

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

“Допущено до захисту”
Зав. кафедри ЕТС та ЕМ
канд. техн. наук., професор
_____Петро ПЛЕШКОВ
“___” _____2022 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти

на тему

**“ Оптимальна система автоматичного керування
пристроями регулювання напруги під
навантаженням силових трансформаторів”**

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-21М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Денис КАСЬЯНЕНКО
«___» _____2022 р.
Керівник роботи
канд. техн. наук, доцент
_____Василь ЗІНЗУРА
«___» _____2022 р.
Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва та транспорту

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Плешков П.Г.

« » 2022 р.

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

Касьяненко Дениса Сергійовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Оптимальна система автоматичного керування пристроями регулювання напруги під навантаженням силових трансформаторів

Optimal system of automatic control of voltage regulation devices under the load of power transformers

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

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 01.12.2022 р

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Метою роботи є зниження рівнів несиметрії і усталеного відхилення напруг в РЕМ за рахунок автоматизації процесу керування пристроями РПН силових трансформаторів. Завдання роботи: 1. Провести аналітичний огляд існуючих методів та засобів автоматизації регулювання напруги і зниження рівнів несиметрії напруг в РЕМ. 2. Формалізувати задачі автоматичного керування пристроями РПН трансформаторів для досягнення одночасного зниження рівнів несиметрії та відхилення напруг та обґрунтувати метод розв'язку цих задач керування. 3. Розробити структурну схему САК пристроєм РПН і алгоритм визначення вектора оптимального керування. 4. Розробити комп'ютерну імітаційну модель САК пристроєм РПН силового трансформатора.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	4.10.22	
2	<i>Сучасний стан питання регулювання напруги в розподільних електричних мережах</i>		
3	<i>Теоретичне дослідження задачі автоматичного керування пристроями РПН силових трансформаторів</i>	14.10.22	
4	<i>Комп'ютерне моделювання системи автоматичного керування пристроєм РПН силового трансформатора</i>	5.11.22	
5	<i>Охорона праці</i>	5.11.22	
6	<i>Техніко-економічна оцінка ефективності використання САК пристроєм РПН силового трансформатора</i>	18.11.22	
7	<i>Висновки</i>	21.11.22	
8	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	25.11.22	
9	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	29.11.22	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2022 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2022 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Касьяненко Д. С. Оптимальна система автоматичного керування пристроями регулювання напруги під навантаженням силових трансформаторів.

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

Метою роботи є зниження рівнів несиметрії і усталеного відхилення напруг в розподільних електричних мережах за рахунок автоматизації процесу керування пристроями регулювання напруги під навантаженням силових трансформаторів.

Проведений в роботі аналіз методів і технічних засобів регулювання напруги в розподільних електричних мережах показав, що головною причиною недостатньої ефективності підвищення якості електроенергії є неврахування можливості одночасного зменшення рівнів несиметрії та відхилення напруг шляхом пофазної автоматичної зміни коефіцієнтів трансформації силових трансформаторів.

Аналіз ефекту від використання розв'язку задачі керування безконтактними пристроями регулювання напруги силового трансформатора на розробленій комп'ютерній моделі показав що, при використанні запропонованої в роботі САК кількість потраплянь значень коефіцієнту несиметрії напруг за зворотною послідовністю у нормально допустимі межі виявилась на 89 % ніж для базової системи автоматичного керування пристроєм регулювання напруги під навантаженням силового трансформатора.

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

THE SUMMARY

Kasianenko D. S. Optimal system of automatic control of voltage regulation devices under the load of power transformers.

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

The purpose of the work is to reduce the levels of asymmetry and steady deviation of voltages in distribution electrical networks due to the automation of the control process of voltage regulation devices under the load of power transformers.

The analysis of methods and technical means of voltage regulation in distribution electric networks carried out in the work showed that the main reason for the insufficient efficiency of improving the quality of electricity is the failure to take into account the possibility of simultaneously reducing the levels of asymmetry and voltage deviation by means of phase-by-phase automatic change of the transformation coefficients of power transformers.

The analysis of the effect of using the solution of the problem of controlling the non-contact voltage regulation devices of the power transformer on the developed computer model showed that, when using the SAC proposed in the work, the number of values of the voltage asymmetry coefficient in the reverse sequence falling within the normally permissible limits was 89% higher than for the basic systems of automatic control of the voltage regulation device under the load of the power transformer.

Keywords: power transformer, distribution network, automatic control system

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ.....	13
1.1 Аналіз методів зниження несиметрії та усталеного відхилення напруг в РЕМ.....	13
1.1.1. Основні види регулювання напруги в розподільних мережах.....	14
1.1.2. Способи зниження несиметрії напруг в РЕМ	16
1.2 Аналітичний огляд технічних засобів і методів зміни коефіцієнта трансформації силових трансформаторів.....	18
1.3 Аналітичний огляд методів і пристроїв автоматичної зміни коефіцієнта трансформації трансформатора	26
1.4 Вибір напрямку досліджень задачі автоматизації керування пристроєм РПН трансформатора.....	35
Висновки до розділу	36
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАДАЧІ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЯМИ РПН СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ.....	38
2.1 Розробка математичної моделі об'єкту керування та постановка задачі автоматичного керування пристроєм РПН	38
2.2 Вибір методу розв'язку задачі автоматичного керування пристроєм РПН трансформатора.....	43
2.3 Знаходження аналітичних виразів для координат утопічної точки та визначення кінцевого розв'язку задачі керування.....	47
Висновки до розділу	57

РОЗДІЛ 3. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЄМ РПН СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА	59
3.1 Структурна схема САК і алгоритми розрахунку вектора оптимального керування	59
3.2 Комп'ютерна модель САК пристроєм РПН силового трансформатора ...	68
3.3 Дослідження стійкості САК пристроєм РПН трансформатора.....	75
3.4 Комп'ютерне моделювання роботи САК пристроєм РПН	78
Висновки до розділу	83
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	84
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ САК ПРИСТРОЄМ РПН СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА	86
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	92
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	94

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

САК – система автоматичного керування

НН – низька напруга

ВН – висока напруга

ПБЗ – перемикання без збудження

РЕМ – розподільна електрична мережа

ПЯЕ – показник якості електричної енергії

ΔU_y – усталене відхилення трифазної напруги;

K_{2U} – коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю

K_{0U} – коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю

U_2 – діюче значення напруги зворотної послідовності

U_0 – діюче значення напруги нульової послідовності

U_1 – діюче значення напруги прямої послідовності

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку енергетики України характеризується загостренням питання якості електричної енергії в розподільних електричних мережах (РЕМ). Наявність РЕМ потужних нелінійних та несиметричних електроспоживачів призводить до погіршення якості електроенергії.

Для кількісної оцінки якості електричної енергії діючими нормами передбачено ряд основних і додаткових показників якості електроенергії (ПЯЕ), які можна поділити на чотири групи:

- ПЯЕ, які оцінюють зміну амплітуди напруги (доза флікера, розмах зміни напруги, усталене відхилення напруги, і т.д.);
- ПЯЕ, які оцінюють несинусоїдальність напруги (коефіцієнт n -ї гармоніки, коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги,);
- ПЯЕ, які оцінюють несиметрію напруги (коефіцієнти несиметрії напруг за зворотною та нульовою послідовностями);
- ПЯЕ, що оцінюють відхилення частоти напруги.

На теперішній час розроблено досить багато методів і технічних засобів покращення якості електроенергії. Найбільш ефективним з таких методів є застосування коректуючи пристроїв, які покращують якість електричної енергії по одному або декількох ПЯЕ.

Одним із основних показників якості електроенергії є усталене відхилення напруги та коефіцієнти несиметрії напруг за зворотною та нульовою послідовностями. Невідповідність значень цих показників діючим нормам призводить до виникнення додаткових втрат електричної енергії, скорочення терміну служби ізоляції електродвигунів, трансформаторів, кабелів та призводить до виникнення суттєвих збитків в різних галузях промисловості нашої країни.

Для зниження рівнів несиметрії напруг розроблено велику кількість

спеціальних симетрувальних пристроїв. Але широке застосування в РЕМ симетрувальних установок обмежується їх високою вартістю.

Для зменшення рівнів усталеного відхилення напруги в розподільних мережах використовується значна кількість засобів регулювання напруги (реактори, синхронні компенсатори, конденсаторні батареї і т.д.), найважливішим з яких являється силовий трансформатор з пристроєм регулювання напруги під навантаженням (РПН). Стрімкий розвиток силової електроніки дав змогу створити пристрої РПН, в яких для перемикання струмових кіл застосовуються напівпровідникові пристрої (симістори, транзистори, тиристори). Ці пристрої мають ряд переваг над механічними РПН, а саме: висока швидкодія, краща надійність і ремонтпридатність. Окрім цього, за рахунок наявної можливості пофазної зміни коефіцієнту трансформації, трансформатор з безконтактним пристроєм РПН здатний впливати і на несиметрію напруг в РЕМ.

Тому завдання розробки систем автоматичного керування (САК) безконтактними пристроями РПН силових трансформаторів для одночасного зниження рівнів відхилення і несиметрії напруг в РЕМ є актуальною.

Мета і задачі роботи. Метою магістерської роботи є зниження рівнів несиметрії і усталеного відхилення напруг в РЕМ за рахунок автоматизації процесу керування пристроями РПН силових трансформаторів.

Досягнення цієї мети реалізується через вирішення таких задач:

1. Провести аналітичний огляд існуючих методів та засобів автоматизації регулювання напруги і зниження рівнів несиметрії напруг в РЕМ.

2. Формалізувати задачі автоматичного керування пристроями РПН трансформаторів для досягнення одночасного зниження рівнів несиметрії та відхилення напруг та обґрунтувати метод розв'язку цих задач керування.

3. Розробити структурну схему САК пристроєм РПН і алгоритм визначення вектора оптимального керування.

4. Розробити комп'ютерну імітаційну модель САК пристроєм РПН силового трансформатора.

5. Провести аналіз ефекту від використання розв'язків задач автоматичного керування пристроями РПН шляхом комп'ютерного моделювання розробленої САК.

Об'єкт дослідження – процес автоматичного регулювання рівнів напруги в РЕМ.

Предмет дослідження – САК процесом автоматичного регулювання напруги РЕМ шляхом використання пристроїв РПН силових трансформаторів.

Методи досліджень. Розв'язання поставлених задач магістерської роботи відбувалося за допомогою методів багатокритеріальної та скалярної оптимізації, комп'ютерного імітаційного моделювання, теорії електричних кіл, чисельних методів розв'язку задач, методів теорії автоматичного регулювання.

Наукова цінність роботи:

1. Обґрунтовано використання методу вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації, що полягає у наближенні до утопічної (ідеальної) точки в просторі критеріїв для розроблення правил пофазної зміни коефіцієнтів трансформації трансформатора.

2. Одержано розв'язки задачі багатокритеріальної оптимізації, використання яких дає змогу досягти одночасного зниження рівнів несиметрії і відхилення напруг у РЕМ.

3. Розроблено комп'ютерну імітаційну модель САК рівнем напруги РЕМ яка дозволяє проводити аналіз режимів роботи силових трансформаторів, оснащених безконтактними пристроями РПН.

Практичне цінність роботи:

- розроблено методику розрахунку вектора оптимального керування пристроєм РПН силового трансформатора;

- розроблено комп'ютерні моделі САК пристроєм РПН силового трансформатора.

Структура роботи. Магістерська робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг роботи складає 98 сторінок. Основна частина викладена на 85 сторінках друкованого тексту, містить 49 рисунків та 6 таблиць. Список використаних джерел містить 46 джерел та викладений на 5 сторінках.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Для здійснення ефективної передачі і розподілу електроенергії в РЕМ необхідно здійснювати керування рівнями відхилення і несиметрії напруг. Найбільш поширеним методом регулювання напруги в розподільних мережах є зміна коефіцієнта трансформації трансформатора. Цей метод реалізується шляхом застосування ряду технічних засобів, найбільш досконалим з яких є пристрій РПН, який дає змогу здійснювати автоматичне регулювання напруги.

Проведений в першому розділі роботи аналітичний огляд наукових робіт спрямований на виявлення можливостей підвищення якості електроенергії в РЕМ шляхом удосконалення методів автоматизації керування пристроєм РПН силового трансформатора.

1.1 Аналіз методів зниження несиметрії та усталеного відхилення напруг в РЕМ

Для забезпечення належної електромагнітної сумісності РЕМ і приєднаних до неї електроспоживачів потрібно, щоб рівні ПЯЕ, зокрема усталене відхилення напруги ΔU_y та коефіцієнти несиметрії напруг в точках приєднання електроспоживачів до мережі не перевищували норм, регламентованих чинними нормативними документами.

Оцінка стану якості електроенергії відносно всіх ПЯЕ здійснюється за результатами статистичної обробки масиву значень ПЯЕ, виміряних протягом певного періоду. При цьому для кожного з показників якості встановлені нормально і гранично допустимі межі. Якість електроенергії

вважається задовільною відносно певного ПЯЕ лише у тому випадку, коли протягом 95% часу проведеного вимірювання спостерігались значення ПЯЕ, які не перевищують меж нормально допустимих, та жодне зі значень показників не виходило за гранично допустимі межі. Згідно діючих нормативних документів, нормально допустиме і гранично допустиме значення ΔU_y становлять $\pm 5\%$ і $\pm 10\%$ відповідно, а нормально допустимі і гранично допустимі значення K_{2U} та K_{0U} становлять 2% і 4% відповідно.

Для забезпечення нормально допустимих рівнів ΔU_y , K_{2U} , K_{0U} в РЕМ потрібно проводити симетрування та регулювання.

1.1.1. Основні види регулювання напруги в розподільних мережах.

Класифікація видів регулювання напруги в РЕМ наведена на рис. 1.1 у вигляді схеми.

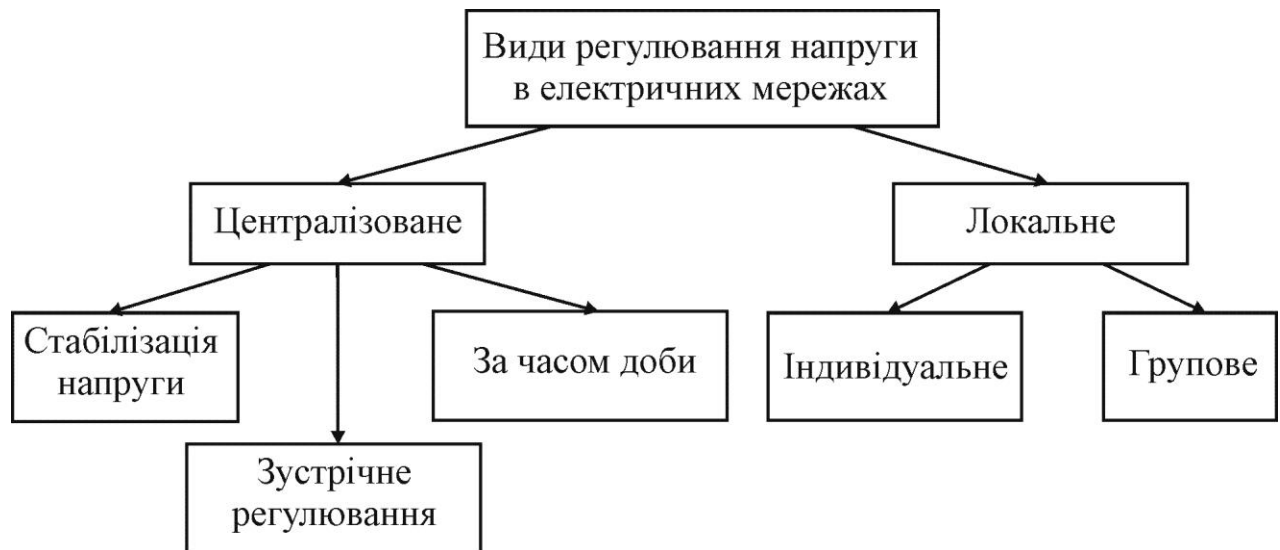


Рис. 1.1. Основні види регулювання напруги в розподільних мережах

Існує два основних підходи до регулювання напруги в РЕМ [2 – 4]: централізоване та локальне регулювання.

