вихідний сигнал.

Передаточна функція логічного елемента АБО 1 та 3 має вигляд

$$W(p)_{\text{АБО}} = \begin{cases} y \leq 0, & \text{якщо } \begin{cases} x_1 \leq 0, \\ x_2 \leq 0, \end{cases} \\ y > 0, & \text{якщо } x_1 > 0, \\ y > 0, & \text{якщо } x_2 > 0. \end{cases} \quad (3.8)$$

Перетворювачі імпульсного сигналу в потенційний 4 і 14 представляють собою інтегратори і їх передаточні функції мають вигляд

$$W_n(p) = \frac{1}{p}. \quad (3.9)$$

3.2 Математична модель визначення часу затримки на перемикання відгалуження

Прийняття рішень у проблемно-орієнтованих інформаційних системах та системах керування здійснюється в умовах апріорної невизначеності, обумовленої неточністю або неповнотою вхідних даних, стохастичною природою зовнішніх впливів, відсутністю адекватної математичної моделі функціонування, нечіткістю мети, людським фактором [51–53] та ін. Невизначеність системи призводить до зростання ризиків від прийняття неефективних рішень, результатом чого можуть бути негативні економічні, технічні та соціальні наслідки. Невизначеності у системах прийняття рішень компенсують за допомогою різноманітних методів штучного інтелекту. Для ефективного прийняття рішень при невизначеності умов функціонування системи застосовують методи на основі правил нечіткої логіки. Такі методи ґрунтуються на нечітких множинах і використовують лінгвістичні величини і висловлювання для опису стратегій прийняття рішень [54–56].

Методи нечітких множин особливо корисні за відсутності точної математичної моделі функціонування системи. Теорія нечітких множин дає можливість застосувати для прийняття рішень неточні та суб'єктивні експертні знання про предметну область без формалізації їх у вигляді традиційних математичних моделей. З використанням теорії нечітких множин вирішуються питання узгодження суперечливих критеріїв прийняття рішень, створення логічних регуляторів систем.

Нечіткі множини дають змогу застосовувати лінгвістичний опис складних процесів, встановлювати нечіткі відношення між поняттями, прогнозувати поведінку системи, формувати множину альтернативних дій, виконувати формальний опис нечітких правил прийняття рішень.

Методи теорії нечітких множин є зручним засобом проектування інтерфейсів у людино-машинних системах.

Для формування залежності часу затримки в системі керування трансформатором від ресурсу пристрою РПН скористаємось апаратом нечітких множин та визначеними вхідними величинами в роботі [43].

Лінгвістична оцінка вхідних величин наведена в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Вхідні параметри каналу визначення стану РПН та їх лінгвістична оцінка

Пара-метри	Назва	Діапазон значень	Терми
X ₁	Струм електродвигуна привода, А	1,0...2,5	Низький (Н), середній (С), вище середнього (ВС), великий (В)
X ₂	Тангенс кута діелектричних втрат, %	2,0...4,2	Низький (Н), середній (С), вище середнього (ВС), великий (В)
X ₃	Вміст вологи в маслі, г/т	10...25	Низький (Н), середній (С), вище середнього (ВС), великий (В)
X ₄	Ємність масла, пФ	8...16	Низька (Н), середня (С), велика (В)
X ₅	Вміст розчиненого СО ₂ , мкл/л	1800...4000	Низький (Н), середній (С), великий (В)
X ₆	Вміст розчинених вуглеводнів, мкл/л	45...180	Низький (Н), середній (С), вище середнього (ВС), великий (В)
X ₇	Перехідний опір контактів, мкОм	16...20	Низький (Н), середній (С), великий (В)

Задача полягає в тому, щоб кожній комбінації вхідних параметрів поставити у відповідність одне із значень затримки часу в систему автоматичного керування трансформатором d_j ($j = \overline{1,10}$), яким враховується ресурс пристрою РПН.

Отже, вихідною величиною $Y = (d_1, d_2, \dots, d_m)$ є затримка часу. Користуючись введеними термами, створюємо нечітку базу знань, фрагмент якої наведений в табл. 3.2.

Для аналітичного запису термів використаємо функції належності Гауса (3.10), що відповідає нормальному закону розподілу належності вхідної величини до вибраних термів згідно з центральною граничною теоремою [57]:

$$\mu = \exp\left(-\frac{(x - b)^2}{2 \cdot c^2}\right), \quad (3.10)$$

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

Таблиця 3.2 – Нечітка база знань

Вхідні змінні							Вихідна змінна
X1 (I)	X2 (tg δ)	X3 (W)	X4 (C)	X5 (CO2)	X6 (CnHm)	X7 (R)	Y
H	H	H	H	H	H	H	t1
H	H	C	H	C	H	H	
H	H	C	H	C	C	H	t2
H	C	C	C	C	C	C	t3
C	C	C	C	C	C	C	t4
C	C	BC	C	C	C	C	t5
C	BC	BC	C	C	BC	C	t6
C	B	BC	C	C	BC	C	t7
BC	B	BC	C	C	BC	C	t8
BC	B	BC	B	B	BC	B	t9
BC	B	BC	B	B	B	B	t10
B	B	B	B	B	B	B	

На основі бази знань і функції належності термів складаємо нечіткі логічні рівняння, що описують модель визначення часу затримки на перемикання відгалуження.

Математична модель, що відповідає базі знань в табл. 3.2, наведена в системі (3.11).

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \mu^{d_1}(d) = \left[\mu^H(X_1) \cdot \mu^H(X_2) \cdot \mu^H(X_3) \cdot \mu^H(X_4) \cdot \mu^H(X_5) \cdot \mu^H(X_6) \cdot \mu^H(X_7) \right] \cdot \vee \\
 \quad \vee \left[\mu^H(X_1) \cdot \mu^H(X_2) \cdot \mu^C(X_3) \cdot \mu^H(X_4) \cdot \mu^C(X_5) \cdot \mu^H(X_6) \cdot \mu^H(X_7) \right]; \\
 \mu^{d_2}(d) = \left[\mu^H(X_1) \cdot \mu^H(X_2) \cdot \mu^C(X_3) \cdot \mu^H(X_4) \cdot \mu^C(X_5) \cdot \mu^C(X_6) \cdot \mu^H(X_7) \right]; \\
 \mu^{d_3}(d) = \left[\mu^H(X_1) \cdot \mu^C(X_2) \cdot \mu^C(X_3) \cdot \mu^C(X_4) \cdot \mu^C(X_5) \cdot \mu^C(X_6) \cdot \mu^C(X_7) \right]; \\
 \mu^{d_4}(d) = \left[\mu^C(X_1) \cdot \mu^C(X_2) \cdot \mu^C(X_3) \cdot \mu^C(X_4) \cdot \mu^C(X_5) \cdot \mu^C(X_6) \cdot \mu^C(X_7) \right]; \\
 \mu^{d_5}(d) = \left[\mu^C(X_1) \cdot \mu^C(X_2) \cdot \mu^{BC}(X_3) \cdot \mu^C(X_4) \cdot \mu^C(X_5) \cdot \mu^C(X_6) \cdot \mu^C(X_7) \right]; \\
 \mu^{d_6}(d) = \left[\mu^C(X_1) \cdot \mu^{BC}(X_2) \cdot \mu^{BC}(X_3) \cdot \mu^C(X_4) \cdot \mu^C(X_5) \cdot \mu^{BC}(X_6) \cdot \mu^C(X_7) \right]; \\
 \mu^{d_7}(d) = \left[\mu^C(X_1) \cdot \mu^B(X_2) \cdot \mu^{BC}(X_3) \cdot \mu^C(X_4) \cdot \mu^C(X_5) \cdot \mu^{BC}(X_6) \cdot \mu^C(X_7) \right]; \\
 \mu^{d_8}(d) = \left[\mu^{BC}(X_1) \cdot \mu^B(X_2) \cdot \mu^{BC}(X_3) \cdot \mu^C(X_4) \cdot \mu^C(X_5) \cdot \mu^{BC}(X_6) \cdot \mu^C(X_7) \right]; \\
 \mu^{d_9}(d) = \left[\mu^{BC}(X_1) \cdot \mu^B(X_2) \cdot \mu^{BC}(X_3) \cdot \mu^B(X_4) \cdot \mu^B(X_5) \cdot \mu^{BC}(X_6) \cdot \mu^B(X_7) \right]; \\
 \mu^{d_{10}}(d) = \left[\mu^{BC}(X_1) \cdot \mu^B(X_2) \cdot \mu^{BC}(X_3) \cdot \mu^B(X_4) \cdot \mu^B(X_5) \cdot \mu^B(X_6) \cdot \mu^B(X_7) \right] \cdot \vee \\
 \quad \vee \left[\mu^B(X_1) \cdot \mu^B(X_2) \cdot \mu^B(X_3) \cdot \mu^B(X_4) \cdot \mu^B(X_5) \cdot \mu^B(X_6) \cdot \mu^B(X_7) \right];
 \end{array} \right. \quad (3.11)$$

Отриманий вираз нечіткого логічного висновку щодо встановлення часу затримки в системі автоматичного керування у вигляді множини Y включається в закон регулювання (2.4) напруги у вигляді додаткової умови (2.6) на формування значення затримки часу τ_3 .

3.3 Комп'ютерне моделювання роботи системи автоматичного керування трансформатором з інтелектуальним регулятором

Оскільки використання класичних критеріїв стійкості неможливе, для дослідження системи автоматичного регулювання на стійкість необхідно застосувати комп'ютерне моделювання.

Комп'ютерне моделювання і дослідження стійкості системи, яка реалізує закон керування (2.4), в якому затримка часу визначається виразом (2.6), проведено в [58]

Для комп'ютерного моделювання застосуємо пакет прикладних програм (ППП) MatLab [59, 60]. Цей ППП дає можливість розв'язувати широке коло математичних задач і містить в своєму складі програму Simulink [61], за допомогою якої можна будувати схеми моделювання досліджуваних систем і отримувати результати динамічного моделювання.

Розроблена комп'ютерна модель дозволяє визначити параметри налагодження блоків регулятора для забезпечення заданого рівня напруги в споживачів, а також оцінити ефективність роботи регулятора з відомими параметрами за величиною відхилення регульованих величин від заданих значень з усіма перевагами комп'ютерного моделювання. Крім того, в такій моделі зручно проводити діагностування роботи регулятора по блоках, оскільки функціональні блоки моделі регулятора відповідають не лише математичній моделі, але і структурі фізичного регулятора.

Застосування моделі дозволить швидко провести пошук параметрів налагодження нечіткого регулятора на роботу з трансформаторними підстанціями різної потужності, різних рівнів напруг.

Припустимо, що така система регулювання встановлена на підстанції 110/10 кВ, для моделювання задаємо значення зони нечутливості

регулятора на рівні $\pm 5\%$ згідно з [1] за напругою. Система складається з автоматичного регулятора, що керує положенням пристроїв РПН силового трансформатора у відповідності до закону керування (2.4) в якому затримка часу визначається виразом (2.6). Загальна модель такої системи розроблена в середовищі Matlab Simulink в повному обсязі з поелементною деталізацією відповідно до [62, 63]. Модель системи регулювання показана на рис. 3.1.

На рис. 3.1: 1 – блок завдання значення напруги розподільчої мережі; 2 – блок зміни напруги розподільчої мережі; 3 – модель регулятора напруги з інтелектуальним регулятором; 4 – модель пристрою РПН силового трансформатора; 5 – модель силового трансформатора; 6 – модель електричної мережі.

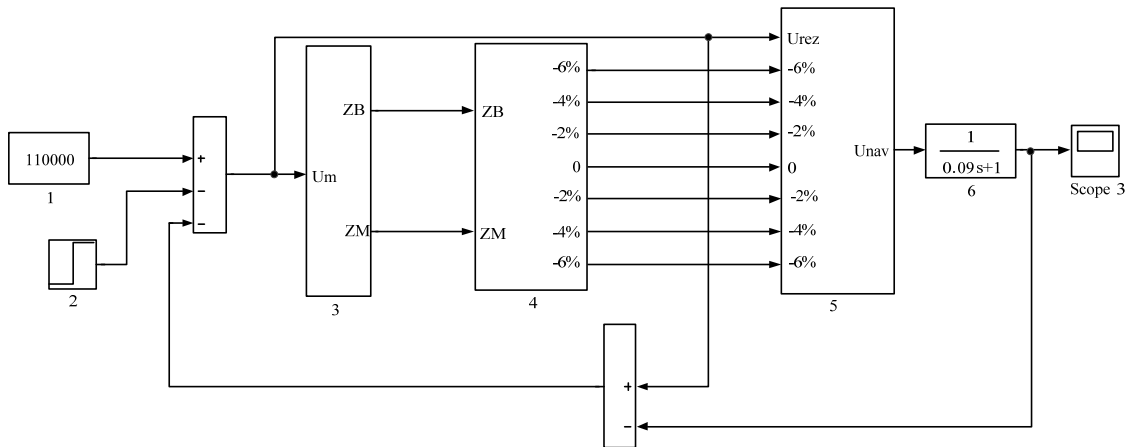


Рисунок 3.1 – Модель системи регулювання напруги трансформаторної підстанції з інтелектуальним регулятором

Модель регулятора напруги з керованою затримкою часу наведена на рис. 3.2. Вихідним сигналом регулятора є імпульси на виходах логічних блоків «I» в тракті регулювання напруги на навантаженні (Zb та Zm).

Напруга розподільчої мережі надходить на входи датчиків напруги та струму, відповідно. Датчики перетворюють вхідну величину в уніфікований сигнал або передають інформацію по цифровому інтерфейсу. Далі сигнал з виходу датчика напруги надходить на вхід блока визначення знаку похідної огибаючої регульованої напруги, та на су-

матор, де порівнюється із значенням напруги, що відповідає номінальному режиму роботи.

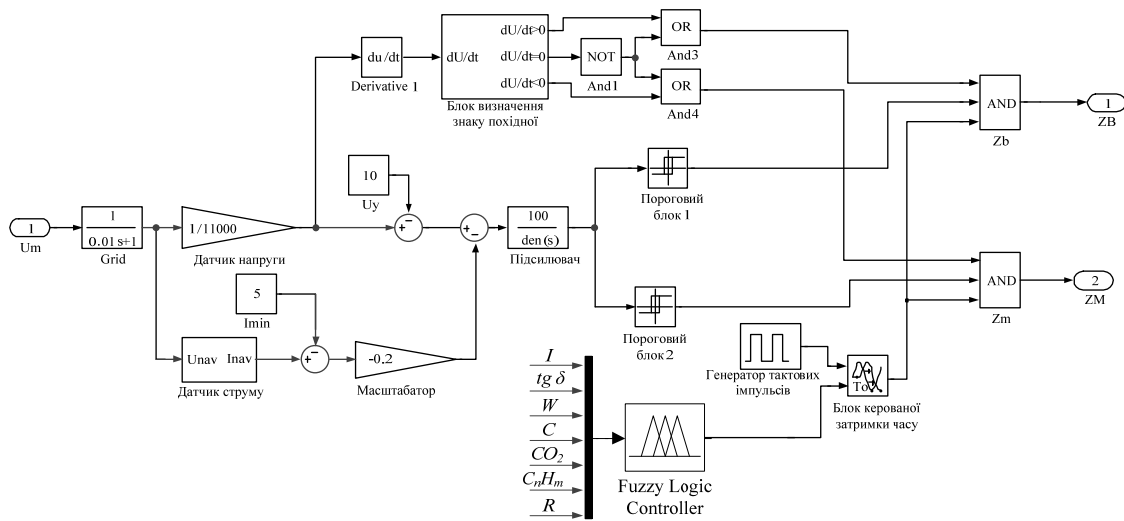


Рисунок 3.2 – Модель автоматичного регулятора напруги з керованою затримкою часу

Оскільки струм навантаження є одним із збурень в тракті регулювання напруги, то обчислення цього параметра відбувається за допомогою блока Current sensor, елементна будова якого наведена на рис. 3.3.

Важливим елементом блока визначення струму навантаження є масштабатор, що забезпечує перетворення сигналу в уніфікований, що змінюється в межах 0–10 В пропорційно до вхідного.

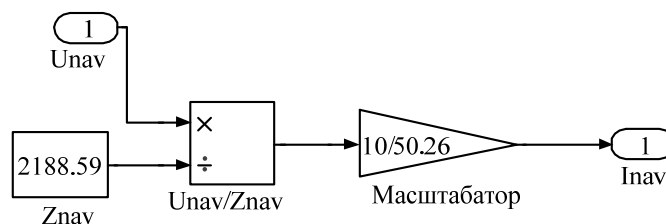


Рисунок 3.3 – Структура блоку датчика струму

Вихідний сигнал датчика струму надходить на вхід суматора, де відбувається порівняння сигналу виміряного струму навантаження та струму навантаження, що знімається з шин підстанції в режимі міні-

муму. Далі сигнал надходить на загальний суматор де порівнюються сигнали з виходів датчика стуму та напруги. Потім сигнал надходить на вхід підсилювача. Підсилювач підсилює сигнал та фільтрує короткочасні коливання вхідного сигналу. Підсилювач представляє собою аперіодичну ланку першого порядку з коефіцієнтом підсилення та сталою часу. Далі сигнал надходить на порогові блоки, які реалізовано за допомогою релейних елементів. При зниженні напруги на навантаженні більше за значення зони нечутливості спрацьовує другий пороговий елемент і на його виході з'являється сигнал «1». При збільшенні напруги, більше за значення зони нечутливості спрацьовує перший релейний елемент та на його виході з'являється сигнал «1».

Оскільки далі принцип побудови ланцюгів формування команди «Збільшити» та «Зменшити» однаковий, то будемо розглядати один з цих ланцюгів керування.

Для прикладу обираємо ланцюг формування команди «Зменшити». Після порогового елемента сигнал надходить на вхід логічного елемента «І», який відкривається внаслідок надходження сигналу з блока часової затримки та сигналу з блока визначення знаку похідної регульованої напруги.

Блок часової затримки реалізовано за допомогою елемента Variable Transport Delay, що має два входи: перший вхід – це вхід для формування керованої затримки часу, а другий – вхідна змінна.

В якості вхідної змінної використовується генератор тактових імпульсів, визначеної частоти та шпаруватості.

Сигнал для формування керованої затримки часу надходить від блока Fuzzy, що містить в собі нечіткий регулятор, та сім датчиків стану. Нечіткий регулятор робить висновок на основі сигналів з датчиків. В табл. 3.2 наведено нечітку базу знань, на основі якої працює регулятор.

Після відкриття елемента «І» проходить послідовність імпульсів на виконання перемикачів пристрою РПН, для компенсації збурення, що виникло внаслідок зміни напруги.

В фізичному регуляторі має місце блок визначення знаку похідної огинаючої регульованої напруги. В моделі регулятора функцію визначення знаку похідної огинаючої вхідного сигналу реалізовано за до-

помогою блока Sign dU/dt , будову якого наведено на рис. 3.4. Модель блока має елемент з незначною зоною нечутливості Dead Zone, яка присутня в блокові визначення знаку похідної будь-якої конструкції. Далі сигнал похідної надходить на вхід знакового елементу Sign. З його виходу знімається сигнал, що рівний 0, якщо вхідний сигнал рівний 0 (тобто вхідний сигнал регулятора не змінюється і його похідна рівна 0), якщо вхідний сигнал регулятора наростає, то його похідна більша 0 і на виході елементу Sign буде присутнім сигнал 1, що викличе спрацювання релейного елемента $+dx/dt$ та появу сигналу логічної 1 на виході $dU/dt > 0$ блока визначення знаку похідної. В тому разі, якщо сигнал на вході регулятора зменшується, його похідна буде від'ємною, то на виході знакового елемента Sign буде сигнал «-1», він перетворюється в сигнал додатної полярності за допомогою блока Gain з коефіцієнтом підсилення -1 та викликає спрацювання другого релейного блока $-dx/dt$. З виходу останнього знімається сигнал логічної 1 в тому разі, коли похідна огинаючої вхідного сигналу менша 0. Якщо швидкість наростання чи спадання вхідного сигналу регулятора незначна, то блок визначення знаку похідної огинаючої видає сигнал $dU/dt = 0$ за рахунок наявності зони нечутливості.