Локальне регулювання напруги здійснюється на затискачах електроспоживача. Оскільки цей тип регулювання напруги потребує більших

капіталовкладень в РЕМ, то його застосування виправдане лише для потужних споживачів з високими вимогами до якості електроенергії (електротехнологічні установки, потужні електродвигуни і т.д.). Залежно від кількості електроспоживачів, які приєднані до шин, на яких здійснюється локальне регулювання напруги, виділяють два його види: групове і індивідуальне.

Централізоване регулювання напруги проводиться у вузлах електричної мережі та використовується у випадку, коли від мережі живиться велика кількість електроспоживачів. В залежності від характеру добового графіку навантажень електроприймачів виділяють три підходи централізованого регулювання напруги: зустрічне регулювання напруги, регулювання напруги за часом доби та стабілізація напруги.

У випадку, коли графік навантажень електроспоживача залишається незмінними протягом доби, то на затискачах цих електроспоживачів необхідно підтримувати постійний рівень напруги, для них і застосовується стабілізація напруги.

Регулювання напруги у вузлах РЕМ за часом доби базується на принципі програмного управління [5]. Такий вид регулювання напруги використовується у випадку, коли до мережі приєднані електроспоживачі, добовий графік електричного навантаження яких залишається незмінним щодня.

Зустрічне регулювання напруги використовується у випадку, коли навантаження електроспоживача значно змінюється протягом доби. В такому випадку регулювання напруги потрібно здійснювати таким чином, щоб забезпечити нормально допустимі значення відхилення напруги не в центрі живлення, а в деякій віддаленій від нього точці приєднання електроспоживача. Для забезпечення такого регулювання потрібно враховувати струм навантаження.

1.1.2. Способи зниження несиметрії напруг в РЕМ. Наявність в розподільних мережах електроспоживачів, які викликають нерівномірність завантаження трьохфазної електромережі (однофазні і двохфазні електроспоживачі) призводить до виникнення несиметрії струмів і напруг в РЕМ [6 – 10]. Несиметрія напруг призводить до негативних наслідків для електроспоживачів і елементів РЕМ (додаткові втрати електричної енергії в електродвигунах, трансформаторах, перегрів ізоляції елементів мережі і т.д.).

Для зниження рівнів несиметрії напруги використовують методи та технічні засоби, класифікація яких приведена на рис. 1.2.

Спосіб введення додаткових е.р.с. полягає в компенсації напруг зворотної і нульової послідовностей за рахунок напруг, утворених або автономними джерелами електроенергії, або за рахунок джерел електроенергії на основі перетворювачів змінної напруги. Введення додаткових напруг може бути здійснене шляхом пофазної зміни напруг мережі. Таке регулювання може бути проведене у випадку пофазної зміни коефіцієнтів трансформації силового трансформатора. Цей принцип симетрування використовується в симетрувальному трансформаторі [11, 12], в якому за рахунок пофазної зміни коефіцієнтів трансформації зменшуються рівні несиметрії напруг в мережі.

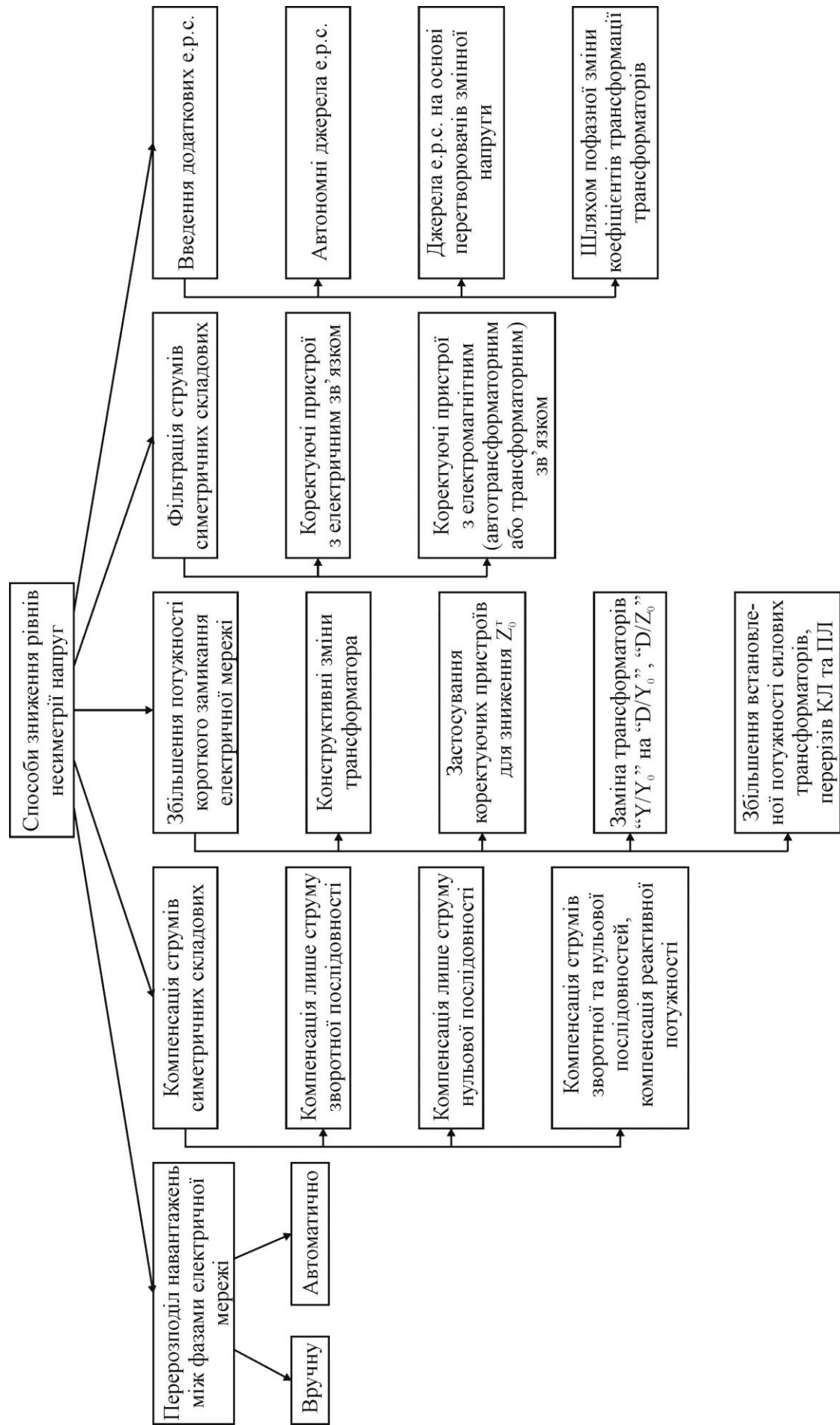


Рис. 1.2. Класифікація способів зменшення несиметрії напруг в РЕМ

Основним способом регулювання напруги в РЕМ є зміна коефіцієнту трансформації силових трансформаторів за допомогою спеціальних пристроїв. За рахунок пофазної зміни коефіцієнтів трансформації силових трансформаторів можна досягти зниження несиметрії, що видається досить перспективним: такий спосіб одночасного зниження рівнів несиметрії та відхилення напруг не вимагає значних капіталовкладень в РЕМ, пов'язаних з установкою додаткового обладнання або модернізації існуючого. Реалізація цього способу автоматичного керування зниженням рівнів показників якості електроенергії вимагає лише створення САК пристроєм зміни коефіцієнта трансформації, що здійснювала б відповідне регулювання.

Для оцінки можливості використання такого способу автоматичного керування зниженням рівнів несиметрії і усталеного відхилення напруг за рахунок застосування регулюючих пристроїв силових трансформаторів потрібно здійснити аналіз технічних засобів і методів зміни коефіцієнта трансформації трансформатора і виявити серед них ті, з допомогою яких можливо здійснити пофазну зміну коефіцієнтів трансформації силового трансформатора, що експлуатується в РЕМ.

1.2 Аналітичний огляд технічних засобів і методів зміни коефіцієнта трансформації силових трансформаторів

В сучасних РЕМ використовується велика кількість пристроїв, які забезпечують нормально допустимі значення відхилення напруги за рахунок зміни коефіцієнту трансформації силового трансформатора [13]. Усі сучасні трансформатори мають обмотки з регульовальними відгалуженнями, які виводяться на пристрої перемикання різноманітної конструкції. Слід відмітити, що більш доцільною є встановлення таких пристроїв на стороні високої напруги трансформатора. У такому випадку через протікання менших струмів ці пристрої перемикання є більш надійними і економічними

у порівнянні з пристроями перемикання, що встановлюються на стороні низької напруги.

За конструктивним виконанням пристрої перемикання відгалужень обмоток силових трансформаторів можливо поділити на такі дві групи:

1. Пристрої, перемикання відгалужень в яких відбувається при відключенні силового трансформатора від мережі (ПБЗ).

2. Пристрої, що здійснюють перемикання відгалужень під навантаженням без від'єднання силового трансформатора від електричної мережі (РПН).

Найбільш поширеними в РЕМ є трансформатори з ПБЗ [14]. Обмотка ВН такого трансформатора має одне основне і 4 регулюючі відгалуження. Основне відгалуження розраховане на номінальну напругу електричної мережі, до якої приєднано силовий трансформатор. Інші чотири відгалуження змінюють коефіцієнт трансформації в діапазоні $-5\% \dots +5\%$ з кроком $2,5\%$. На рис. 1.3 наведена принципова схема силового трансформатора з пристроєм ПБЗ.

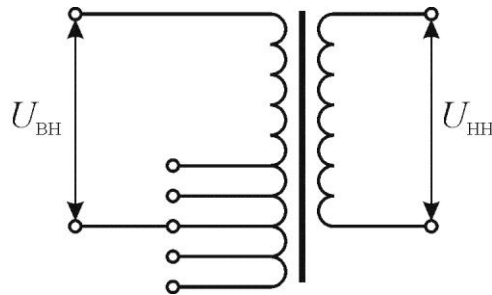


Рис. 1.3. Принципова схема силового трансформатора з пристроєм ПБЗ

Перевагами цього пристрою перемикання є відносно невелика вартість, висока надійність та простота конструкції у порівнянні з іншими видами пристроїв. Основним недоліком пристрою ПБЗ, що робить неможливим шляхом його використання в повній мірі вирішити задачу забезпечення нормально допустимих значень відхилення напруги – це його низька мобільність [13]. Так як перемикання регулюючих відгалужень в силовому

трансформаторі з ПБЗ проводиться при повному його відключенні від мережі спричиняючи тим самим перерву електропостачання, то його не можна здійснювати досить часто. Як правило, перемикання відгалужень ПБЗ проводиться не більше двох разів на рік при (сезонні перемикання) [6, 14]. Це унеможлиблює реалізацію САК зниженням рівнів відхилення напруги за допомогою силового трансформатора з пристроєм ПБЗ.

Більш досконалішим є спосіб перемикання регулювальних відгалужень трансформатора без відключення його від мережі. Цей спосіб регулювання напруги реалізований а силових трансформаторах з пристроями РПН. [6, 9, 15, 16]. Трансформатори з пристроями РПН мають більшу кількість відгалужень, і, як наслідок, більший діапазон регулювання напруги: від $\pm 10\%$ до $\pm 16\%$ з кроком регулювання від $1,25\%$ до $2,5\%$. Так, для силового трансформатора ТМН-10000/35 цей діапазон регулювання складає $\pm 11,7\%$ (± 9 ступенів регулювання з кроком $1,3\%$) [18]. За рахунок того, що перемикання відгалужень трансформатора з РПН здійснюється без розмикання струмових ланцюгів, такі перемикання можна здійснювати протягом доби. Це, в свою чергу, дозволяє реалізовувати за допомогою силових трансформаторів з пристроями РПН різноманітні закони регулювання напруги.

Класифікація пристроїв РПН за їх конструктивним виконанням наведена на рис. 1.4.

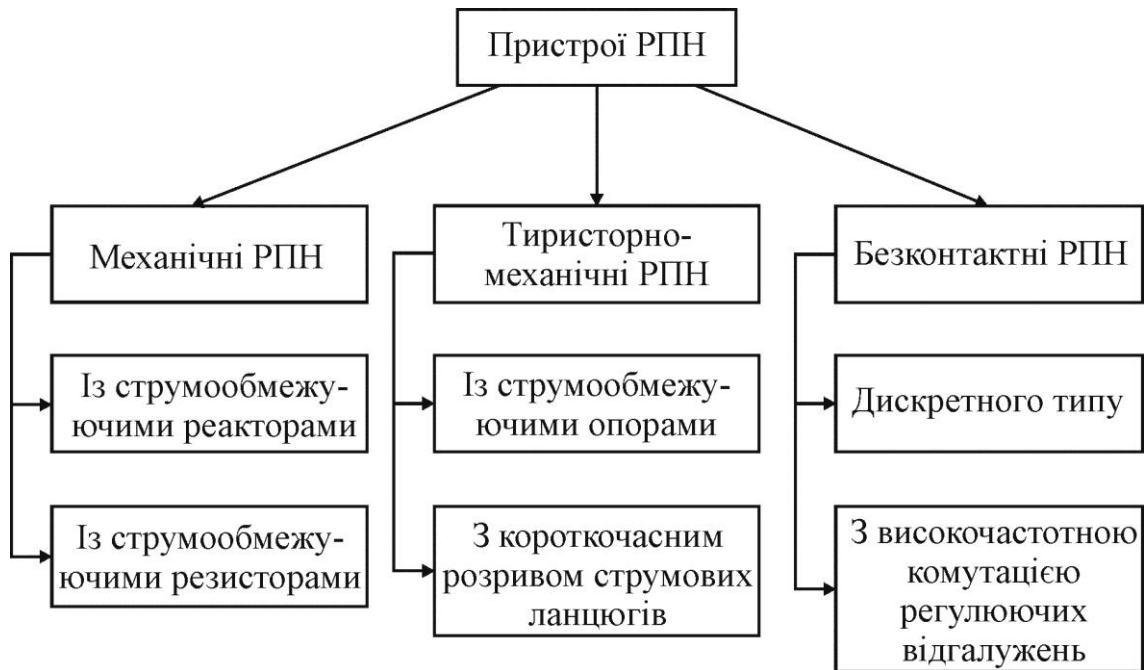


Рис. 1.4. Класифікація РПН силових трансформаторів

Найпоширенішими у вітчизняних РЕМ є трансформатори з механічними пристроями РПН. На рис. 1.5 показана принципова схема знижувального двохобмоточного трансформатора з пристроєм РПН [14, 19]. Обмотка ВН силового трансформатора з пристроєм РПН складається з двох частин – регулюючої та нерегульованої. Регулююча частина має декілька відгалужень 1 – 7. Частина цієї обмотки з відгалуженнями 1 – 3 увімкнена узгоджено з основною обмоткою, а перемикання з 3 на 2 відгалуження збільшує коефіцієнт трансформації трансформатора. Інша частина регулюючої обмотки (5 – 7) ввімкнена зустрічно з основною обмоткою, перехід з 5 на 7 відгалуження зменшує коефіцієнт трансформації трансформатора. Кількість регулюючих відгалужень частин обмотки, що ввімкнені узгоджено та зустрічно з основною обмоткою може відрізнатись.

Перемикаючий пристрій регулюючої обмотки складається з контактів П1 і П2, контакторів К1 і К2 та реактора L, що слугує для обмеження струмів під час перемикання. Середня точка цього реактора L приєднана до нерегульованої частини обмотки силового трансформатора.