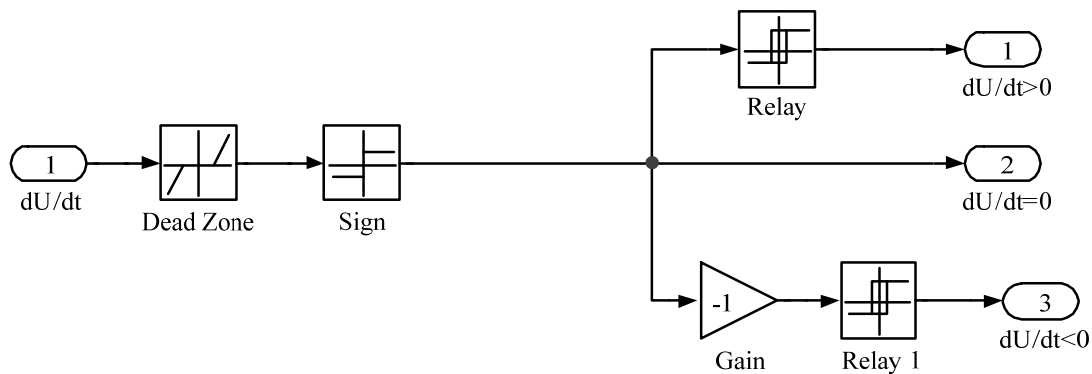


Рисунок 3.4 – Модель блоку визначення знаку похідної огинаючої Sign dU/dt

Структурна схема моделі пристрою РПН силового трансформатора показана на рис. 3.5.

Модель силового трансформатора, розроблена в [63], використана з врахуванням коефіцієнта трансформації 110/10 кВ.

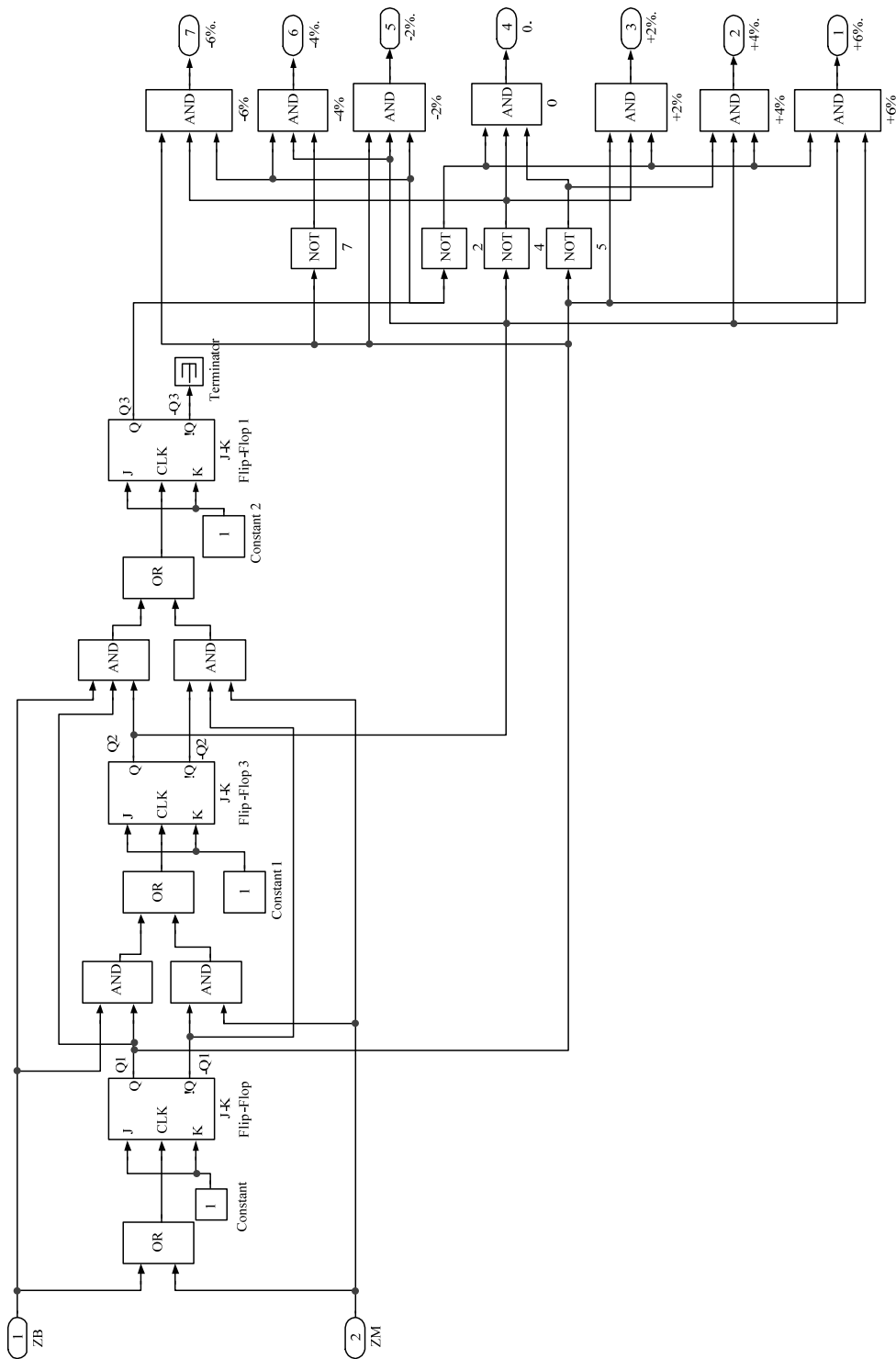


Рисунок 3.5 – Модель пристрою РПН силового трансформатора

Модель силового трансформатора зі змінним коефіцієнтом трансформації показано на рис. 3.6.

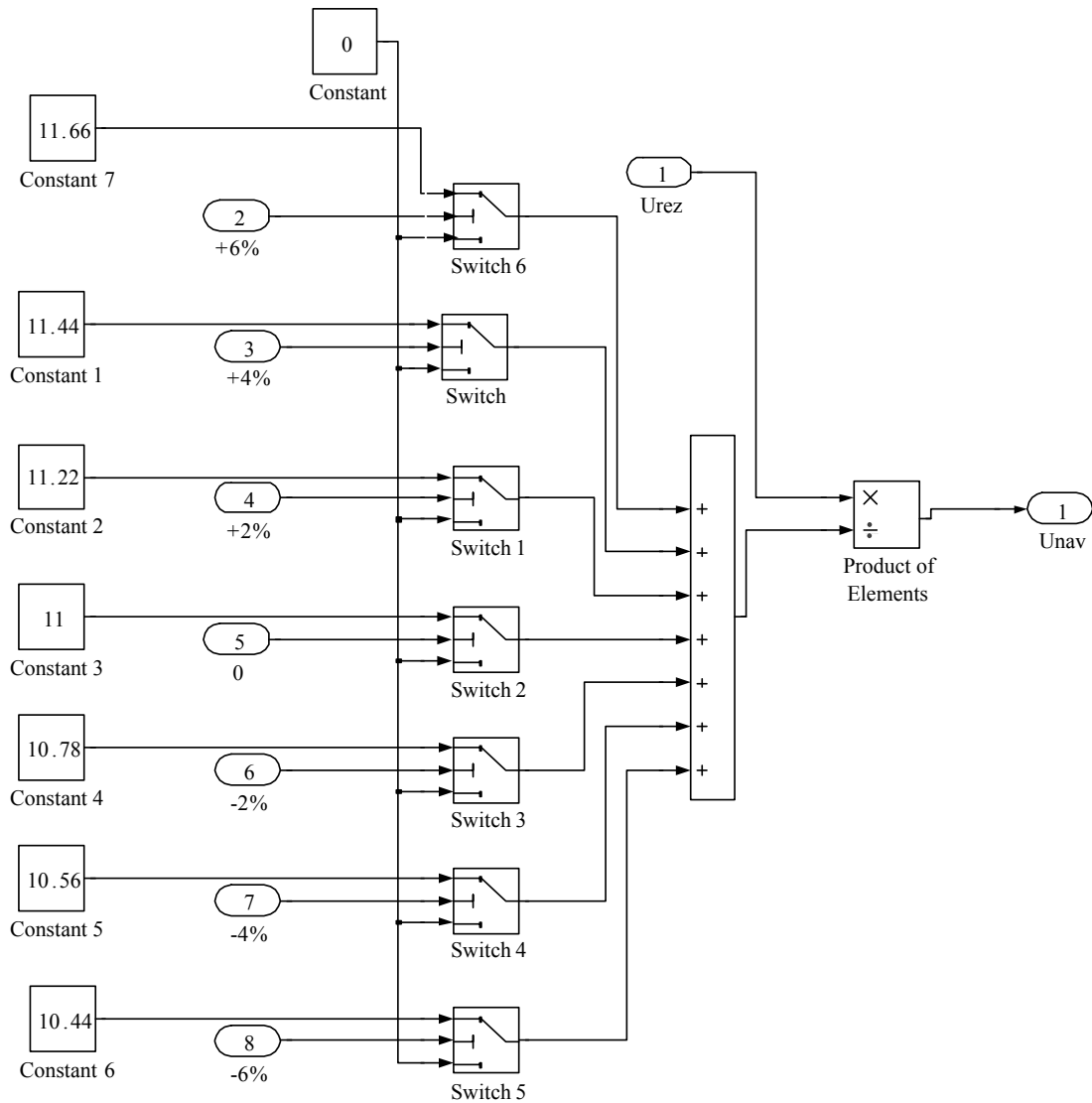


Рисунок 3.6 – Модель силового трансформатора зі змінним коефіцієнтом трансформації Power transformer

Результати моделювання у вигляді часових діаграм напруги мережі, напруги на навантаженні наведені на рис. 3.7–3.9. На діаграмах: $U_{\text{мер}}(t)$ – напруга мережі, кВ; $U_{\text{нав}}(t)$ – напруга на навантаженні.

В табл. 3.3–3.5 наведено параметри вхідних даних від датчиків стану, на основі яких формується варіативна затримка часу.

Таблиця 3.3 – Вхідні параметри від датчиків стану для «нового» пристрою РПН

X_1 (I)	X_2 (tg δ)	X_3 (W)	X_4 (C)	X_5 (CO ₂)	X_6 (C _n H _m)	X_7 (R)
1,5	2,1	14	11	2050	87,5	16,4

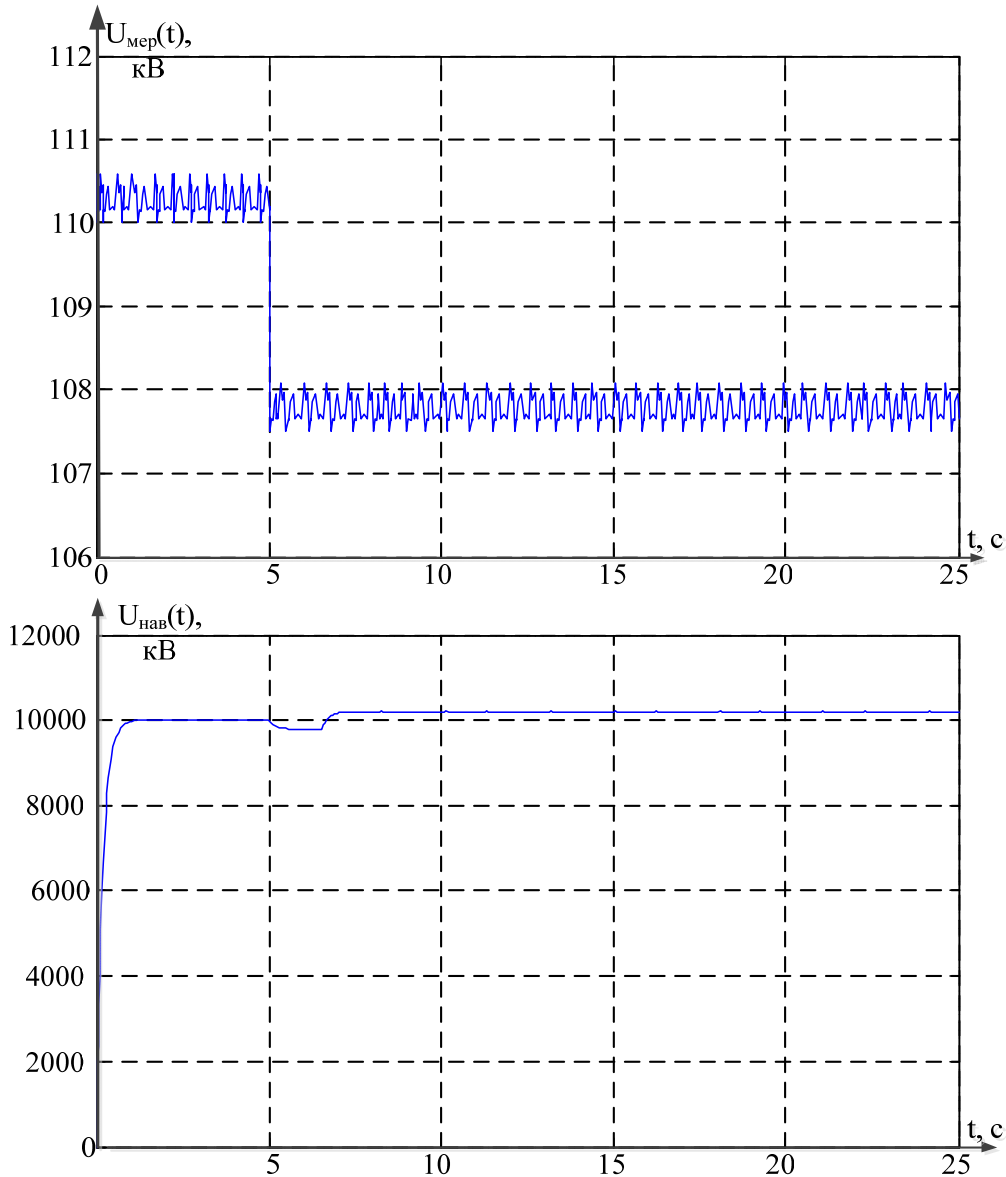


Рисунок 3.7 – Діаграма роботи системи регулювання для «нового» пристрою РПН при ступінчастій зміні напруги мережі від 110 до 107,5 кВ

Таблиця 3.4 – Вхідні параметри від датчиків стану для пристрою РПН, що знаходиться в роботі

X_1 (I)	X_2 (tg δ)	X_3 (W)	X_4 (C)	X_5 (CO ₂)	X_6 (C _n H _m)	X_7 (R)
2,2	3	12,3	15,6	2650	156	17

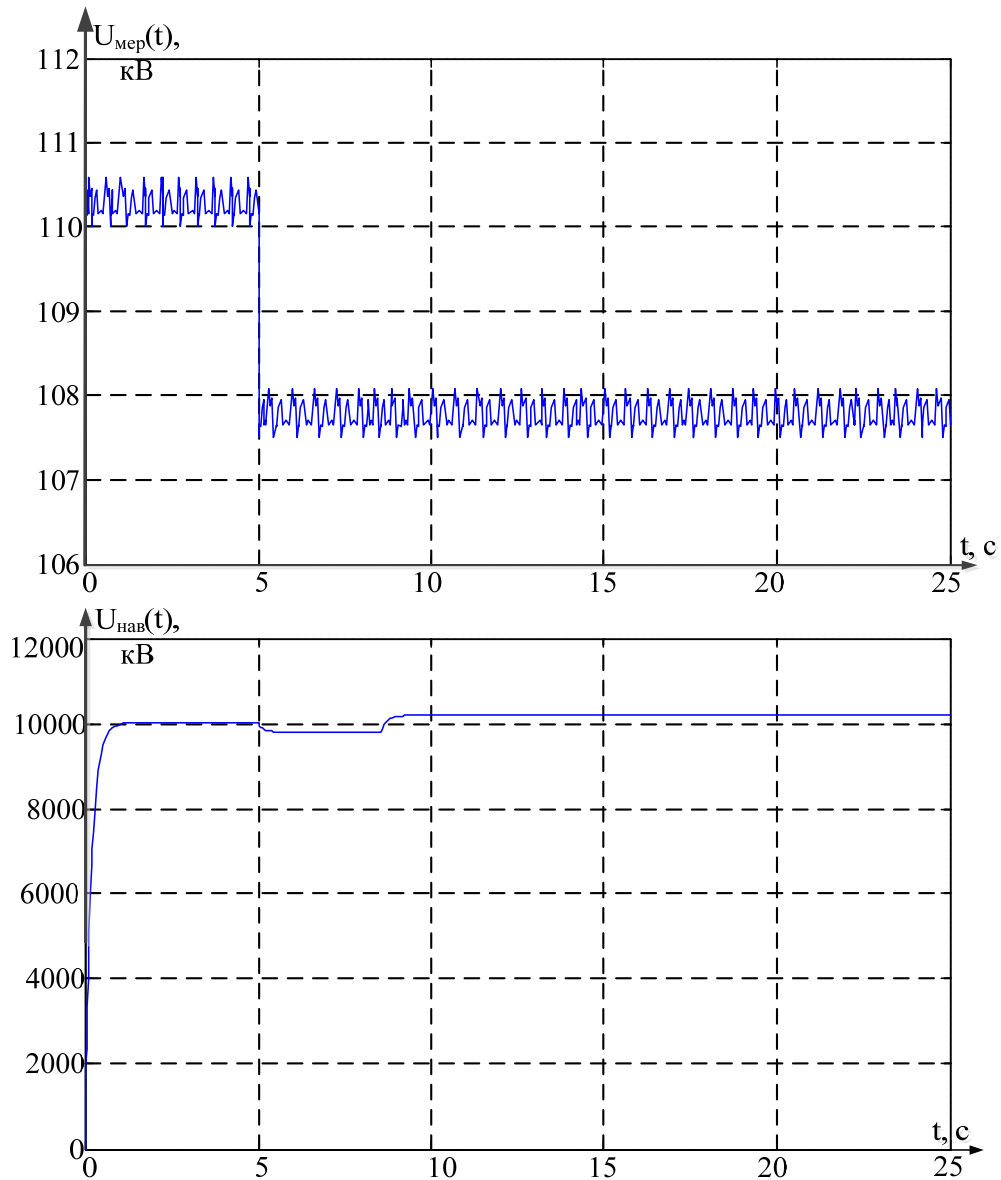


Рисунок 3.8 – Діаграма роботи системи регулювання для пристрою РПН, що знаходиться в експлуатації при ступінчастій зміні напруги мережі від 110 до 107,5 кВ

Таблиця 3.5 – Вхідні параметри від датчиків стану для «зношеного» пристрою РПН

X_1 (I)	X_2 (tg δ)	X_3 (W)	X_4 (C)	X_5 (CO ₂)	X_6 (C _n H _m)	X_7 (R)
2,5	4,2	23	15	3850	170	19

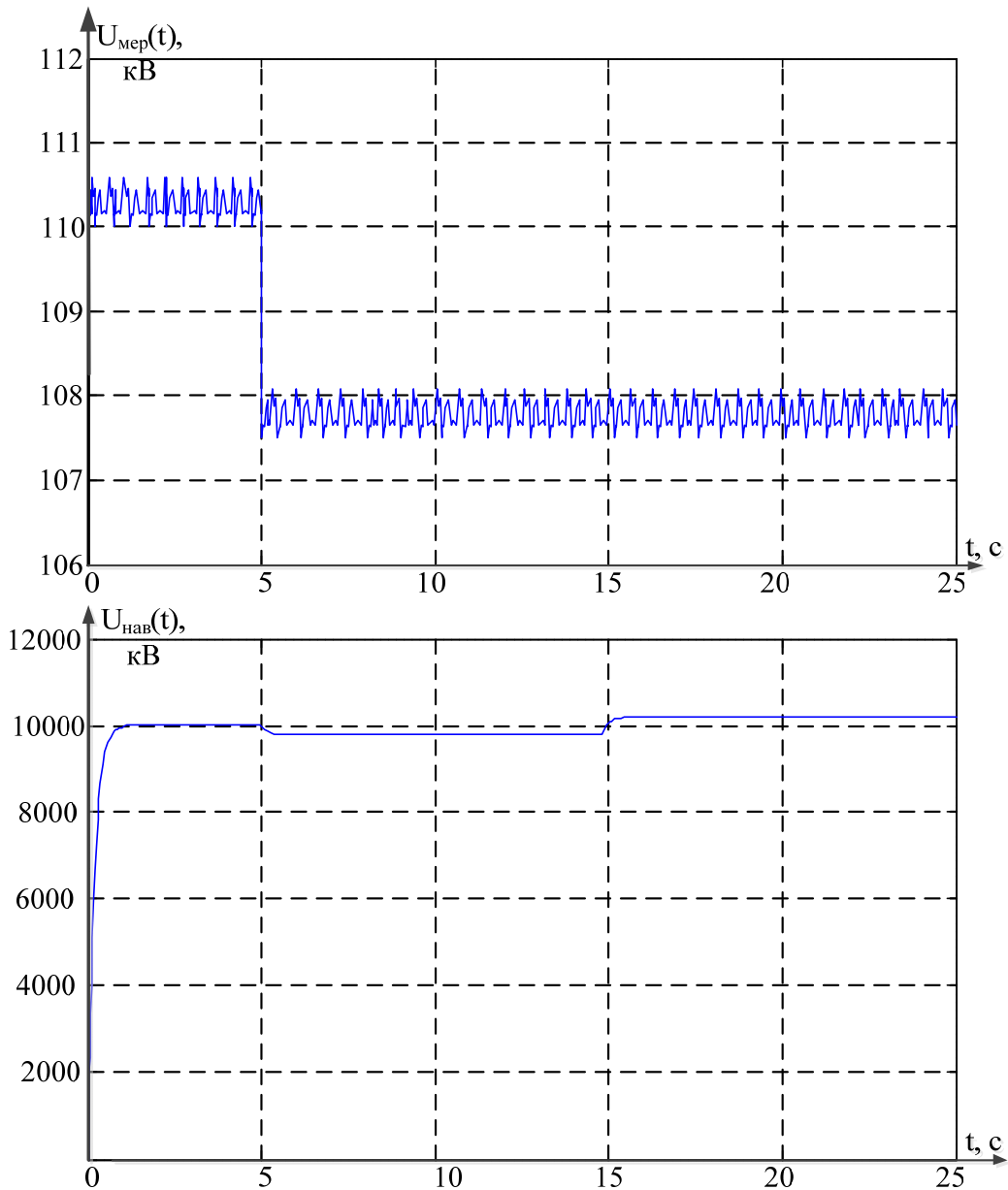


Рисунок 3.9 – Діаграма роботи системи регулювання для «зношеного» пристрою РПН при ступінчастій зміні напруги мережі від 110 до 107,5 кВ