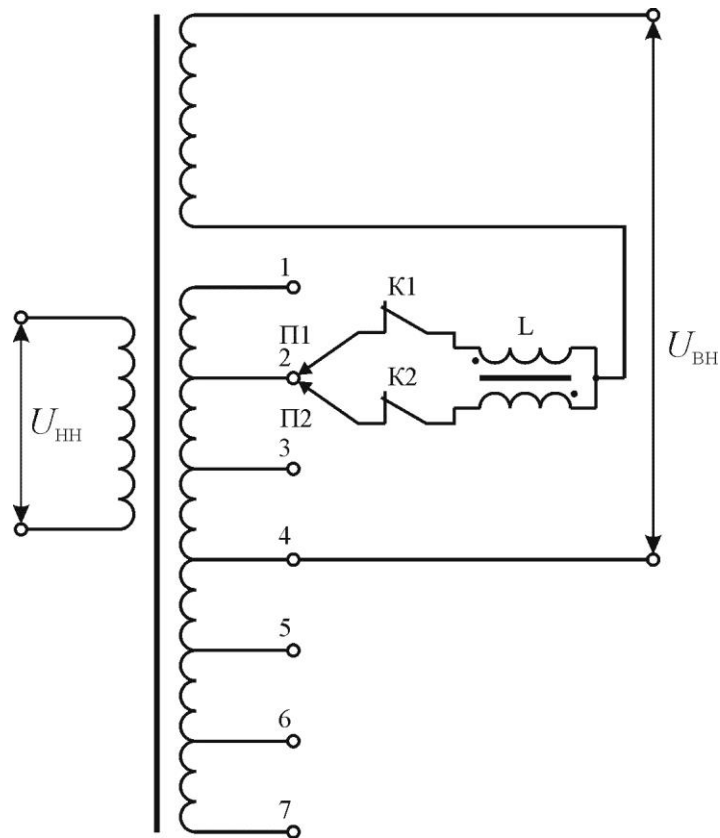


Рис. 1.5. Схема силового трансформатора з пристроєм РПН

Для обмеження струму короткого замкнення, який протікає по частині обмотки, що замкнута накоротко в проміжному положенні, можуть використовуватись активні опори.

До головних недоліків механічних пристроїв РПН відносяться наступні:

1. Відносна невисока надійність пристрою РПН, зумовлена обмеженою зносостійкістю контактів через електроерозійне зношення під дією електричної дуги під час комутації відгалужень. В зв'язку з цим кількість перемикачів механічним РПН намагаються зменшити, що негативно впливає на рівні ПЯЕ в РЕМ.

2. Низька швидкодія механічного РПН за рахунок високої його інерційності внаслідок використання електромеханічного приводу. Тривалість перемикачів відгалужень може сягати до 20 с, що унеможливорює відпрацювання коливань і швидких змін відхилень напруги в РЕМ.

В силових трансформаторах з механічним РПН, які встановлюються в РЕМ, встановлюється спільний перемикач для всіх трьох фаз, що унеможливорює здійснення пофазної зміни коефіцієнтів трансформації. Через це, трансформатори з механічними РПН не можуть бути застосовані для реалізації САК зниженням несиметрії і відхилення.

Певні недоліки, що притаманні механічним РПН, відсутні у тиристорно-механічних РПН [13, 21]. В таких пристроях під час перемикання відгалужень електрична дуга не виникає, для комутації струмових кіл використовуються симетричні блоки з двох тиристорів, увімкнених зустрічно-паралельно. Тиристорно-механічні пристрої можуть виконуватись по типу механічних пристроїв РПН із струмообмежуючими елементами та аналогічною схемою перемикань або із короткочасним розривом струмових кіл.

Основними перевагами тиристорно-механічних систем РПН над механічними є їх більш висока надійність, дещо більша швидкодія.

Основними недоліком тиристорно-механічних РПН є їх висока вартість та складність конструкції. Оскільки тиристорно-механічні пристрої РПН мають спільний для всіх трьох фаз перемикач контактів, то це робить неможливим здійснення пофазної зміни коефіцієнта трансформації трансформатора і унеможливорює їх використання для побудови САК зниженням рівнів несиметрії і відхилення напруг в РЕМ.

Найперспективнішим технічним засобом зміни коефіцієнта трансформації трансформатора є безконтактний РПН. У таких пристроях перемикання струмових кіл здійснюється з допомогою напівпровідникових ключів (IGBT транзисторів, симісторів, тиристорів) [23 – 26].

В залежності від конструкції, безконтактні пристрої РПН можна поділити на регулятори дискретного типу і регулятори з високочастотною комутацією відгалужень [13].

Принцип роботи безконтактних РПН з високочастотною комутацією відгалужень полягає у багатократному перемиканні відгалужень силового трансформатора протягом одного півперіоду змінної напруги [13].

Перевагою цього пристрою у порівнянні з безконтактним дискретним РПН є здатність плавно змінювати напругу. Безконтактний РПН з високочастотною комутацією відгалужень дозволяє досягти високої точності регулювання напруги як в статичних, так і в динамічних режимах. Але низькі енергетичні показники, спотворення синусоїдальності напруги та складність конструкції обмежують використання регуляторів цього типу.

В безконтактних пристроях РПН дискретного типу регулювання проводиться шляхом ступінчатого перемикання відгалужень обмотки силового трансформатора напівпровідниковими ключами.

Схема тиристорного пристрою РПН дискретного типу наведена на рис. 1.6.

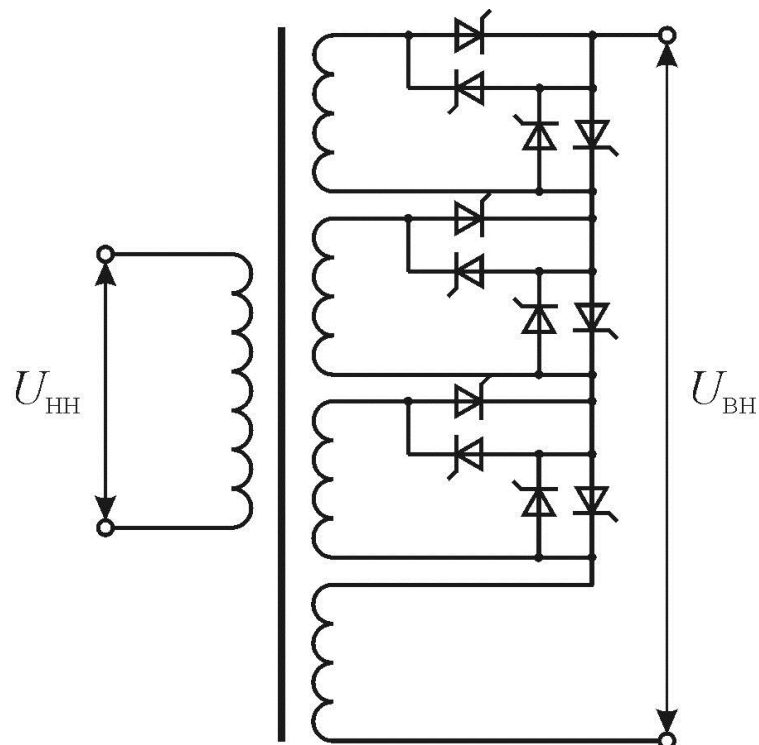


Рис. 1.6. Схема дискретного тиристорного РПН.

Тиристорні РПН дискретного типу характеризуються простотою конструкції і високими енергетичними показниками, не спричиняють спотворення синусоїдальності вихідної напруги.

У роботі [27] авторами запропоновано створення безконтактних РПН дискретного типу на основі силових трансформаторів з ПБЗ за рахунок встановлення на відгалуженнях обмоток тиристорних ключів.

Така модернізація силових трансформаторів з ПБЗ вимагає невеликих витрат, але дозволяє значно збільшити можливості регулювання напруги для силових трансформаторів з ПБЗ. Для таких модернізованих силових трансформаторів будуть характерні всі переваги силових трансформаторів з безконтактним РПН дискретного типу.

До основних переваг безконтактних РПН відносяться висока швидкодія за рахунок відсутності механічних частин і практично необмежений ресурс перемикачів відгалужень за рахунок відсутності електроерозії механічних контактів. Це дозволяє безконтактному пристрою РПН відпрацьовувати швидкоплинні зміни відхилення напруги в РЕМ, забезпечуючи тим самим високу точність регулювання напруги. Окрім цього слід відмітити високу надійність і ремонтпридатність безконтактних пристроїв РПН [25].

Оскільки в безконтактних РПН в якості комутуючих пристроїв застосовуються напівпровідникові ключі, то це створює можливість незалежного перемикачів відгалужень регульовальної обмотки у кожній фазі трансформатора, тобто безконтактні пристрої РПН дозволяють здійснювати пофазну зміну коефіцієнтів трансформації силових трансформаторів. Зважаючи на це, безконтактні пристрої РПН можуть бути застосовані для реалізації САК рівнями несиметрії і відхилення напруг в РЕМ.

1.3 Аналітичний огляд методів і пристроїв автоматичної зміни коефіцієнта трансформації трансформатора

Для автоматичного керування процесом зміни коефіцієнта трансформації трансформатора розроблено велику кількість САК, які реалізують певні закони регулювання напруги.

Найбільш простим законом регулювання напруги є автоматичне регулювання напруги за відхиленням [28].

В роботі [29] описано пристрій, який реалізує такий закон регулювання напруги. На рис. 1.7. наведена функціональна схема цього пристрою.

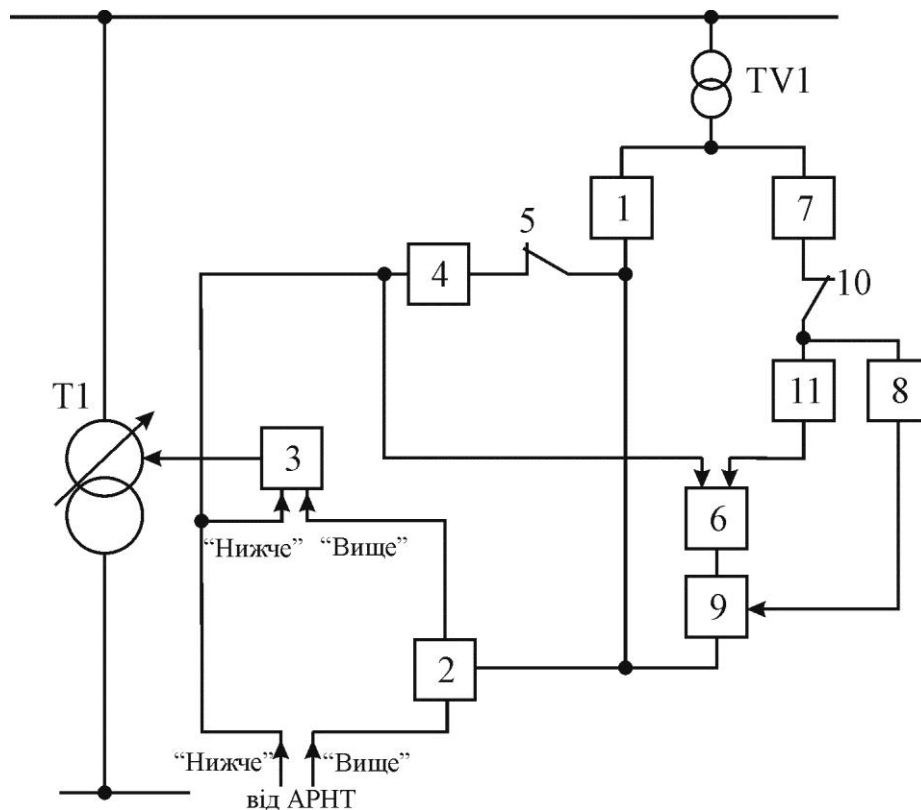


Рис. 1.7. Схема пристрою регулювання напруги в РЕМ

Недоліком регулювання напруги за її усталеним відхиленням є неврахування струму електроспоживачів, за рахунок чого неможливо виконати зустрічне регулювання напруги. До того ж описаний спосіб

регулювання не передбачає можливості здійснювати пофазну зміну коефіцієнтів трансформації силового трансформатора

Більш досконалим законом регулювання є закон, що реалізує зустрічне регулювання напруги в РЕМ.

Найбільш поширеним пристроєм, який реалізує закон зустрічного регулювання напруги за рахунок перемикання відгалужень трансформатора, є АРТ-1Н [14]. На рис. 1.8 наведена функціональна схема АРТ-1Н.

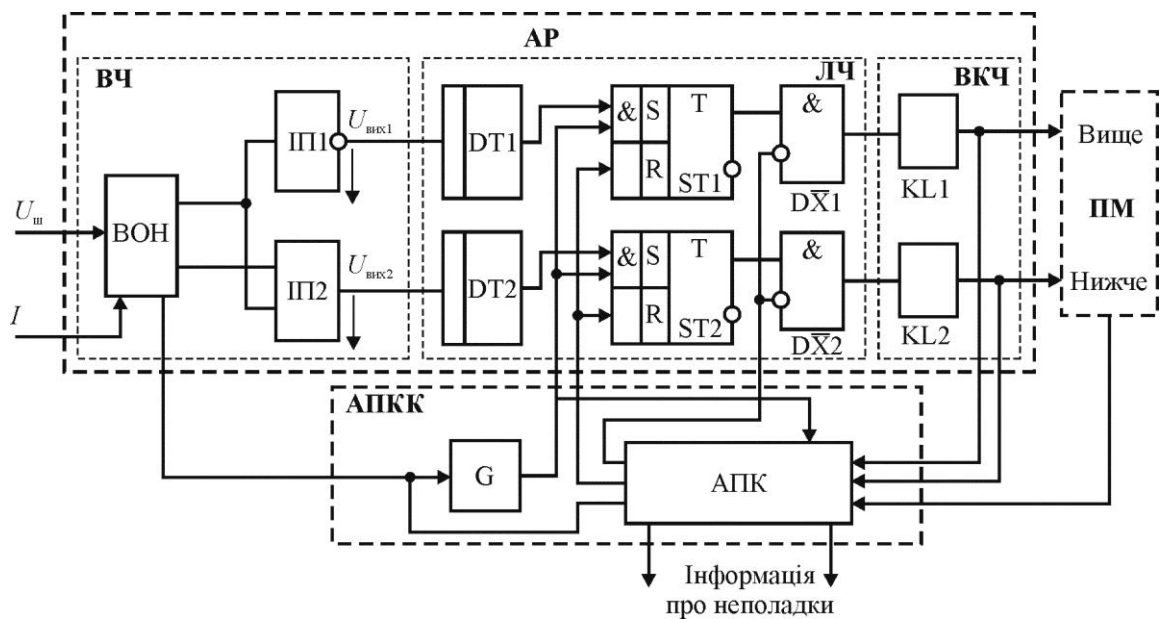


Рис. 1.8. Схема автоматичного регулятора АРТ-1Н

До основних недоліків АРТ-1Н слід віднести відсутність відслідковування напрямку зміни напруги, що викликає зайві перемикання регулюючих відгалужень, та неможливість відпрацювання швидких відхилень напруги.

В роботі [31] авторами запропоновано спосіб автоматичного регулювання напруги, який враховує струм навантаження. Для запобігання понаднормового підвищення напруги на затискачах споживачів, які розташовані неподалік трансформаторної підстанції під час протікання значного струму навантаження лінії, цей пристрій передбачає автоматичну зміну уставки регулятора напруги у випадку перевищення максимального

значення напруги струмової компенсації. Описаний пристрій має ті ж самі недоліки, що і АРТ-1Н.

В роботах [32, 33] описано спосіб і пристрій автоматичного регулювання напруги згідно критерію мінімуму економічних збитків від відхилення напруги. Ідея цього способу полягає в здійсненні перемикачів регулюючих відгалужень лише у випадку, коли це перемикач призведе до суттєвого зниження збитків від відхилення напруги. Таким способом підвищується надійність роботи пристрою РПН шляхом зменшення кількості його перемикачів.