РОЗДІЛ 4

МІКРОПРОЦЕСОРНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРОМ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ РЕГУЛЯТОРОМ

Використання мікропроцесорної техніки в технологічних процесах зростає з кожним роком. Тепер головною частиною майже кожної системи автоматичного регулювання є обчислювальна машина: або мікроконтролер, або промисловий комп'ютер, або ЕОМ. Такі системи крім основної задачі – процесу регулювання – виконують низку сервісних функцій: збір, зберігання і обробка інформації про об'єкт регулювання, передавання цієї інформації до інших рівнів системи керування (наприклад, на диспетчерський пульт) та інші.

В деяких системах для ефективного керування трансформатором використовують контроль положення пристрою перемикачів [64]. Це дає можливість контролювати відпрацювання команд перемикачів і вчасно діагностувати вихід з ладу механізму пристрою РПН.

Слід зазначити, що при застосуванні сучасної елементної бази вартість розробки і собівартість мікропроцесорного пристрою значно нижчі, ніж однакового за функціями аналогового, але ефективність системи значно вища [65].

4.1. Структурна схема віддаленого керування трансформаторною підстанцією

Сучасний етап розвитку електроенергетики зумовив необхідність застосування простого і потужного середовища для наскрізної спостережуваності функціонування розподільчого електромережевого комплексу регіональних електропостачальних компаній в просторі їх систем керування трансформаторними підстанціями [66]. Крім того, важливо вдосконалювати не лише інтегроване середовище систем нагляду та оперативно-диспетчерського управління трансформаторними підстанціями, але й елементну базу таких систем на нижніх рівнях з метою збільшення їх надійності.

Отже, існує проблема побудови таких систем керування трансформаторами, які мають високий ступінь інтеграції в системи оперативно-диспетчерського управління, належну надійність та швидкодію.

Наукове вирішення питання вдосконалення систем віддаленого керування трансформаторними підстанціями на регіональному рівні наведено в роботах [66, 67]. Однак в зазначених роботах в основному розглядаються такі протоколи телемеханіки, як ТМ-512, КОМПАС, ГРАНИТ, УТК-1, ТМ-800А та подібні, які не відповідають принципам відкритості та стандартизації інтерфейсів згідно зі стандартом МЭК 60870-5-104(2000) [68]. Провідні електротехнічні компанії пропонують комплексне вирішення проблем систем керування трансформаторами в роботах [69, 70]. Однак впровадження рішень, що описані в цих роботах, на вітчизняних об'єктах є ускладненим через недостатнє фінансування електроенергетичного комплексу (наявність великої кількості пільгових споживачів електроенергії, заборгованостей за спожиту електроенергію і інші причини). Важливість підвищення надійності саме систем керування трансформаторами підкреслюється лідерами-виробниками обладнання електроенергетичних систем [71].

Внаслідок такої тенденції необхідно вирішення проблеми з огляду на застосування сучасних технологій передачі інформації та з врахуванням цінного досвіду вітчизняних науковців у сфері створення систем керування трансформаторами. В роботі [66] запропоновано систему керування трансформаторами з пристроями РПН з інтелектуальним регулятором, однак для її вдосконалення необхідно розробити модель віддаленого керування регулятором та виконавчим пристроєм системи керування з використанням перетворювача частоти, що дозволить збільшити довговічність механічних вузлів пристроїв РПН та надійність систем електропостачання.

Запропонована структура системи керування [72] має високу швидкодію, причому відстань від автоматизованого робочого місця (АРМ) оператора до підстанції практично не обмежена за рахунок використання Internet-протоколу TCP/IP. Протокол нижнього рівня, виконаний за принципом розімкненої струмової петлі CANopen, також вигідно вирізняється з поміж аналогічних за рахунок універсальності та високої швидкодії.

Структура системи віддаленого керування трансформатором, яка функціонує у відповідності до закону керування (2.4) в якому затримка часу визначається виразом (2.6) показано на рис. 4.1.

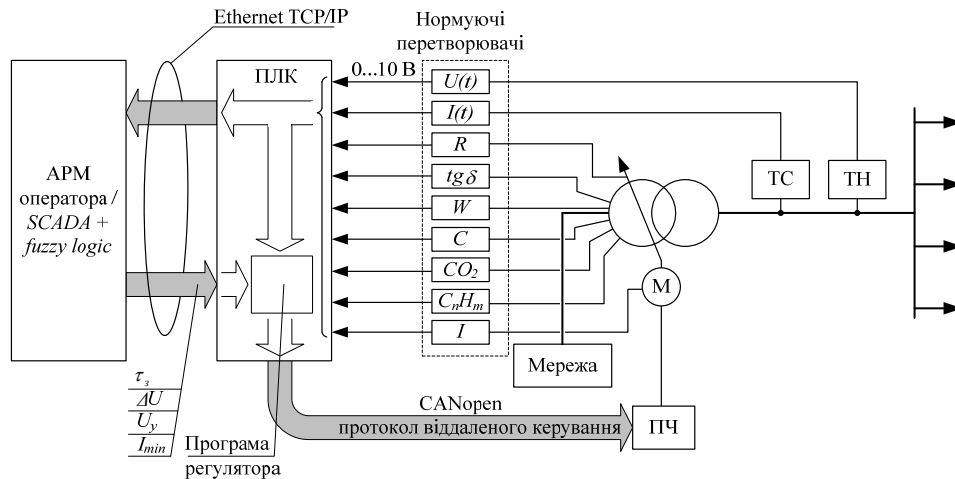


Рисунок 4.1 – Структурна схема системи віддаленого керування пристроєм РПН

В схемі на рис. 4.1: ТС, ТН – вимірювальні трансформатори струму та напруги; ПЛК – програмований логічний контролер; АРМ – автоматизоване робоче місце оператора; ПЧ – перетворювач частоти.

4.2 Розробка програмного забезпечення мікропроцесорного регулятора

для системи автоматичного керування трансформаторами

Для функціонування системи диспетчерського керування трансформаторною підстанцією розроблено SCADA-систему. Вона виконує такі функції:

- збір та реєстрація первинної документації про хід процесу регулювання напруги;
- представлення інформації в вигляді мнемосхеми;
- вибір режиму керування;
- визначення часу затримки на перемикання;
- визначення комутаційного ресурсу пристрою РПН;
- ведення історії технологічного процесу;

- перегляд та аналіз ходу технологічного процесу;
- формування звітної документації.

Інформація від датчиків стану пристрою РПН та шини споживачів транзитом передаються через внутрішні регістри ПЛК до каналів SCADA-системи.

Організація каналів в інтегрованому середовищі розробки SCADA-систем Trace Mode наведена на рис. 4.2.

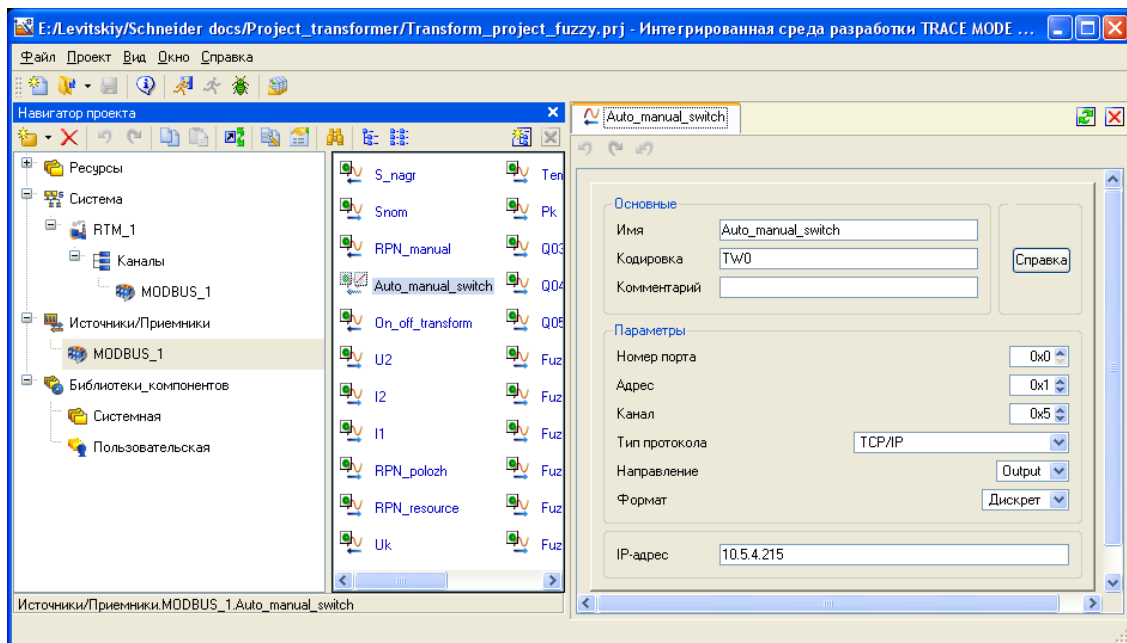


Рисунок 4.2 – Вікно наладки каналів системи віддаленого керування пристроєм РПН в інтегрованому середовищі розробки

Для обчислення часу затримки на формування сигналу перемикачання пристроєм РПН відповідно до даних датчиків стану необхідно розв’язати нечіткий логічний вираз (2.7), який в розширеному вигляді представлений системою рівнянь (3.11).

Розв’язок цієї системи рівнянь в режимі реального часу знаходиться шляхом використання функції нечіткого регулятора в середовищі розробки. Для її налагодження створюється окрема програма з вказівкою змінних, що оцінюватимуться в нечіткому регуляторі FZCTR для пошуку розв’язку. Фрагмент програми наведений нижче на рис. 4.3.

PROGRAM

```
VAR_INPUT Fuzzy_R_R : REAL; END_VAR  
VAR_INPUT Fuzzy_tg_D_R : REAL; END_VAR  
VAR_INPUT Fuzzy_W_R : REAL; END_VAR  
VAR_INPUT Fuzzy_C_R : REAL; END_VAR  
VAR_INPUT Fuzzy_CO2_R : REAL; END_VAR  
VAR_INPUT Fuzzy_C_H_R : REAL; END_VAR  
VAR_INPUT Fuzzy_I_drive_R : REAL; END_VAR  
VAR_OUTPUT T_zatr_R : REAL; END_VAR
```

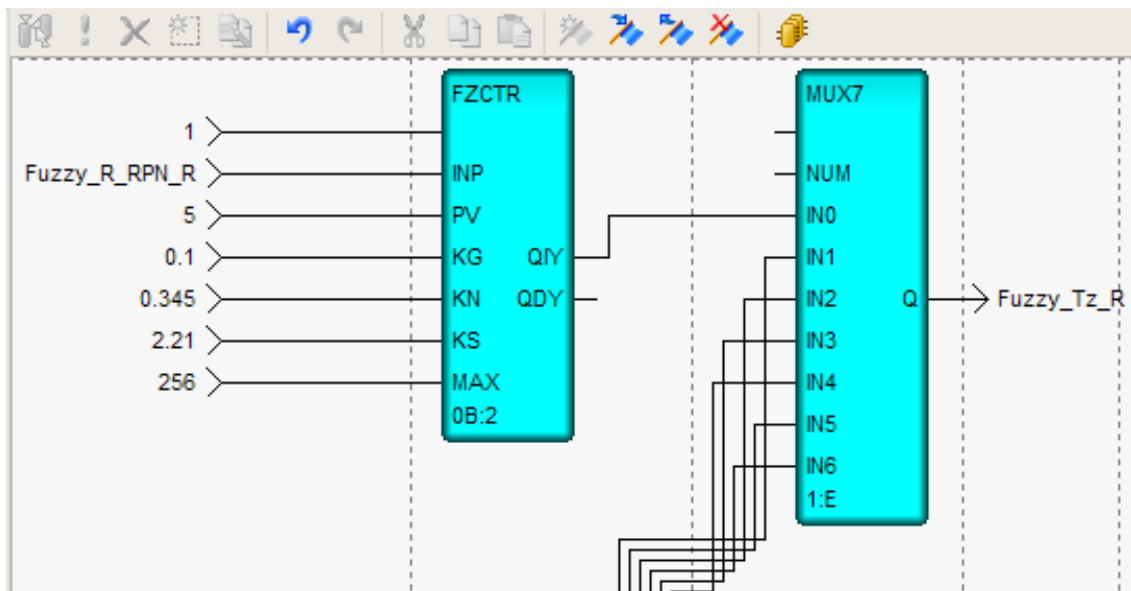


Рисунок 4.3 – Програма нечіткого регулятора в інтегрованому середовищі розробки

Графічний інтерфейс проекту системи віддаленого керування пристроєм РПН силового трансформатора показано у двох вікнах, наведених на рис. 4.4 та 4.5, поєднаних між собою. Головне вікно проекту АРМ оператора системи є базовим, а вікно моніторингу стану трансформатора, пристрою РПН, системи охолодження, параметрів шини споживачів є підпорядкованим і викликається з базового натисненням на символ відповідного трансформатора. Система має також функцію обчислення залишкового ресурсу комутацій пристроєм РПН.

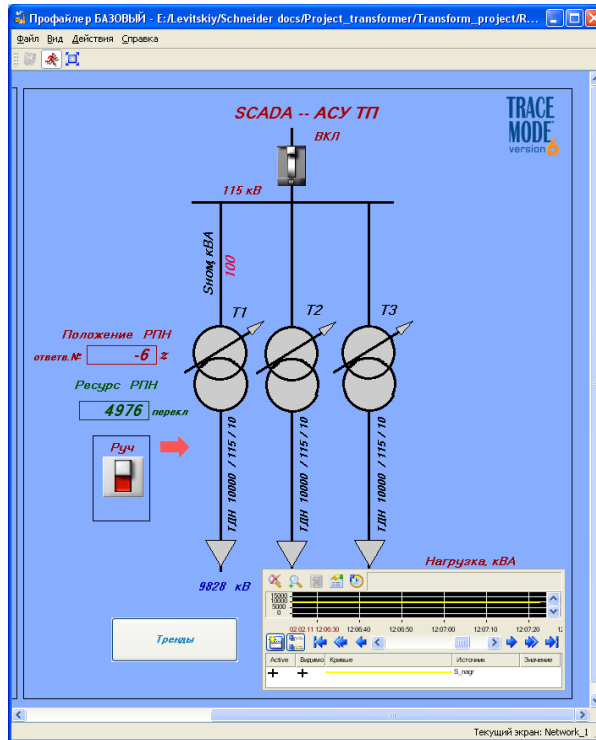


Рисунок 4.4 – Вікно головного проекту SCADA-системи АРМ оператора

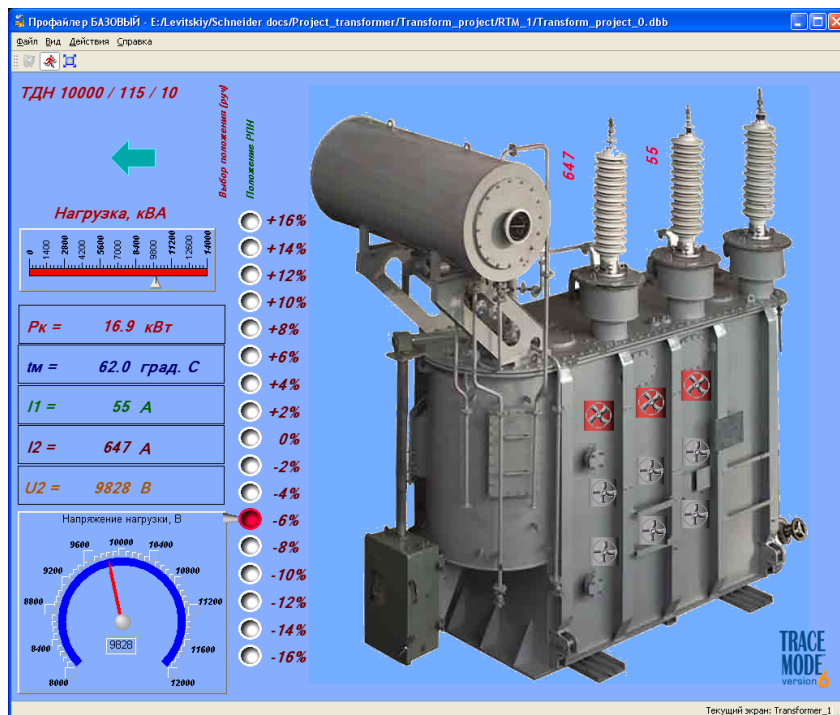


Рисунок 4.5 – Вікно моніторингу стану трансформатора

Обчислене за допомогою функції FZCTR значення часу затримки на перемикання пристрою РПН, а також задане значення напруги на вводах споживачів, значення зони нечутливості і струму в режимі мінімуму навантаження у вигляді слів передаються в програму ПЛК. Алгоритм роботи програми ПЛК може бути представлений у вигляді структурної схеми на рис. 4.6.

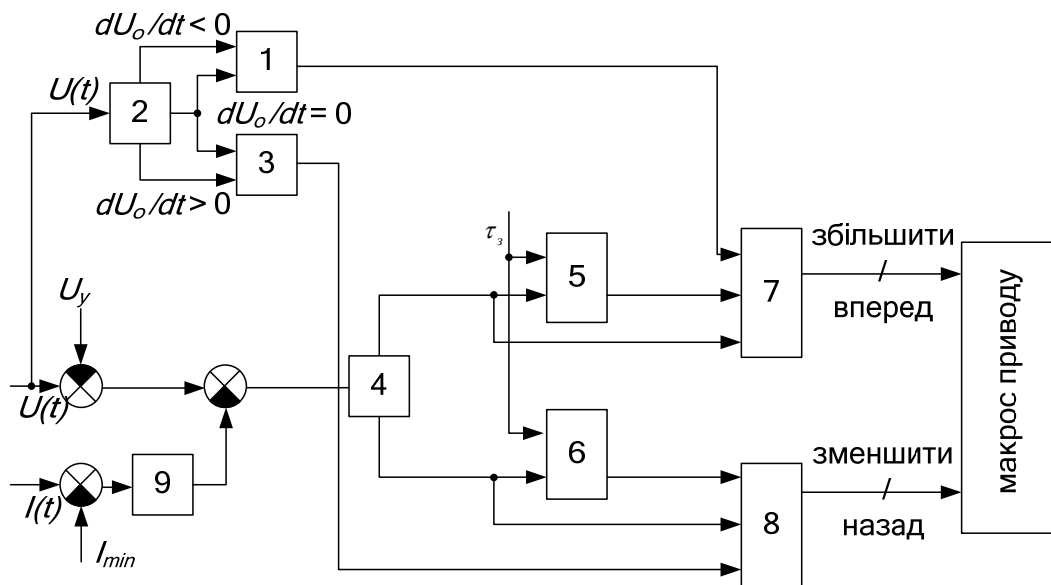


Рисунок 4.6 – Структурна схема алгоритму програми ПЛК

На рис. 4.6: 1, 3 – логічні функції «АБО»; 2 – модуль обчислення знаку похідної огинаючої напруги на основі функції PID; 4 – компаратор; 5, 6 – блоки затримки на основі функції керованого таймера; 7, 8 – логічні функції «І»; 9 – блок введення вагового коефіцієнта струму навантаження в закон керування.

При створенні програми використано мережевий макрос дистанційного керування приводом РПН згідно з [73]. Застосування перетворювача частоти дозволить збільшити надійність (і відповідно, її довговічність) механічної ланки заведення пружинного привода пристрою перемикання за рахунок плавного пуску та зупинки електропривода.

Узагальнений алгоритм роботи програми ПЛК для системи віддаленого керування наведений на рис. 4.7

Програма ПЛК, розроблена на мові списку інструкцій у відповідності до наведеної структурної схеми, показана на рис. 4.8.