В роботі [36] наведено опис САК пристроєм РПН силового трансформатора на основі математичного апарату нечіткої логіки. На рис. 1.9 показана блок-схема запропонованого в роботі [36] нечіткого регулятора.



Рис. 1.9. Блок-схема регулятора пристроєм РПН на основі нечіткої логіки

Застосування авторами роботи [36] математичного апарату нечіткої логіки дозволило підвищити надійність роботи силового трансформатора за рахунок обмеження кількості перемикачів механічного РПН при майже повній відсутності погіршення якості електроенергії.

Описані вище способи і пристрої регулювання напруги спрямовані або на підвищення надійності роботи РЕМ за рахунок зменшення кількості перемикачів механічного РПН, або на підвищення рівня якості електроенергії

за рахунок зниження надійності. Але описані способи зміни коефіцієнта трансформації силового трансформатора не здійснюють впливу на значення несиметрії напруги через те, що вони не передбачають здійснення пофазної зміни коефіцієнта трансформації трансформатора.

В роботі [41] авторами пропонується розглядати задачу автоматичного керування режимами роботи симетрувального трансформатора у вигляді задачі багатокритеріальної (векторної) оптимізації:

$$\begin{cases} U_2 \rightarrow \min; \\ |\Delta U_1| \rightarrow \min; \\ |\Delta U_{\phi i}| \rightarrow \min, \quad i = a, b, c, \end{cases} \quad (1.1)$$

де U_2 – напруга зворотної послідовності;

$|\Delta U_1|$ – відхилення напруги прямої послідовності;

$|\Delta U_{\phi i}|$ – відхилення i -ї фазної напруги.

Запропонований в роботі [41] підхід до побудови САК зміною коефіцієнту трансформації силового трансформатора найбільш повно враховує мультифункціональні можливості трансформаторів як технічного засобу одночасного зменшення рівнів несиметрії та усталеного відхилення напруг в РЕМ. До недоліків запропонованого в роботі [41] алгоритму автоматичного керування режимом роботи симетрувального трансформатора необхідно віднести необґрунтованість вибору методу вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації.

Проведений огляд існуючих САК пристроями РПН трансформаторів показав, що найбільш поширеними є САК, які реалізують закон регулювання напруги за відхиленням і ті, що реалізують закон зустрічного регулювання.

На рисунку 1.10 наведена структурна схема САК пристрою РПН трансформатора, обмотки якого з'єднані за схемою «зірка/трикутник», який реалізує закон автоматичного керування за відхиленням напруги.

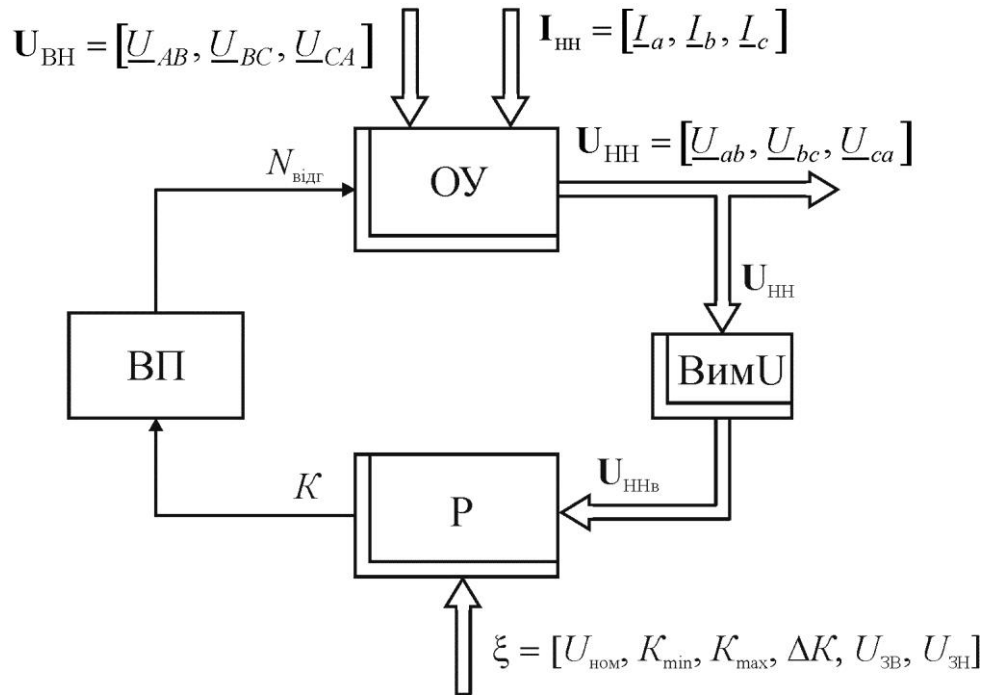


Рис. 1.10. Структурна схема САК пристроєм РПН силового трансформатора, за відхиленням напруги

На рис. 1.10:

$\mathbf{I}_{\text{НН}} = [\underline{I}_a, \underline{I}_b, \underline{I}_c]$ – вектор комплексів струмів;

$\underline{I}_a, \underline{I}_b, \underline{I}_c$ – комплекси фазних струмів на стороні НН трансформатора;

$\mathbf{U}_{\text{ВН}} = [\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}]$ – вектор комплексів лінійних напруг на стороні ВН трансформатора;

$\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}$ – комплекси лінійних напруг на стороні ВН трансформатора;

$\underline{U}_{\text{HH}} = [\underline{U}_{ab}, \underline{U}_{bc}, \underline{U}_{ca}]$ – вектор комплексів лінійних напруг на стороні НН трансформатора;

$\underline{U}_{ab}, \underline{U}_{bc}, \underline{U}_{ca}$ – комплекси лінійних напруг на стороні НН трансформатора;

$\underline{U}_{\text{HHb}} = [\underline{U}_{\text{Vab}}, \underline{U}_{\text{Vbc}}, \underline{U}_{\text{Vca}}]$ – вектор комплексів виміряних значень лінійних напруг на стороні НН трансформатора;

$\underline{U}_{\text{Vab}}, \underline{U}_{\text{Vbc}}, \underline{U}_{\text{Vca}}$ – виміряні значення комплексів напруг на стороні НН трансформатора;

$N_{\text{відг}}$ – номер регулюючого відгалуження обмотки ВН трансформатора;

K – коефіцієнт трансформації силового трансформатора;

$\xi = [U_{\text{ном}}, K_{\text{min}}, K_{\text{max}}, \Delta K, U_{\text{ЗВ}}, U_{\text{ЗН}}]$ – вектор задаючих параметрів САК;

$K_{\text{min}}, K_{\text{max}}$ – мінімальне і максимальне значення коефіцієнту трансформації трансформатора;

ΔK – крок регулювання коефіцієнту трансформації трансформатора;

$U_{\text{ЗВ}}, U_{\text{ЗН}}$ – нижчий та вищий пороги зони нечутливості регулятора;

ВП – виконавчий пристрій (пристрій РПН);

ВимU – вимірювальний перетворювач напруги (трансформатор напруги);

ОУ – об'єкт керування (силовий трансформатор);

Р – регулятор РПН трансформатора.

На рис. 1.11 наведена структурна схема регулятора РПН.

На рис. 1.11: U_{1HH} – напруга прямої послідовності на стороні НН трансформатора;

1 – блок розрахунку напруги прямої послідовності;

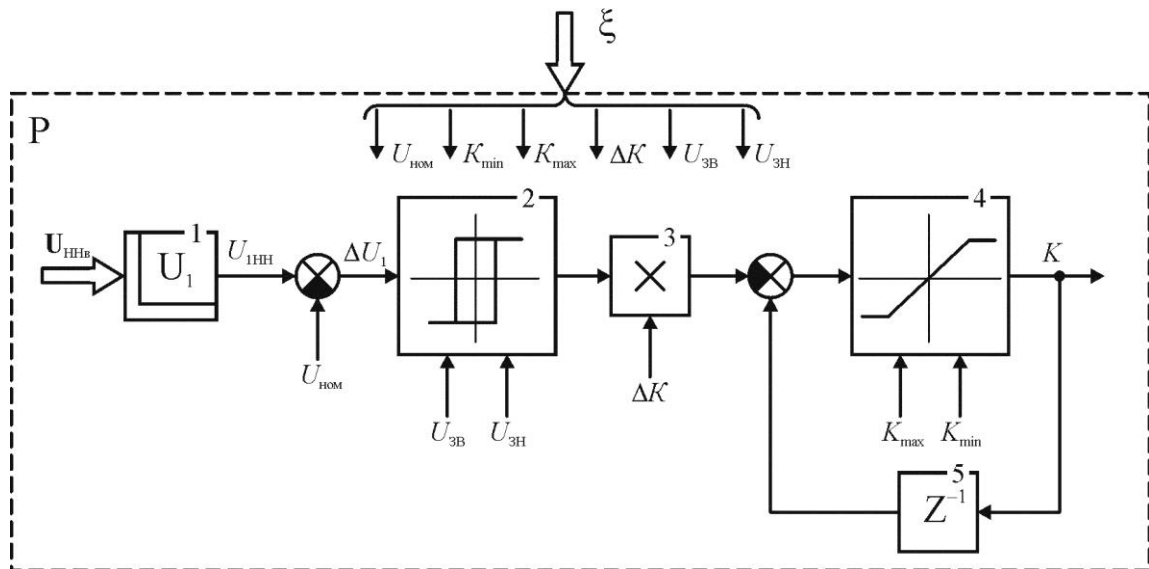


Рис. 1.11. Структурна схема регулятора пристрою РПН трансформатора, що реалізує закон автоматичного керування за відхиленням напруги

2 – «зона нечутливості»;

3 – блок виконання операції множення;

4 – «насичення».

5 – блок часової затримки сигналу на 1 крок.

Структурна схема САК, яка реалізує закон зустрічного регулювання напруги, показана на рис. 1.12, на якому:

ВимІ – первинний вимірювальний перетворювач струмів (трансформатор струму);

$\mathbf{I}_{\text{ННв}} = [\underline{I}_{\text{вa}}, \underline{I}_{\text{вb}}, \underline{I}_{\text{вc}}]$ – вектор виміряних значень комплексів струмів навантажень;

$\underline{I}_{\text{вa}}, \underline{I}_{\text{вb}}, \underline{I}_{\text{вc}}$ – виміряні значення комплексів фазних струмів на стороні НН трансформатора;

$Z_{\text{л}}$ – повний опір лінії електропередачі, що приєднана до шин НН трансформатора;

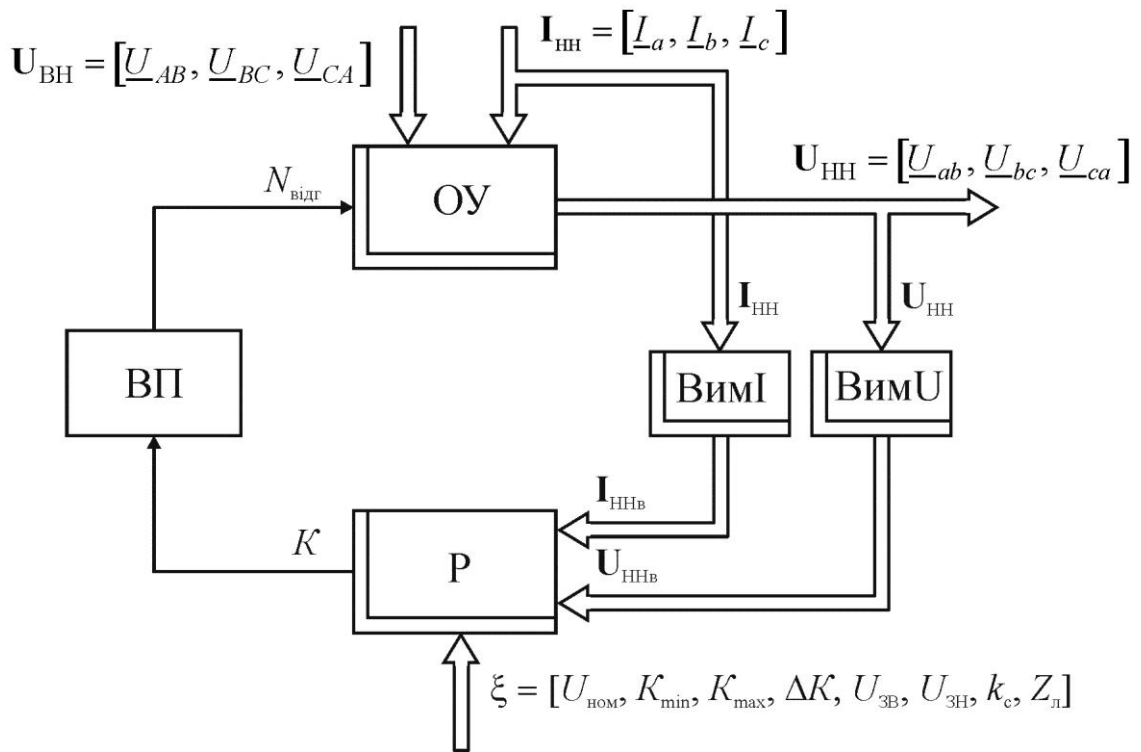


Рис. 1.12. Структурна схема САК пристроєм РПН, яка реалізує закон зустрічного регулювання напруги

k_c – коефіцієнт статизму регулювання:

$$k_c = \frac{U_{x.x.} - U_H}{U_H} \cdot 100\% \quad , \quad (1.2)$$

де U_H – значення напруги на шинах НН трансформаторної підстанції при проходженні номінального струму навантаження I_H ;

$U_{x.x.}$ – значення напруги на шинах НН трансформаторної підстанції в режимі х.х.

На рис. 1.13 наведена структурна схема регулятора пристрою РПН силового трансформатора.

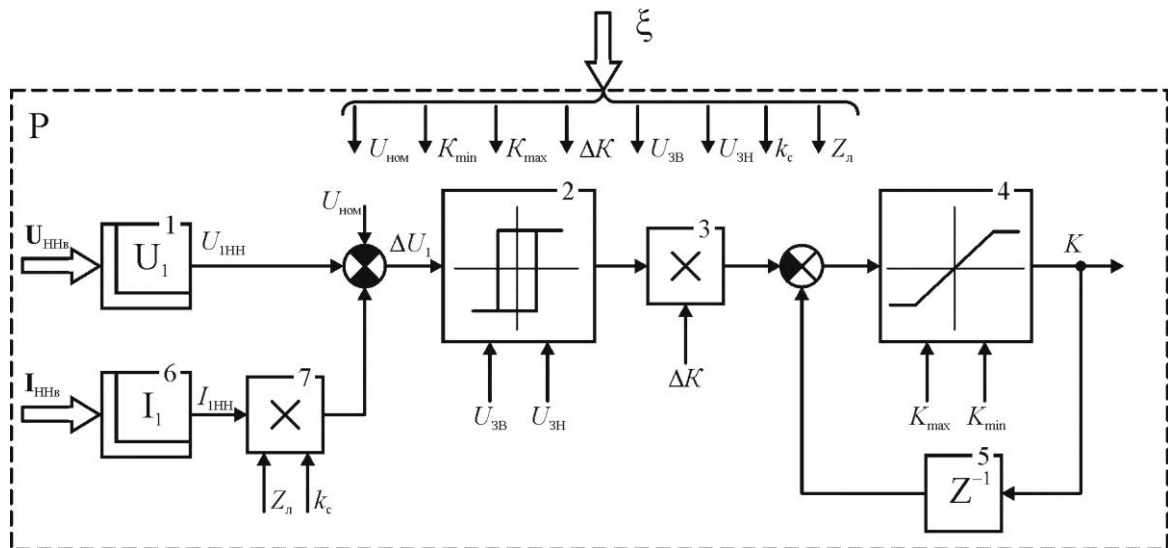


Рис. 1.13. Структурна схема регулятора пристрою РПН трансформатора, який реалізує закон зустрічного регулювання напруги в РЕМ

На рис. 1.13:

$I_{1НН}$ – струм прямої послідовності на стороні НН трансформатора;

6 – блок визначення модуля комплексу струму прямої послідовності відповідно до методу симетричних складових.

Аналіз останніх наукових досліджень, що присвячені методам автоматизації зміни коефіцієнта трансформації трансформатора, показав, що всі вони використовують в якості об'єкту керування механічний пристрій РПН трансформатора і в деякій мірі розв'язують або задачу підвищення надійності роботи РЕМ за рахунок зменшення кількості перемикачів РПН, що призводить до погіршення якості електричної енергії, або задачу підвищення якості автоматичного регулювання напруги шляхом зниження надійності роботи мережі.

Застосування силових трансформаторів з безконтактним пристроєм РПН змінює вимоги до їх САК і потребує створення нових підходів до розв'язання задачі розробки таких САК. Адже безконтактні РПН, окрім очевидних їх переваг дозволяють здійснювати пофазну зміну коефіцієнта трансформації трансформатора. Це дає змогу розглядати трансформатор з безконтактним пристроєм РПН як мультифункціональний технічний засіб

одночасного зниження рівнів несиметрії та усталеного відхилення напруг в РЕМ.

В зв'язку з вище сказаним виникає необхідність у проведенні досліджень з питання автоматизації керування РПН силового трансформатора.

1.4 Вибір напрямку досліджень задачі автоматизації керування пристроєм РПН трансформатора

Для вирішення задачі автоматизації керування пристроєм РПН трансформатора провести дослідження з таких питань:

1. Провести обґрунтування методу розв'язку задачі автоматичного керування пристроєм.

3. Розробити структурну схему САК пристроєм РПН силового трансформатора та алгоритм визначення вектора оптимального керування.

4. Розробити комп'ютерні імітаційні моделі САК пристроями та проаналізувати ефект від використання розв'язків задач автоматичного керування пристроями РПН трансформаторів шляхом математичного моделювання САК.

Задачу автоматизації керування пристроєм РПН силового трансформатора найбільш доцільно вирішувати в декілька етапів, що зображені на рисунку 1.14.



Рис. 1.14. Схема розв'язання задачі автоматичного керування пристроєм РПН трансформатора

Висновки до розділу

1. Проведений аналіз методів і технічних засобів регулювання напруги в розподільних електричних мережах показав, що головною причиною недостатньої ефективності підвищення якості електроенергії є неврахування можливості одночасного зменшення рівнів несиметрії та відхилення напруг шляхом пофазної автоматичної зміни коефіцієнтів трансформації силових трансформаторів.

2. Проведений аналіз відомих технічних засобів регулювання коефіцієнту трансформації трансформатора показав, що найбільш досконалим є безконтактний РПН, який дозволяє здійснювати пофазне регулювання значення коефіцієнта трансформації трансформатора, що дає змогу керування не лише рівнем усталеного відхилення напруги, а й значеннями несиметрії напруг в електричних мережах.

3. В результаті проведеного аналізу методів і засобів автоматизації керування регулюючими пристроями силових трансформаторів визначено, що існуючі методи автоматизації керування пристроєм РПН трансформатора не враховують мультифункціональність силового трансформатора з безконтактним РПН, яка полягає в можливості впливу не тільки на рівні відхилення напруги, але і на несиметрію напруг за рахунок здійснення пофазного регулювання коефіцієнтів трансформації трансформатора. Необхідність врахування цієї можливості вимагає проведення досліджень з питання автоматизації керування безконтактними пристроями РПН трансформаторів.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАДАЧІ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЯМИ РПН СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Трансформатор з безконтактним РПН є багатофункціональним засобом зменшення рівнів ПЯЕ, оскільки він може здійснювати керування, що будуть здійснювати вплив як на рівні несиметрії, так і на рівень усталеного відхилення напруг

Для забезпечення автоматичного керування РПН трансформатора, за якого б досягалось зниження рівнів відхилення і несиметрії напруг в РЕМ, потрібно вирішити такі завдання:

- визначити взаємозв'язки між вхідними і вихідними параметрами трансформатора в умовах несиметрії напруги в мережі;
- провести формалізацію задачі автоматичного керування РПН трансформатора;
- здійснити вибір і обґрунтування методу розв'язку поставленої задачі керування РПН трансформаторів;
- визначити аналітичні співвідношення для знаходження координати утопічної точки та визначити співвідношення для знаходження кінцевого розв'язку для даної задачі.

Вирішенню цих завдань і присвячений другий розділ.

2.1 Розробка математичної моделі об'єкту керування та постановка задачі автоматичного керування пристроєм РПН

Для забезпечення автоматичного керування рівнями несиметрії і відхилення напруг потрібно виконувати пофазну зміну коефіцієнтів

трансформації трансформатора, що може бути здійснено шляхом використання безконтактного пристрою РПН силового трансформатора.

Структурна схема САК пристроєм РПН трансформатора, що забезпечує пофазну зміну коефіцієнтів трансформації трансформатора наведена на рис. 2.1.

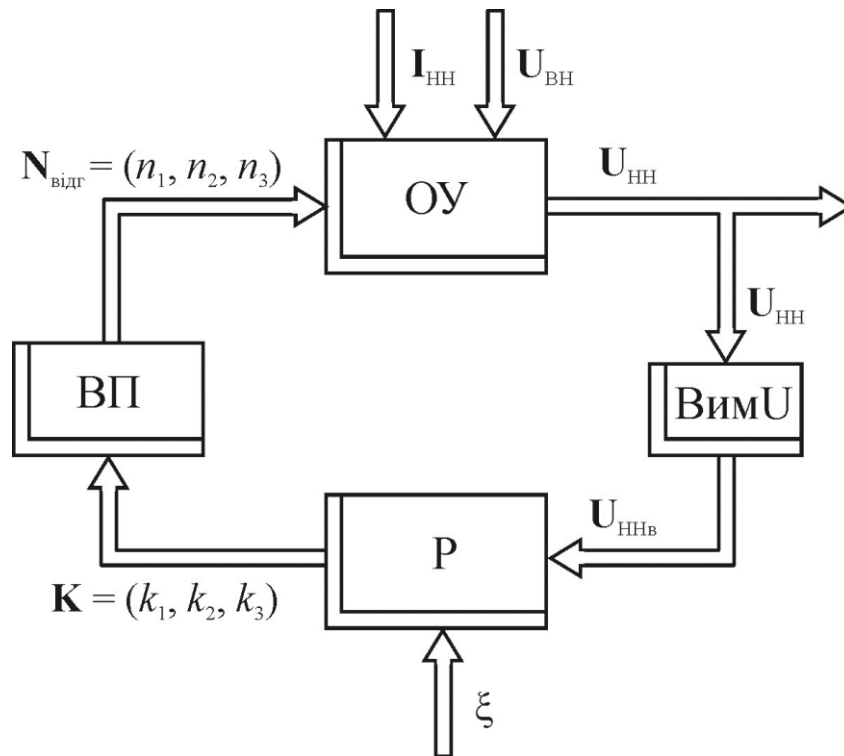


Рис. 2.1. Структурна схема САК пристроєм РПН трансформатора що забезпечує пофазну зміну коефіцієнтів трансформації

На рис. 2.1:

$\mathbf{K} = (k_1, k_2, k_3)$ – вектор керування;

k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти трансформації кожної з фаз трансформатора;

$\mathbf{N}_{\text{відг}} = (n_1, n_2, n_3)$ – вектор номерів відгалужень обмотки ВН трансформатора;

n_1, n_2, n_3 – номери регулюючих відгалужень обмотки ВН трансформатора;

Як видно з рис. 2.1, на відміну від «класичної» моделі САК пристроєм РПН, що зображена на рис. 1.10, вихідним сигналом регулятора є векторна величина, а не скалярна.

У роботі [8] показано, що в умовах несиметрії навантаження досягнення повного зниження рівнів несиметрії і усталеного відхилення напруг за рахунок пофазної зміни коефіцієнтів трансформації є принципово неможливим. Тому для вирішення задачі одночасного зниження рівнів несиметрії і відхилення напруг за рахунок автоматичного керування коефіцієнтами трансформації трансформатора потрібно використати метод, що спрямований не на визначення керуючого впливу, за якого спостерігалось б повне зниження рівнів несиметрії і відхилення напруг, а на знаходження «компромісного» розв'язку, що дозволив би одночасно зменшити рівні несиметрії і відхилення напруг до нормально допустимих меж.

Зважаючи на це, задачу автоматичного керування пристроєм РПН для забезпечення одночасного зниження рівнів несиметрії і відхилення напруги в РЕМ найбільш доцільно розглядати як задачу багатокритеріальної оптимізації [64]. За такого підходу знаходиться мінімум не одного, а кількох критеріїв одночасно. Цей підхід дозволяє досягти прийнятного рішення стосовно всіх критеріїв.

В залежності від режиму роботи нейтралі РЕМ та схеми з'єднання обмоток трансформатора буде відрізнятися модель об'єкту керування, вектор задаючих параметрів ξ і, як наслідок, буде різнитись постановка задачі керування пристроєм РПН трансформатора.

Проведемо постановку задачі автоматичного керування пристроєм РПН трансформатора для випадку, коли обмотки трансформатора з'єднані в схему «зірка/трикутник». Ця схема притаманна знижувальному силовому трансформатору напругою 35/10 кВ, що працює в мережі з ізольованою нейтраллю. На рис. 2.2 наведена схема заміщення цієї РЕМ:

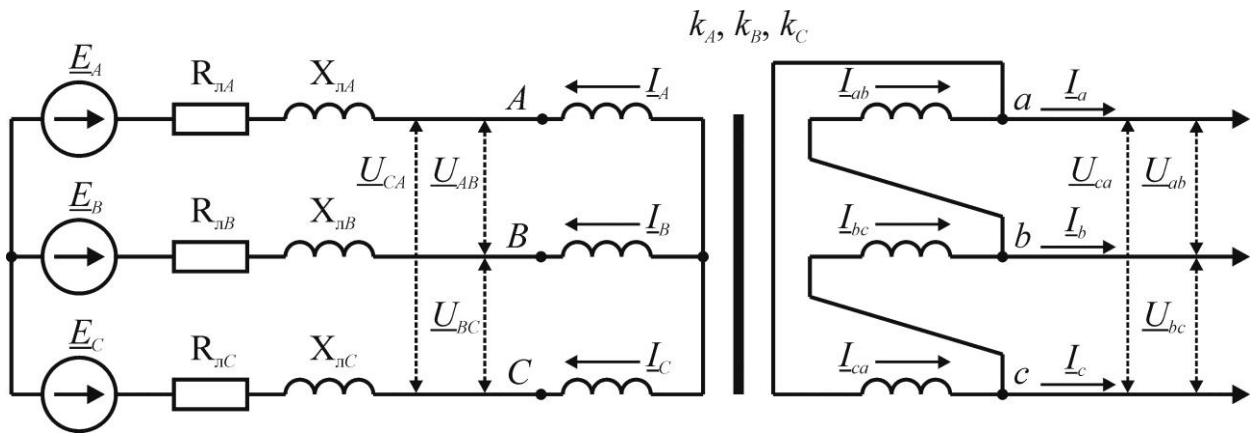


Рис. 2.2. Схема заміщення РЕМ з ізольованою нейтраллю

На рис. 2.2:

$\underline{E}_A, \underline{E}_B, \underline{E}_C$ – комплексні значення фазних е.р.с. системи;

$R_{лA}, X_{лA}, R_{лB}, X_{лB}, R_{лC}, X_{лC}$ – активні та індуктивні опори фаз повітряної (кабельної);

k_A, k_B, k_C – коефіцієнти трансформації силового трансформатора для кожної з фаз:

$$k_A = \frac{w_{ABH}}{w_{AHN}} \quad k_B = \frac{w_{BВH}}{w_{BHN}} \quad k_C = \frac{w_{CBH}}{w_{CHN}}, \quad (2.1)$$

де $w_{ABH}, w_{BВH}, w_{CBH}$ – кількість витків в фазах обмотки високої напруги трансформатора;

$w_{AHN}, w_{BHN}, w_{CHN}$ – кількість витків в фазах обмотки низької напруги трансформатора;

$\underline{I}_{ab}, \underline{I}_{bc}, \underline{I}_{ca}$ – фазні струми обмотки НН трансформатора;

$\underline{I}_a, \underline{I}_b, \underline{I}_c$ – лінійні струми на стороні низької напруги трансформатора;

$$\underline{I}_a = -\underline{I}_{AB}k_A; \underline{I}_b = -\underline{I}_{BC}k_B; \underline{I}_c = -\underline{I}_{CA}k_C.$$

Взаємозв'язок між напругами та струмами на стороні високої напруги та напругами на стороні низької напруги силового трансформатора:

$$\begin{cases} \underline{U}_{ab} = \frac{-(\underline{U}_A - \underline{I}_A \underline{Z}_k)}{k_A} = \frac{\underline{U}'_A}{k_A}; \\ \underline{U}_{bc} = \frac{-(\underline{U}_B - \underline{I}_B \underline{Z}_k)}{k_B} = \frac{\underline{U}'_B}{k_B}; \\ \underline{U}_{ca} = \frac{-(\underline{U}_C - \underline{I}_C \underline{Z}_k)}{k_C} = \frac{\underline{U}'_C}{k_C}, \end{cases} \quad (2.2)$$

де $\underline{Z}_k$ – комплексний опір к.з. силового трансформатора.

Для РЕМ, схема якої зображена на рис. 2.2, на стороні низької напруги характерна наявність напруг прямої $\underline{U}_1$ і зворотної $\underline{U}_2$ послідовностей. Вирази для знаходження зазначених параметрів згідно методу симетричних складових мають вигляд:

$$\underline{U}_1 = \frac{1}{3}(\underline{U}_{ab} + a\underline{U}_{bc} + a^2\underline{U}_{ca}) = \frac{1}{3}\left(\frac{\underline{U}'_A}{k_A} + a\frac{\underline{U}'_B}{k_B} + a^2\frac{\underline{U}'_C}{k_C}\right), \quad (2.3)$$

$$\underline{U}_2 = \frac{1}{3}(\underline{U}_{ab} + a^2\underline{U}_{bc} + a\underline{U}_{ca}) = \frac{1}{3}\left(\frac{\underline{U}'_A}{k_A} + a^2\frac{\underline{U}'_B}{k_B} + a\frac{\underline{U}'_C}{k_C}\right), \quad (2.4)$$

Формули (2.3) і (2.4) визначають зв'язок $\underline{U}_1$ і $\underline{U}_2$ із значеннями коефіцієнтів трансформації k_A , k_B , k_C трансформатора і можуть бути використані при формуванні критеріїв для задачі автоматичного керування для випадку трансформатора зі схемою з'єднання його обмоток «зірка/трикутник».

Постановка задачі автоматичного керування пристроєм РПН трансформатора має наступний вигляд:

$$\begin{cases} |\Delta U_1(\mathbf{K})| = |U_1(\mathbf{K}) - U_{\text{ном}}| \rightarrow \min; \\ U_2(\mathbf{K}) \rightarrow \min; \\ \mathbf{K} \in \Omega, \end{cases} \quad (2.5)$$

де $\mathbf{K} = (k_A, k_B, k_C)$ – вектор коефіцієнтів трансформації силового трансформатора;

$U_1(\mathbf{K})$ – діюче значення напруги прямої послідовності;

$\Delta U_1(\mathbf{K})$ – відхилення напруги;

$U_2(\mathbf{K})$ – діюче значення напруги зворотної послідовності;

$U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга РЕМ;

$\Omega = \{\mathbf{K} \in \mathbb{R}^3 | k_{i\min} \leq k_i \leq k_{i\max}, i = A, B, C\}$ – область допустимих значень

вектора керування, яка визначається діапазоном регулювання пристрою РПН;

$k_{i\min}, k_{i\max}, i = A, B, C$ – мінімальне і максимальне значення коефіцієнту трансформації силового трансформатора по фазах.