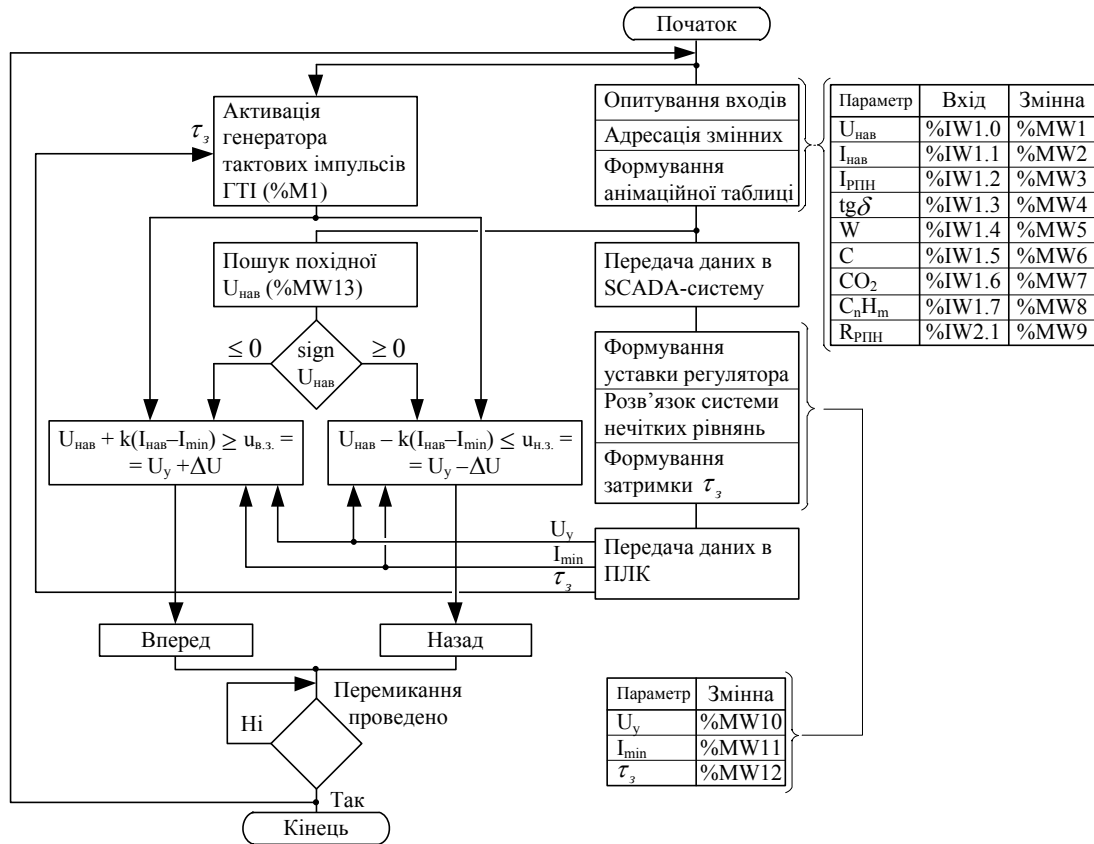


Рисунок 4.7 – Узагальнений алгоритм роботи програми ПЛК для системи віддаленого керування

```

LD %I0.0.1      LD [%MW96<%C0.V]  LD [%C0.V = 3]  LD [%C0.V = 11]  [%MW2 := %MW1 / 100]
ANDN %M2      AND %M5      ANDN %M6      LD 1      LD %Q0.0.1
S %M1      OR( [%MW8 > 10100] [%MW1 := 10120]  LD _MANAGER 5]  OR %Q0.0.2
BLK %TM0     ANDN %M5)     LD [%C0.V = 4]  LD %I0.0.2     CU
LD %M1      AND %M1      ANDN %M6     [D_CLEAR_ERR 5]  OUT BLK
IN          ST %Q0.0.2   [%MW1 := 10350] LD 1      LD D
OUT_BLK    BLK %C0      LD [%C0.V = 5]  [D_SETPOINT 5 := %MW41] ST %M7
LD Q       LD %Q0.0.1   ANDN %M6     [D_SETPOINT_MODE 5 := 0] END BLK
S %M2      ANDN %M4     [%MW1 := 10580] [D_SELECT_SPEED 5]  LD %I0.0.1
R %M1      CU          LD [%C0.V = 6]  [%MW12 := %C1.P-%C1.V]
END_BLK    LD %Q0.0.2   ANDN %M6     [D_RUN_FWD 5]    [%MW11 := %C0.V]
BLK %TM1   ANDN %M3     [%MW1 := 10810] LD %Q0.0.3   LD %M6
LD %M2     CD          LD [%C0.V = 7]  [D_RUN_REV 5]    [%MW1, %MW8:10 := 0]
IN         END BLK     ANDN %M6     LDN %Q0.0.2    LD %I0.0.1
OUT_BLK    LD [%C0.V > 17] [%MW1 := 11040] ANDN %Q0.0.3   MPS
LD Q       ST %M4      LD [%C0.V = 8]  [D_STOP 5]      AND [%MW13 > 60]
R %M2      LD [%C0.V < 1] ANDN %M6     ANDN %M6     ST %Q0.0.3
END_BLK    ST %M3     [%MW1 := 11270] [%MW1 := 13110]  MRD
LD [%MW96>%C0.V] LD [%C0.V = 1] LD [%C0.V = 9]  LD [%C0.V = 17]  AND [%MW13 > 70]
AND %M5     ANDN %M6     ANDN %M6     ANDN %M6     ST %Q0.0.4
OR( [%MW8 < 9900] [%MW1 := 9660] [%MW1 := 11500] [%MW1 := 13340]  MPP
ANDN %M5)   LD [%C0.V = 2] LD [%C0.V = 10] LD %I0.0.1     AND [%MW13 > 80]
AND %M1     ANDN %M6     ANDN %M6     [%MW3 := 100]  ST %Q0.0.5
ST %Q0.0.1 [%MW1 := 9890] [%MW1 := 11730] LD %I0.0.1  END

```

Рисунок 4.8 – Лістинг програми ПЛК

ВИСНОВКИ

В монографії на тему «Система автоматичного керування трансформаторами з інтелектуальним регулятором напруги» було проаналізовано способи регулювання напруги в електричних мережах, але вони всі розв'язують лише одну з головних задач регулювання напруги: або підвищують якість напруги на споживачах, внаслідок чого збільшується кількість перемикачів пристроїв РПН, або підвищують надійність енергопостачання за рахунок зниження якості напруги.

Для одночасного підвищення якості напруги на споживачах та зменшення кількості перемикачів пристроїв РПН було синтезовано закон керування з варіативною затримкою часу. На його основі було зроблено структурну схему системи автоматичного керування трансформатором з керованою затримкою часу.

Для дослідження стійкості системи та якості перехідних процесів системи, що входить до класу суттєво нелінійних, було побудовано комп'ютерну модель системи. З отриманих графіків перехідних процесів видно, що затримка τ_z на проведення перемикачів пристроєм РПН для стану «зношений» перевищує затримку на проведення перемикачів «новим» пристроєм РПН в п'ять разів. За вказаний період часу в реальному часі рівновага між заданим та фактичним значенням напруги на шинах підстанції може відновитися, що дозволить уникнути зайвого перемикачів «зношеним» пристроєм РПН. Водночас при високих показниках технічних характеристик пристроїв РПН, які відносяться до класу «нових», невелика затримка на проведення перемикачів робить систему більш динамічною, а якість регулювання напруги – вищою.

Запропоновано систему керування пристроєм РПН трансформаторної підстанції із застосуванням інтегрованого середовища розробки SCADA-систем, яка передбачає формування варіативної затримки сигналу перемикачів на підставі нечіткого логічного висновку з оцінки параметрів стану РПН і дозволяє покращити якість регулювання напруги силовим трансформатором.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : ГОСТ 13109-97 - ГОСТ 13109-97. – [Введ. 1999-01-01]. – М. : Изд-во стандартов, 1998. – 33 с. (Межгосударственный стандарт).
2. Мокин Б. И. Автоматические регуляторы в электрических сетях. / Б. И. Мокин , Ю. Ф. Выговский – К. : Техніка, 1985. – 104 с.
3. Карташев Илья Ильич. Управление качеством электрической энергии : монографическое издание / И. И. Карташев, В. Н. Тульс. – М. : МЭИ, 2005. – 320 с.
4. Скороходов В. А. Обеспечение энергосбережения при повышении качества электрической энергии/ В. А. Скороходов, П. Ф. Митрясов // Научные основы создания энергосберегающей техники и технологий : тезисы докладов Всесоюзной конференции. – Москва, 1990. – С. 254–56.
5. Воротницкий Валерий Эдуардович. Повышение эффективности управления распределительными сетями [Электронный ресурс] / В. Э. Воротницкий // Энергосбережение. 2005. – № 10. – Режим доступа: http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3046
6. Герасименко А. А. Передача и распределение электрической энергии : учеб. пособие / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2008. – 720 с.
7. Жежеленко И. В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – 2-е изд., перераб. и доп./ И. В. Жежеленко – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 168 с.
8. Поспелов Г. Е., Потери мощности и энергии в электрических сетях. / Г. Е. Поспелов, Н. М. Сыч; под ред. Г. Е. Поспелова. – М. : Энергоиздат, 1981. – 216 с.
9. О потреблении активной мощности электроприемников при отклонении напряжения/ Н. М. Яндульский, Н. Ф. Головатюк, В. М. Хлыстов, и др // Национальный университет Украины «КПИ». – К. 1996. – 15 с. Деп. в ГНТБ Украины 12.06.96 г., № 1437–Ук96.
10. Орлов В. С. Дополнительные потери мощности и энергии при отклонении напряжения и частоты / В. С. Орлов // Изв. вузов. Сер. «Энергетика». – 1985. – № 6. – С. 19–23.