2.2 Вибір методу розв'язку задачі автоматичного керування пристроєм РПН трансформатора

Існує декілька груп методів вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації [47]:

- методи, що базуються на лінійному згортанні критеріїв;
- методи, що базуються на введення обмежень на критерії;
- методи цільового програмування;
- методи інтерактивного програмування;
- методи, що базуються на пошуку компромісного розв'язку.

Порівняльні характеристики методів, що належать до вказаних груп, наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Порівняння методів розв’язання задачі багатокритеріальної оптимізації

Метод	Критерії для порівняння			
	Можливість отримати бажане співвідношення критеріїв	Знаходження розв’язку задачі за один крок	Можливість приведення задачі скалярного до вигляду	Неупорядкованість критеріїв згідно їх важливості
Метод головного критерію	—	x	x	x
Метод лінійного згортання	—	x	x	x
Максимінні (мінімаксні) методи	—	x	x	x
Адаптивний метод	x	—	—	x
Лексикографічна оптимізація	—	x	x	—
Метод наближення до утопічної точки	x	x	x	x

Як видно з табл. 2.1, найбільш прийнятним методом вирішення задачі (2.5) є метод наближення до утопічної точки

Вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації цим методом відбувається два етапи:

I етап. Визначаються координати утопічної точки $Q_{\text{ут}} = (Q_{\text{ут}1}, Q_{\text{ут}2}, \dots, Q_{\text{ут}i})$ шляхом вирішення послідовності оптимізаційних задач для кожного з критеріїв

2 етап. Знаходиться кінцевий розв'язок задачі K^* шляхом вирішення задачі оптимізації відстані до парето-оптимальної множини від утопічної точки.

Для вирішення задач, подібних (2.5) найчастіше в якості відстані обирають наступні.

1. Евклідова відстань ρ_{L^2} . Постановка задачі знаходження мінімуму відстані для цього випадку має вигляд:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m \mu_i \frac{(Q_i(K) - Q_{\text{ут}i})^2}{\beta_i} \rightarrow \min; \\ K \in \Omega, \end{cases} \quad (2.6)$$

де β_i – коефіцієнти нормалізації;

μ_i – вагові коефіцієнти.

Геометрична інтерпретація цього методу розв'язку задачі бприведена на рис. 2.3 (точка Q_E).

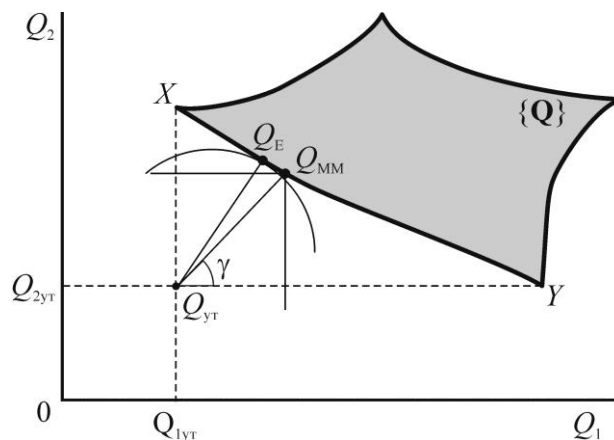


Рис. 2.3. Геометрична інтерпретація розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації.

2. Чебишевська відстань ρ_C Постановка задачі знаходження мінімуму відстані для цього випадку має вигляд:

$$\begin{cases} \max_{i=1 \dots m} \left\{ \mu_i \left| \frac{Q_i(\mathbf{K}) - Q_{yTi}}{\beta_i} \right| \right\} \rightarrow \min; \\ \mathbf{K} \in \Omega. \end{cases} \quad (2.7)$$

Геометрична інтерпретація цього методу розв'язку наведена на рис. 2.3 (точка Q_{MM}).

Графічна ілюстрація до результатів розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації зазначеними методами наведена на рис. 2.4

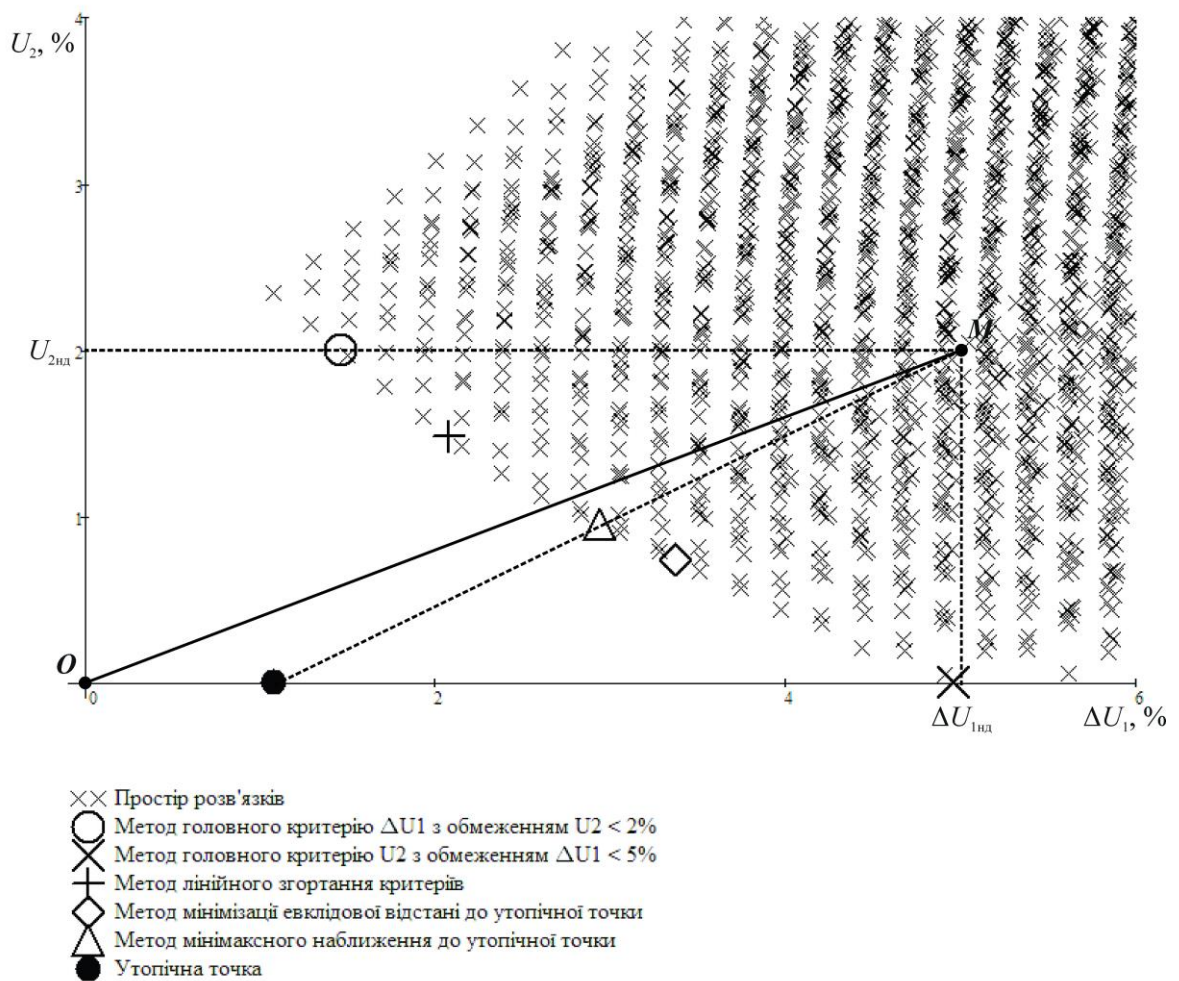


Рис. 2.4. Графічна ілюстрація до розв'язання задачі

2.3 Знаходження аналітичних виразів для координат утопічної точки та визначення кінцевого розв'язку задачі керування

Для задачі (2.5) утопічна точка має дві координати $Q_{yt}(\Delta U_{1yt}, U_{2yt})$.

Для знаходження виразу для визначення координати ΔU_{1yt} потрібно знайти розв'язок задачі оптимізації:

$$\begin{cases} |\Delta U_1(\mathbf{K})| = |U_1(\mathbf{K}) - U_{ном}| \rightarrow \min; \\ \mathbf{K} \in \Omega. \end{cases} \quad (2.8)$$

Модуль комплексу $\underline{U}_1(\mathbf{K})$:

$$U_1(\mathbf{K}) = \sqrt{[\operatorname{Re} \underline{U}_1(\mathbf{K})]^2 + [\operatorname{Im} \underline{U}_1(\mathbf{K})]^2}. \quad (2.9)$$

Ввівши позначення $\underline{U}'_A = U_{Aa} + jU_{Ap}$, $\underline{U}'_B = U_{Ba} + jU_{Bp}$,

$\underline{U}'_C = U_{Ca} + jU_{Cp}$ та підставивши ці вирази в (2.3), отримаємо:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1(\mathbf{K}) = \frac{1}{3} & \left(\frac{(U_{Aa} + jU_{Ap})}{k_A} + \left(-0,5 + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \frac{(U_{Ba} + jU_{Bp})}{k_B} + \right. \\ & \left. + \left(-0,5 - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \frac{(U_{Ca} + jU_{Cp})}{k_C} \right). \end{aligned} \quad (2.10)$$

Після алгебраїчних перетворень виразу (2.10) отримуємо складові рівняння (2.9):

$$\operatorname{Re} \underline{U}_1(\mathbf{K}) = -\frac{k_A k_B U_{Ca} + k_A k_C U_{Ba} - 2k_B k_C U_{Aa} - \sqrt{3}k_A k_B U_{Cp} + \sqrt{3}k_A k_C U_{Bp}}{6k_A k_B k_C}; \quad (2.11)$$

$$\operatorname{Im} \underline{U}_1(\mathbf{K}) = -\frac{\sqrt{3}k_A k_B U_{Ca} + \sqrt{3}k_A k_C U_{Ba} + k_A k_B U_{Cp} + 2k_A k_C U_{Bp} - 2k_B k_C U_{Ap}}{6k_A k_B k_C}. \quad (2.12)$$

Підставивши вирази (2.11) і (2.12) у вираз для визначення $\Delta U_1(\mathbf{K})$, отримаємо наступний вираз:

$$\Delta U_1(\mathbf{K}) = \sqrt{\left[-\frac{k_A k_B U_{Ca} + k_A k_C U_{Ba} - 2k_B k_C U_{Aa} - \sqrt{3}k_A k_B U_{Cp} + \sqrt{3}k_A k_C U_{Bp}}{6k_A k_B k_C} \right]^2 + \left[-\frac{\sqrt{3}k_A k_B U_{Ca} - \sqrt{3}k_A k_C U_{Ba} + k_A k_B U_{Cp} + k_A k_C U_{Bp} - 2k_B k_C U_{Ap}}{6k_A k_B k_C} \right]^2} - U_{\text{ном}}. \quad (2.13)$$

Оскільки функція (2.13) є функцією 3-х змінних, то у просторі $\mathbb{R}^3$ можна зобразити лише її переріз, представивши одну зі змінних як константу.

Поверхня $\Delta U_1(\mathbf{K})|_{k_C=\text{const}}$, $k_C \in \Omega$ показана на рис. 2.5.

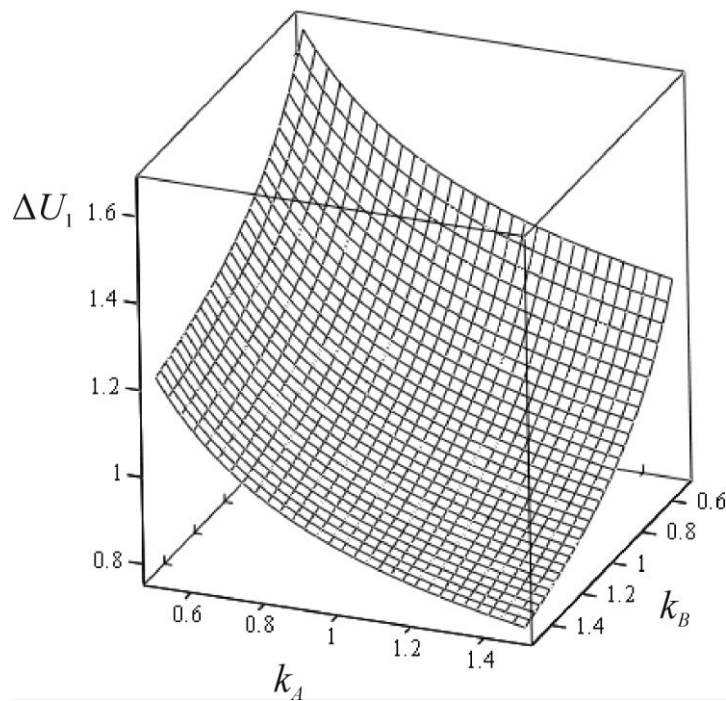


Рис. 2.5. Поверхня $\Delta U_1(\mathbf{K})|_{k_C=\text{const}}$, $k_C \in \Omega$.

Згідно теореми Больцано-Коши [73], та беручи до уваги монотонність функції (2.13) мінімум (2.8) можна знайти шляхом порівняння знаків функції $\Delta U_1(\mathbf{K})$ в точках $\mathbf{K} = \mathbf{K}_{\max}$ і $\mathbf{K} = \mathbf{K}_{\min}$:

$$\Delta U_{1\text{yt}} = \begin{cases} 0, & \text{sign } \Delta U_1(\mathbf{K}_{\min}) \neq \text{sign } \Delta U_1(\mathbf{K}_{\max}); \\ |\Delta U_1(\mathbf{K}_{\min})|, & \text{sign } \Delta U_1(\mathbf{K}_{\min}) = \text{sign } \Delta U_1(\mathbf{K}_{\max}) = -1; \\ |\Delta U_1(\mathbf{K}_{\max})|, & \text{sign } \Delta U_1(\mathbf{K}_{\min}) = \text{sign } \Delta U_1(\mathbf{K}_{\max}) = 1, \end{cases} \quad (2.14)$$

де $\mathbf{K}_{\min} = (k_{A\min}, k_{B\min}, k_{C\min})$, $\mathbf{K}_{\max} = (k_{A\max}, k_{B\max}, k_{C\max})$ – вектори мінімальних та максимальних значень коефіцієнтів трансформації силового трансформатора.

Отже, (3.7) являє собою вираз для визначення першої координати утопічної точки $\Delta U_{1\text{yt}}$.

Для знаходження координати $U_{2\text{yt}}$ потрібно знайти розв'язок задачі оптимізації:

$$\begin{cases} U_2(\mathbf{K}) \rightarrow \min; \\ \mathbf{K} \in \Omega. \end{cases} \quad (2.15)$$

Представимо вираз для знаходження $U_2(\mathbf{K})$ у вигляді:

$$U_2(\mathbf{K}) = \sqrt{[\operatorname{Re} \underline{U}_2(\mathbf{K})]^2 + [\operatorname{Im} \underline{U}_2(\mathbf{K})]^2}. \quad (2.16)$$

Згідно з формулою (2.4), взявши до уваги раніше введені позначення, отримаємо:

$$\begin{aligned} \underline{U}_2(\mathbf{K}) = \frac{1}{3} & \left(\frac{(U_{Aa} + jU_{Ap})}{k_A} + \left(-0,5 - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \frac{(U_{Ba} + jU_{Bp})}{k_B} + \right. \\ & \left. + \left(-0,5 + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \frac{(U_{Ca} + jU_{Cp})}{k_C} \right). \end{aligned} \quad (2.17)$$

Виділивши дійсну та уявну частини (3.10) і підставивши їх у (3.9), отримаємо:

$$\begin{aligned} U_2(\mathbf{K}) = \sqrt{ & \left[-\frac{k_A k_B U_{Ca} + k_A k_C U_{Ba} - 2k_B k_C U_{Aa} + \sqrt{3}k_A k_B U_{Cp} - \sqrt{3}k_A k_C U_{Bp}}{6k_A k_B k_C} \right]^2 + } \\ & + \left[-\frac{\sqrt{3}k_A k_C U_{Ba} - \sqrt{3}k_A k_B U_{Ca} + k_A k_B U_{Cp} + k_A k_C U_{Bp} - 2k_B k_C U_{Ap}}{6k_A k_B k_C} \right]^2 }. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Графік поверхні $U_2(\mathbf{K})|_{k_C=\text{const}}$, $k_C \in \Omega$, що являє собою переріз функції (2.18) наведено рис. 2.6.

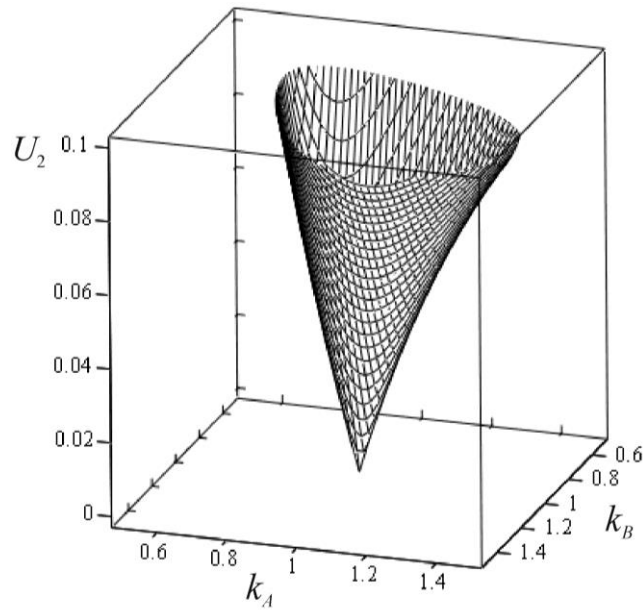


Рис. 2.6. Поверхня $U_2(\mathbf{K})|_{k_C=\text{const}}$ при $k_C \in \Omega$

Проаналізувавши вираз (2.18), можна дійти висновку, що глобальним мінімумом цієї функції $\min U_2(\mathbf{K}) = 0$, і досягається за умов:

$$\begin{cases} k_A k_B U_{Ca} + k_A k_C U_{Ba} - 2k_B k_C U_{Aa} + \sqrt{3}k_A k_B U_{Cp} - \sqrt{3}k_A k_C U_{Bp} = 0; \\ \sqrt{3}k_A k_C U_{Ba} - \sqrt{3}k_A k_B U_{Ca} + k_A k_B U_{Cp} + k_A k_C U_{Bp} - 2k_B k_C U_{Ap} = 0; \\ k_A \neq 0; k_B \neq 0; k_C \neq 0. \end{cases} \quad (2.19)$$

Умову $k_A \neq 0; k_B \neq 0; k_C \neq 0$ можна не брати до уваги, оскільки значення коефіцієнтів трансформації трансформатора, які входять в область Ω , завжди більше 0, тобто виконуються умови $k_A > 0, k_B > 0, k_C > 0$.

Система рівнянь (2.19) – це невизначена система 2-х лінійних рівнянь з 3-ма невідомими k_A, k_B, k_C . Взявши в якості параметру k_C і знайшовши розв’язок цієї системи, матимемо:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_A = \frac{U_{Aa}U_{Ba} - \frac{1}{\sqrt{3}}U_{Ap}U_{Ba} + \frac{1}{\sqrt{3}}U_{Aa}U_{Bp} + U_{Ap}U_{Bp}}{U_{Ba}U_{Ca} - \frac{1}{\sqrt{3}}U_{Bp}U_{Ca} + \frac{1}{\sqrt{3}}U_{Ba}U_{Cp} + U_{Bp}U_{Cp}} k_C = a_1 k_C; \\ k_B = \frac{U_{Aa}U_{Ba} - \frac{1}{\sqrt{3}}U_{Ap}U_{Ba} + \frac{1}{\sqrt{3}}U_{Aa}U_{Bp} + U_{Ap}U_{Bp}}{U_{Aa}U_{Ca} + \frac{1}{\sqrt{3}}U_{Ap}U_{Ca} - \frac{1}{\sqrt{3}}U_{Aa}U_{Cp} + U_{Ap}U_{Cp}} k_C = b_1 k_C. \end{array} \right. \quad (2.20)$$

Вирази (2.20) описують співвідношення між коефіцієнтами трансформації силового трансформатора, за яких $U_2(\mathbf{K})$ досягає глобального мінімуму.

Далі потрібно вирішити питання знаходження мінімуму $U_2(\mathbf{K})$ із врахуванням обмеження $\mathbf{K} \in \Omega$. Найбільш доцільно це зробити скориставшись геометричною інтерпретацією задачі.

Вирази (2.20) – це параметричні рівняння прямої, яка проходить через початок координат. Позначимо цю пряму OE та зобразимо її в декартовій системі координат $k_A Ok_B$ (рис. 2.7).

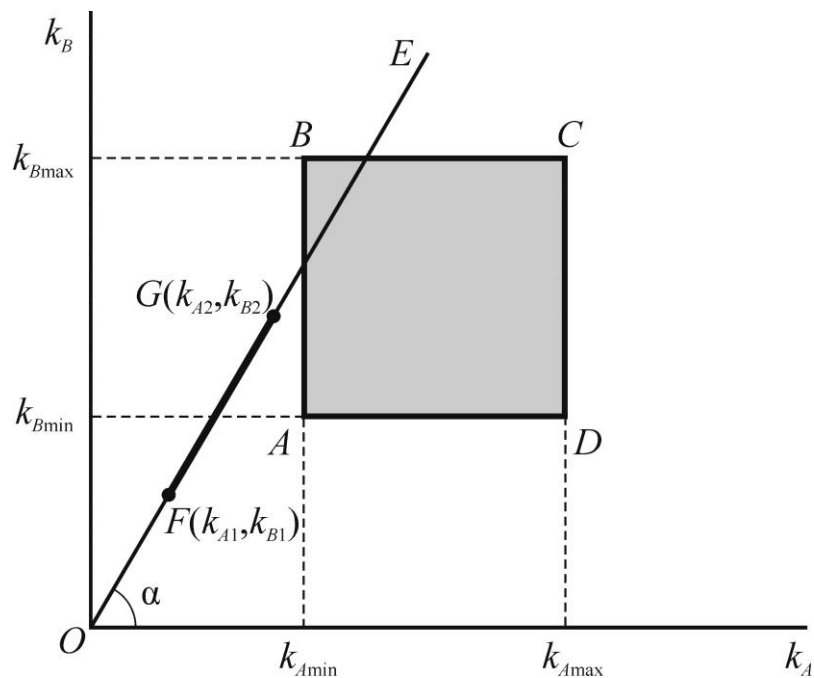


Рис. 2.7. Графічна інтерпретація задачі знаходження мінімуму $U_2(\mathbf{K})$.

Оскільки коефіцієнти трансформації силового трансформатора можуть приймати лише додатні значення, то викликає зацікавленість лише перший квадрант системи координат.

Провівши деякі алгебраїчні перетворення отримуємо кінцевий вираз для визначення координати $U_{2\text{yr}}$ утопічної точки:

$$U_{2\text{yr}} = \left\{ \begin{array}{l} U_2 \left[\Phi_{2A}(k_{B\min}, k_{C\max}), k_{B\min}, k_{C\max} \right], (k_{B2} < k_{B\min}) \wedge \\ \wedge \left\{ [(k_{A2} < k_{A\min}) \wedge (\xi_2 \leq 1)] \vee (k_{A\min} \leq k_{A2} \leq k_{A\max}) \right\}; \\ U_2 \left[\Phi_{2A}(k_{B\max}, k_{C\min}), k_{B\max}, k_{C\min} \right], (k_{B1} > k_{B\max}) \wedge \\ \wedge \left\{ [(k_{A1} > k_{A\max}) \wedge (\xi_2 > 1)] \vee (k_{A\min} \leq k_{A1} \leq k_{A\max}) \right\}; \\ U_2 \left[k_{A\min}, \Phi_{2B}(k_{A\min}, k_{C\max}), k_{C\max} \right], (k_{A2} < k_{A\min}) \wedge \\ \wedge \left\{ [(k_{B2} < k_{B\min}) \wedge (\xi_2 > 1)] \vee (k_{B\min} \leq k_{B2} \leq k_{B\max}) \right\}; \\ U_2 \left[k_{A\max}, \Phi_{2B}(k_{A\max}, k_{C\min}), k_{C\min} \right], (k_{A1} > k_{A\max}) \wedge \\ \wedge \left\{ [(k_{B1} > k_{B\max}) \wedge (\xi_2 \leq 1)] \vee (k_{B\min} \leq k_{B1} \leq k_{B\max}) \right\}; \\ U_2 \left[k_{A\min}, k_{B\max}, \Phi_{2C}(k_{A\min}, k_{B\max}) \right], \left(\xi_2 > \frac{k_{B\max}}{k_{A\min}} \right) \wedge \\ \wedge \neg [(k_{B2} < k_{B\max}) \vee (k_{A1} > k_{A\min})]; \\ U_2 \left[k_{A\max}, k_{B\min}, \Phi_{2C}(k_{A\max}, k_{B\min}) \right], \left(\xi_2 < \frac{k_{B\min}}{k_{A\max}} \right) \wedge \\ \wedge \neg [(k_{A2} < k_{A\max}) \vee (k_{B1} > k_{B\min})]; \\ 0, \left(\frac{k_{B\min}}{k_{A\max}} \leq \xi_2 \leq \frac{k_{B\max}}{k_{A\min}} \right) \wedge \neg \{ [(k_{A2} < k_{A\min}) \wedge (k_{B2} < k_{B\max})] \vee \\ \vee [(k_{A1} > k_{A\min}) \wedge (k_{B1} > k_{B\max})] \vee [(k_{A2} < k_{A\max}) \wedge (k_{B2} < k_{B\min})] \vee \\ \vee [(k_{A1} > k_{A\max}) \wedge (k_{B1} > k_{B\min})] \}, \end{array} \right. \quad (2.21)$$

де

$$\Phi_{2A}(k_B, k_C) = \frac{2k_B k_C \times}{k_B U_{Aa} U_{Ca} + k_C U_{Aa} U_{Ba} + \sqrt{3} k_B U_{Aa} U_{Cp} - \sqrt{3} k_B U_{Ca} U_{Ap} - \times (U_{Aa}^2 + U_{Ap}^2)} \frac{-\sqrt{3} k_C U_{Aa} U_{Bp} + \sqrt{3} k_C U_{Ba} U_{Ap} + k_B U_{Ap} U_{Cp} + k_C U_{Ap} U_{Bp}}{;}; \quad (2.22)$$

$$\Phi_{2B}(k_A, k_C) = \frac{2k_A k_C \times}{k_A U_{Ba} U_{Ca} + k_C U_{Aa} U_{Ba} - \sqrt{3} k_A U_{Ba} U_{Cp} + \sqrt{3} k_A U_{Ca} U_{Bp} - \times (U_{Ba}^2 + U_{Bp}^2)} \frac{-\sqrt{3} k_C U_{Aa} U_{Bp} + \sqrt{3} k_C U_{Ba} U_{Ap} + k_A U_{Bp} U_{Cp} + k_C U_{Ap} U_{Bp}}{;}; \quad (2.23)$$

$$\Phi_{2C}(k_A, k_B) = \frac{2k_A k_B \times}{k_A U_{Ba} U_{Ca} + k_B U_{Aa} U_{Ca} - \sqrt{3} k_A U_{Ba} U_{Cp} + \sqrt{3} k_A U_{Ca} U_{Bp} + \times (U_{Ca}^2 + U_{Cp}^2)} \frac{+\sqrt{3} k_B U_{Aa} U_{Cp} - \sqrt{3} k_B U_{Ca} U_{Ap} + k_A U_{Bp} U_{Cp} + k_B U_{Ap} U_{Cp}}{;}; \quad (2.24)$$

є коренями рівнянь $\frac{\partial U_2(\mathbf{K})}{\partial k_A} = 0, \frac{\partial U_2(\mathbf{K})}{\partial k_B} = 0, \frac{\partial U_2(\mathbf{K})}{\partial k_C} = 0$;

ξ_2 – кутовий коефіцієнт прямої OE :

$$\xi_2 = \operatorname{tg} \alpha = \frac{b_1}{a_1} = \frac{U_{Ba} U_{Ca} - \frac{1}{\sqrt{3}} U_{Bp} U_{Ca} + \frac{1}{\sqrt{3}} U_{Ba} U_{Cp} + U_{Bp} U_{Cp}}{U_{Aa} U_{Ca} + \frac{1}{\sqrt{3}} U_{Ap} U_{Ca} - \frac{1}{\sqrt{3}} U_{Aa} U_{Cp} + U_{Ap} U_{Cp}}. \quad (2.25)$$

Для найкращого забезпечення нормативних документів $\Delta U_{1\text{нд}}$ і $U_{2\text{нд}}$ в основу методу визначення кінцевого розв'язку задачі (2.5) покладено такі міркування:

1. Для випадку, за якого множина ефективних розв'язків $\{Q_{ef}\}$ і множина нормально допустимих значень $\{Q_{нд}\} = \{\Delta U_{1нд}, U_{2нд}\}$ перетинаються $\{Q_{ef}\} \cap \{Q_{нд}\} \neq \emptyset$, кінцевий розв'язок необхідно шукати у вигляді мінімаксного наближення до утопічної точки при значеннях вагових коефіцієнтів:

$$\mu_i = \frac{\alpha_i}{\sum_{i=1}^m \alpha_i}, \quad (2.26)$$

де α – коефіцієнт, який розраховується за формулою:

$$\alpha_i = \frac{\beta_i}{\beta_i - Q_{yui}}, \quad (2.27)$$

де $\beta = \{\Delta U_{1нд}, U_{2нд}\}$ – множина нормально допустимих значень ПЯЕ.

Такий підхід дозволить обирати із множини ефективних розв'язків $\{Q_{ef}\}$ той, що завжди буде належати множині $\{Q_{нд}\}$ та забезпечувати близьке до бажаного співвідношення критеріїв у точці оптимуму..

Геометричною інтерпретацією розв'язку цієї задачі (рис. 2.8) є точка Q^{opt1} , яка лежить на перетині X_1Y_1 і променя, який виходить із Q_{yul} і проходить через точку $Q^{нд}(\Delta U_{1нд}, U_{2нд})$.

2. Для випадку, за якого $\{Q_{ef}\} \cap \{Q_{нд}\} = \emptyset$, з множини ефективних розв'язків необхідно обирати той розв'язок, який має мінімальну евклідову відстань до множини $\{Q_{нд}\}$. Такий підхід дозволить забезпечити мінімальні відхилення критеріїв оптимізації від множини $\{Q_{нд}\}$ в точці оптимуму.