11. Грабко В. В. Моделі і засоби регулювання напруги за допомогою трансформаторів з пристроями РПН : монографія / В. В. Грабко. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 109 с.
12. Веников В. А., Регулирование напряжения в электроэнергетических системах./ В. А. Веников, В. И. Идельчик, М. С. Лисеев – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 216 с.
13. Электрические системы и сети / [Н. В. Буслова, В. Н. Винославский, Г. И. Денисенко и др.] ; под. ред. Г. И. Денисенко.– К. : Вища школа, головное изд-во, 1986. – 584 с.
14. Testa Alfredo. Regolazione della tensione in cabine MT/BT in presenza di carichi non omotetici /Testa Alfredo, Curcio Ciuseppe, Menniti Daniele // Energ. elett. – 1993. – 70, № 10. – P. 416–422.
15. Рэнси Р. Трансформаторы с переключением под нагрузкой // Мировая энергетика. – 1996. – № 4. – С. 27–33.
16. Порудоминский В. В. Устройства переключения трансформаторов под нагрузкой. – 2-е изд., перераб. и исправл./ В. В. Порудоминский – М. : «Энергия», 1974. – 288 с.
17. Пат. 44616А Україна, МКИ Н 01 F 29/04, Н 01 Н 19/12. Трифазний перемикач відгалужень обмоток трансформатора під навантаженням/ А. Л. Вайнштейн, Р. А. Ангоріна, М. Ф. Андросов, Т. М. Синицина (Україна); ВАТ «Український наук.-досл. проектно-конструк. та технол. інститут трансформаторобудування». – № 2001064055; Заявл. 13.06.2001; Опубл. 15.02.2002.
18. Пат. 27824 Україна, МКИ Н 01 F 29/02, Н 01 Н 9/00. Перемикач ступенів обмоток трансформатора/ Д. Дохнальд, Д. Неймер, В. Альбрехт, Г. Клос, Р. Лаутерволд, Х. Лісманн-Міске (Німеччина); Машинен фабрик рейнхаузен Гмбх. – № 94005451; Заявл. 06.05.93; Опубл. 16.10.2000.
19. А. с. 729810 ССРСР, МКИ Н 02 Р 13/06 Устройство для регулирования напряжения на силовом трансформаторе / Н. М. Балдин (ССРСР). – № 2468831/24-07; Заявл. 23.03.77; Опубл. 25.04.80, Бюл. № 15.
20. А. с. 1598044 ССРСР, МКИ Н 02 J 3/12 Устройство для автоматического регулирования напряжения узла электрической сети / Е. Ю. Линькова, А. В. Лужнов, Ф. Н. Рассказов (ССРСР). – № 4447584/24-07; Заявлено 12.05.88; Опубл. 07.10.90, Бюл. №37.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

30. А. с. 1562960 СССР, МКИ Н 02 J 3/12 Способ регулирования напряжения в центре питания распределительной сети / В. И. Идельчик, В. Н. Ковалевич, Ю. Г. Кононов, Ф. А. Сбитнев

(СССР). – № 4292551/24-07; Заявл. 30.07.87; Оpubл. 07.05.90, Бюл. № 17.

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

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

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

34. Применение тиристорov в переключающих устройствах трансформаторов общего назначения [Дмитренко А. И., Красов А. И., Пироженко А. Н. и др.] // НТС, ЭП. Сер. «Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы». – 1974. – № 9/14. – С. 15–17.

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

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

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

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

39. Пат. 25246 України, МКИ Н 02 J 3/24. Спосіб регулювання напруги В. О. Удовенко; Заявл. 15.01.98; Оpubл. 25.12.98, Бюл. № 6.

40. Пат. 4733158 США, МКИ G 05 F 1/16. Control circuit for tap-switching power supplies and multitap transformers: Marchione Vito J., Brunelle James W; Datametrics Corp. – № 898713; Заявл. 21.08.86; Оpubл. 22.03.88; НКИ 323/258.

41. Черепов В. И. Оценка влияния выбросов и провалов напряжения на работу электроприемников/ В. И. Черепов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 1982. – № 12. – С. 1476–1477.
42. Ермаков В. Ф. Экспериментальное исследование влияния провалов напряжения питающей сети на работу электроприемников/ В. Ф. Ермаков, В. И. Черепов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 1997. – № 1. – С. 38–41.
43. Рубаненко О. Є. Нейро-нечітке моделювання в задачах оперативного діагностування електрообладнання [Електронний ресурс]. / О. Є. Рубаненко // Видавництво Львівської політехніки. – № 597. – 2007. – С. 14–19. – Режим доступу : http://vlp.com.ua/files/03_12.pdf.
44. Пат. 81615 Україна. Інтелектуальний регулятор напруги трансформаторної підстанції/ С. М. Левицький, К. І. Колмачов ; заявник та патентоутримувач Вінницький національний технічний університет. – № U 2012 14128 ; Заявл. 11.12.2012 ; Опубл. 10.07.2013, Бюл. № 13.
45. Бесекерский В. А. Теория систем автоматического регулирования./ В. А. Бесекерский, Е. П. Попов – М. : Наука, 1975. – 768 с.
46. Воронов А. А. Основы теории автоматического регулирования и управления / А. А. Воронов, В. К. Титов, Б. Н. Новогранов. – М. : Высшая школа, 1977. – 519 с.
47. Востриков Анатолий Сергеевич. Теория систем автоматического регулирования : учеб. пособие для вузов / А. С. Востриков, Г. А. Французова. – М. : Высшая школа, 2006. – 365 с.
48. Бугров Яков Степанович. Высшая математика : учеб. для вузов : [в 3 т.] / Я. С. Бугров, С. М. Никольский ; под ред. В. А. Садовниченко. – Изд. 7-е, стер. – М. : Дрофа, 2005. – Т. 2. – 512 с.
49. Теоретические основы электротехники : учеб. пособие для электротехн., энерг. и приборостроит. спец. вузов : [в 3 т.] / [К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин]. – СПб. : Питер, 2004. – Т. 2. – 576 с.
50. Михайлов Виталий Степанович. Теория управления : учеб. пособие для студ. вузов / В. С. Михайлов. – К. : Выща школа, Головное изд-во, 1988. – 312 с.
51. Трухаев, Р. И. Модели принятия решений в условиях неопределенности / Р. И. Трухаев. – М. : Наука, 1981. – 258 с.
52. Орловский, С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации / С. А. Орловский. – М. : Наука, 1981. – 208 с.

53. Алтунин, А. Е. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях : монография / А. Е. Алтунин, М. В. Семухин. – Тюмень : ТГУ, 2000. – 352 с.
54. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. – М. : Мир, 1976. – 165 с.
55. Zimmerman, H. J. Fuzzy Set Theory and Its Applications / H. J. Zimmerman. – Kluwer, Dordrecht, 1991. – 315 p.
56. Нечеткая логика: алгебраические основы и приложения: монография / [С. Л. Блюмин, И. А. Шуйкова, П. В. Сараев, И. В. Черпаков]. – Липецк : ЛЭГИ, 2002. – 113 с.
57. Тутубалин Валерий Николаевич. Теория вероятностей и случайных процессов : учеб. пособие / В. Н. Тутубалин. – М. : Изд-во МГУ, 1992. – 400 с.
58. Левицький С. М. Комп'ютерна модель системи автоматичного керування трансформаторами з інтелектуальним регулятором / С. М. Левицький, К. І. Колмачов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – № 3(2013). – С. 51–56 .
59. Гультаев А. MATLAB 5.2. Имитационное моделирование в среде Windows: практическое пособие / А. Гультаев. – СПб. : КОРОНА принт, 1999. – 288 с.
60. Потемкин В. Г. Система MATLAB 5 для студентов / В. Г. Потемкин, П. И. Рудаков. – [2-е изд.]. – М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 1999. – 448 с.
61. Дьяконов В. П. Simulink 4. Специальный справочник / В. П. Дьяконов. – СПб. : Питер, 2002. – 528 с.
62. Жорняк Л. Б. Моделирование системы регулирования напряжения силового трансформатора с устройством РПН / Л. Б. Жорняк, В. И. Осинская, И. В. Тарасовская // Електротехніка та електроенергетика, 2006. – № 1. – С. 79–86.
63. 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.
64. Лагутин Валерий Михайлович. Контроль положения переключающих устройств трансформаторов в системе автоматического регулирования напряжения / В. М. Лагутин, П. Д. Лежнюк, И. М. Котенко // Устройства преобразования информации для контроля и управления

в энергетике : тезисы докладов 3 Республиканской научно-технической конференции. – Харьков, 1988. – С. 218–219.

65. Теџес Zlatka. Some Issues of Microprocessor-based Power System Stabilizer Implementation [Электронный ресурс]./ Z. Теџес, V. Їесић, I. Petrović; KONĆAR Electrical Engineering Institute, Zagreb, Croatia // 15th Mediterranean Conference on Control & Automation.- Athens, Greece : July 27–29; 2007. – T11-004. – Режим доступа до каталогу : <http://med.ee.nd.edu/MED15-2007/papers/T11-004-371.pdf>.

66. Чичёв С. И. Информационно-измерительная система центра управления электрических сетей: монография / С. И. Чичёв, В. Ф. Калинин, Е. И. Глинкин. – М. : Машиностроение, 2009. – 176 с.

67. Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике: научное издание / [В. А. Баринов, А. З. Гамм, Ю. Н. Кучеров и др.]; ред. Ю. Н. Руденко, ред. В. А. Семенов. – М. : МЭИ, 2000. – 647 с.

68. IEC 60870-5-101:2003 Telecontrol equipment and systems. Part 5. Transmission protocol. Section 101. Companion standard for basic telecontrol tasks. – European Committee for Electrotechnical Standardization : Apr 1, 2003. – 189 p.

69. Решения Siemens для автоматизированных систем оперативно-диспетчерского управления в энергетике // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2005. – № 11. – С. 10–12.

70. Электронная система управления трансформаторами типа ТЕС. Руководство для пользователя монитора системы ТЕС. – Компания АВВ, 2006. – 44 с. – 1ZSC000857-AAD ru, Rev. 1, 2006-06-15.

71. Устройство РПН типа V. Инструкция по эксплуатации ВА 081/05. – Компания Reinhausen GmbH (Германия) – 06 / 2010. – 40 с. – ВА 081/05-RU-06/10 F0049101.

72. Грабко В. В. Система віддаленого керування пристроєм регулювання під навантаженням трансформаторної підстанції / В. В. Грабко, С. М. Левицький // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук : КрНУ, 2011. – Вип. 2/2011 с. 42 – 45.

73. Twido. Программируемые контроллеры. Справочное руководство по программному обеспечению. – Schneider Electric. – Telemecanique. – TWDUSE10AF ver 2.1 – 2004. – 478 с.

Наукове видання

**Левицький Сергій Михайлович
Колмачов Костянтин Ігорович**

**СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ
ТРАНСФОРМАТОРОМ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ
РЕГУЛЯТОРОМ НАПРУГИ**

Монографія

Редактор Н. Мазур

Оригінал-макет підготовлено К. Колмачовим

Підписано до друку 03.09.2015 р.

Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.

Гарнітура Times New Roman.

Друк різнографічний. Ум. др. арк. 4,16

Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № В2015-30

Вінницький національний технічний університет,

КІВЦ ВНТУ,

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,

ВНТУ, ГНК, к. 114.

Тел. (0432) 59-85-32.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.

21021, м. Вінниця, вул. Порики, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.