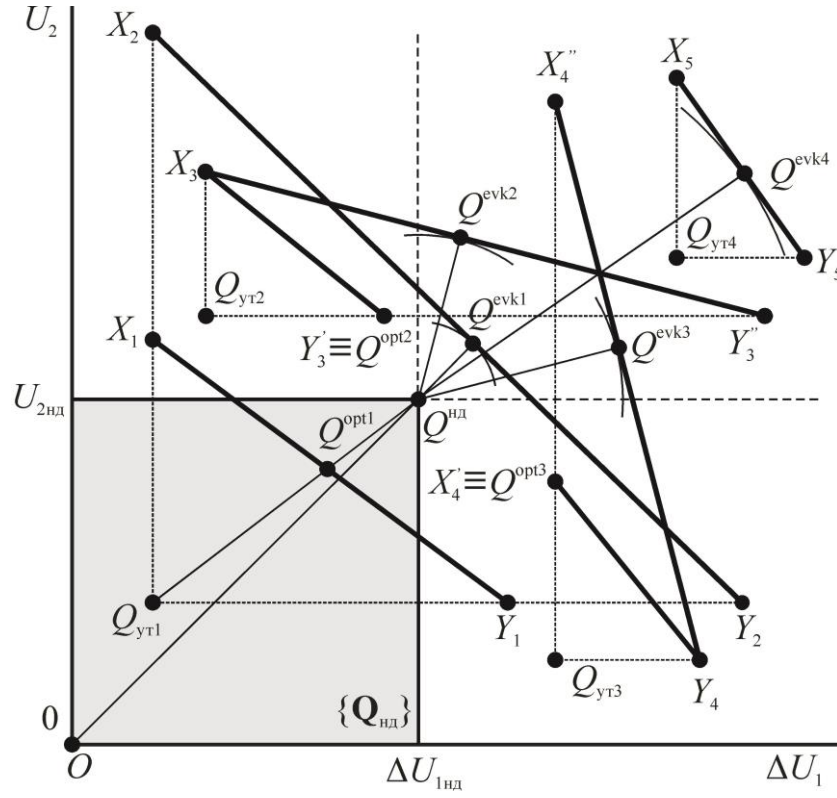


Рис. 2.8. Геометрична інтерпретація визначення кінцевого розв'язку задачі (2.5)

Описаний алгоритм визначення кінцевого розв'язку задачі (2.5) має вигляд:

$$\mathbf{K}^{\text{opt}} = \begin{cases} \mathbf{K}^{\text{opt1}}, (\Delta U_{1\text{ут}} \leq \Delta U_{1\text{нд}}) \wedge (U_{2\text{ут}} \leq U_{2\text{нд}}) \wedge \\ \wedge (\Delta U_{1\text{опт1}} \leq \Delta U_{1\text{нд}}) \wedge (U_{2\text{опт1}} \leq U_{2\text{нд}}); \\ \mathbf{K}^{\text{opt2}}, (\Delta U_{1\text{ут}} \leq \Delta U_{1\text{нд}}) \wedge (U_{2\text{ут}} > U_{2\text{нд}}) \wedge (\Delta U_{1\text{опт2}} \leq \Delta U_{1\text{нд}}); \\ \mathbf{K}^{\text{opt3}}, (\Delta U_{1\text{ут}} > \Delta U_{1\text{нд}}) \wedge (U_{2\text{ут}} \leq U_{2\text{нд}}) \wedge (U_{2\text{опт3}} \leq U_{2\text{нд}}); \\ \mathbf{K}^{\text{evk}}, [(\Delta U_{1\text{ут}} \leq \Delta U_{1\text{нд}}) \wedge (U_{2\text{ут}} \leq U_{2\text{нд}}) \wedge (\Delta U_{1\text{опт1}} > \Delta U_{1\text{нд}}) \wedge \\ \wedge (U_{2\text{опт1}} > U_{2\text{нд}})] \vee [(\Delta U_{1\text{ут}} \leq \Delta U_{1\text{нд}}) \wedge (U_{2\text{ут}} > U_{2\text{нд}}) \wedge \\ \wedge (\Delta U_{1\text{опт2}} > \Delta U_{1\text{нд}})] \vee [(\Delta U_{1\text{ут}} > \Delta U_{1\text{нд}}) \wedge (U_{2\text{ут}} \leq U_{2\text{нд}}) \wedge \\ \wedge (U_{2\text{опт3}} > U_{2\text{нд}})] \vee [(\Delta U_{1\text{ут}} > \Delta U_{1\text{нд}}) \wedge (U_{2\text{ут}} > U_{2\text{нд}})]. \end{cases} \quad (2.28)$$

де $\mathbf{K}^{\text{opt}}$ – розв'язок задачі (2.5);

$\mathbf{K}^{optj}$ визначається шляхом вирішення задачі:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max \left\{ \mu_1^{(j)} \left| \frac{\Delta U_1(\mathbf{K}) - \Delta U_{1yt}}{\Delta U_{1нд}} \right|, \mu_2^{(j)} \left| \frac{U_2(\mathbf{K}) - U_{2yt}}{U_{2нд}} \right| \right\} \rightarrow \min; \\ \mathbf{K} \in \Omega, \end{array} \right. \quad (2.29)$$

при $j=1: \mu_1^{(1)} = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2}; \mu_2^{(1)} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2};$

$j=2: \mu_1^{(2)} = 0; \mu_2^{(2)} = 1;$

$j=3: \mu_1^{(3)} = 1; \mu_2^{(3)} = 0;$

де $\alpha_2 = \left| \frac{U_{2нд}}{U_{2нд} - U_{2yt}} \right|;$

$Q^{opti}(\Delta U_1^{opti}, U_2^{opti})$ – це точка, координатами якої є значення $\Delta U_1(\mathbf{K})$

та $U_2(\mathbf{K})$ а точці $\mathbf{K}^{opti}$;

$\mathbf{K}^{evk}$ – визначається шляхом вирішення задачі:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\left(\frac{\Delta U_1(\mathbf{K}) - \Delta U_{1yt}}{\Delta U_{1нд}} \right)^2 + \left(\frac{U_2(\mathbf{K}) - U_{2yt}}{U_{2нд}} \right)^2} \rightarrow \min; \\ \mathbf{K} \in \Omega. \end{array} \right. \quad (2.30)$$

Висновки до розділу

1. Формалізація задачі керування безконтактним РПН силового трансформатора показала, що ця задача приводиться до задачі багатокритеріальної оптимізації.

2. Проведений аналіз залежностей між напругами і струмами на стороні високої та низької напруги трансформатора дав змогу визначити кількість і вигляд критеріальних виразів для задачі багатокритеріальної оптимізації.

3. В результаті проведеного обґрунтування методу розв'язку задачі автоматичного керування безконтактним РПН силових трансформаторів у вигляді задачі багатокритеріальної оптимізації встановлено, що найдоцільнішим методом розв'язання цієї задачі є метод наближення до утопічної точки.

4. Отримані в результаті вирішення задачі автоматичного керування співвідношення дають змогу розробити на їх основі структурну схему та алгоритм роботи САК безконтактним пристроєм РПН трансформатора, реалізація яких дасть змогу забезпечити одночасне зниження рівнів несиметрії і відхилення напруги в електричних мережах.

РОЗДІЛ 3

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЄМ РПН СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Підтвердження правильності отриманих результатів теоретичних досліджень і висновків а також визначення ефекту від їх використання може бути отримане комп'ютерним моделюванням.

Для створення математичних моделей САК пристроєм РПН трансформатора було застосовано сучасний пакет прикладних програм для наукових розрахунків – Matlab.

Для визначення ефекту від використання розв'язку задачі автоматичного керування (2.5) необхідно отримати реальні результати автоматичного керування. Цього можна досягти шляхом використання в якості вихідних даних результати вимірювань параметрів режиму РЕМ. В якості вихідних даних було використано результати експериментальних вимірювань параметрів режиму РЕМ ПрАТ «Кіровоградобленерго», отриманих з допомогою аналізатора мережі FLUKE 1744.

3.1 Структурна схема САК і алгоритми розрахунку вектора оптимального керування

Для реалізації зустрічного регулювання напруги в формулі (2.5) потрібно замість $U_{\text{ном}}$ використовувати значення напруги $U_{\text{нн}}$ із врахуванням струмової компенсації: підтримувати значення напруги на стороні низької напруги вищим за номінальне значення на величину $k_{\text{с-нн}} I_{\text{л}} (R_{\text{л}} + jX_{\text{л}})$. Для спрощення здійснення аналізу була проведена розробка структурної схеми і алгоритму розрахунку вектора автоматичного

керування без врахування зустрічного регулювання, що несуттєво вплинуло на результати.

Узагальнена структурна схема САК пристроєм РПН трансформатора наведена на рис. 3.1.

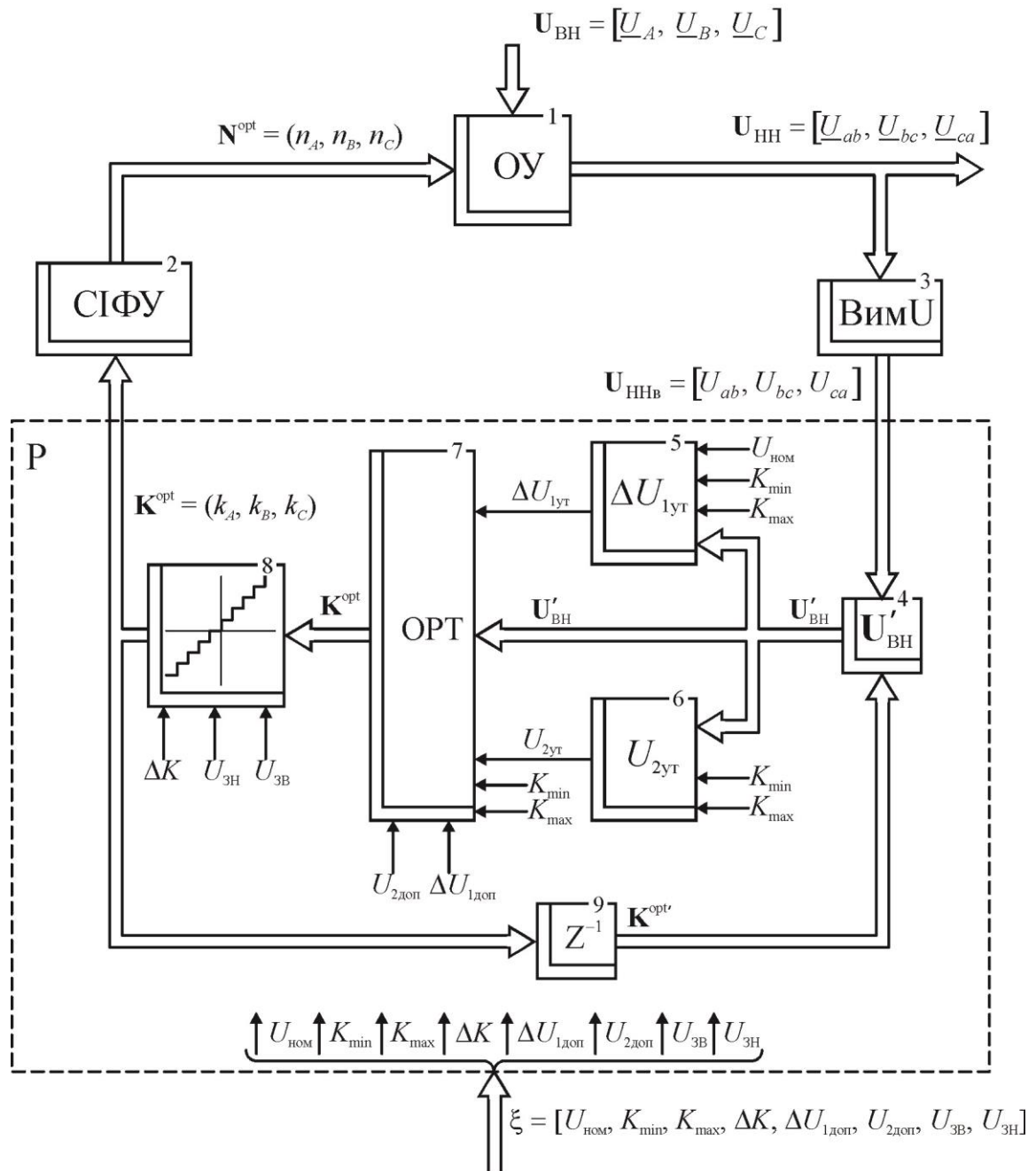


Рис. 3.1. Структурна схема САК пристроєм РПН силового трансформатора

На рис. 3.1:

$\mathbf{U}_{\text{ВН}} = [\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C]$ – вектор комплексних значень фазних напруг на стороні ВН трансформатора;

$\mathbf{U}_{\text{НН}} = [\underline{U}_{ab}, \underline{U}_{bc}, \underline{U}_{ca}]$ – вектор комплексних значень лінійних напруг на стороні НН трансформатора;

$\mathbf{U}_{\text{ННв}} = [U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}]$ – вектор вимірних значень лінійних напруг на стороні НН трансформатора;

$\xi = [U_{\text{ном}}, K_{\text{min}}, K_{\text{max}}, \Delta K, U_{\text{ЗВ}}, U_{\text{ЗН}}, \Delta U_{1\text{доп}}, U_{2\text{доп}}]$ – вектор задаючих параметрів;

$\Delta U_{1\text{доп}}, U_{2\text{доп}}$ – величини нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги і напруги зворотної послідовності;

$\mathbf{K}^{\text{opt}} = (k_A, k_B, k_C)$ – оптимальний вектор керування;

$\mathbf{N}^{\text{opt}} = (n_A, n_B, n_C)$ – вектор номерів відгалужень обмотки ВН трансформатора, що відповідають $\mathbf{K}^{\text{opt}}$;

$\mathbf{K}^{\text{opt}'} - \mathbf{K}^{\text{opt}}$, прийнятий на попередньому кроці розрахунків;

1 – силовий трансформатор;

2 – система імпульсно-фазового керування напівпровідниковими ключами;

3 – вимірювальний перетворювач трьохфазної напруги (трансформатор напруги);

4 – блок розрахунку вектору $\mathbf{U}'_{\text{ВН}} = [\underline{U}'_A, \underline{U}'_B, \underline{U}'_C]$;

5 – блок розрахунку $\Delta U_{1\text{ут}}$;

6 – блок розрахунку $U_{2\text{ут}}$;

7 – блок розрахунку оптимального вектору керування $\mathbf{K}^{\text{opt}}$;

8 – блок дискретизації;

9 – блок транспортної затримки.

Вимірювання напруги значно простіше проводити на стороні НН трансформатора. При цьому величини $\underline{U}'_A, \underline{U}'_B, \underline{U}'_C$ визначаються згідно формул (2.2) для кожного кроку регулювання. Значення аргументів комплексів $\underline{U}_{ab} = U_{ab}e^{j\varphi_{ab}}, \underline{U}_{bc} = U_{bc}e^{j\varphi_{bc}}, \underline{U}_{ca} = U_{ca}e^{j\varphi_{ca}}$, які входять до (2.2), можна визначити із трикутника лінійних напруг. При $\varphi_{ab} = 0$ маємо:

$$\begin{cases} \varphi_{bc} = \pi - \arccos \frac{U_{ab}^2 + U_{bc}^2 - U_{ca}^2}{2U_{ab}U_{bc}}; \\ \varphi_{ca} = \arccos \frac{U_{ab}^2 + U_{ca}^2 - U_{bc}^2}{2U_{ab}U_{ca}} - \pi. \end{cases} \quad (3.1)$$

На рис. 3.2 наведена блок-схема алгоритму розрахунку $\mathbf{K}^{\text{opt}}$.

На рисунку 3.2:

3 – процедура визначення $\underline{U}'_A, \underline{U}'_B, \underline{U}'_C$;

4 – процедура визначення $\Delta U_{1\text{т}}$;

5 – процедура визначення $U_{2\text{т}}$;

6 – процедура розрахунку оптимального вектору керування $\mathbf{K}^{\text{opt}}$.

На рис. 3.3 показана блок-схема алгоритму роботи процедури визначення $\Delta U_{1\text{т}}$

На рис. 3.3: 3 – процедура визначення $\Delta U_1(\mathbf{K}_{\min}), \Delta U_1(\mathbf{K}_{\max})$.

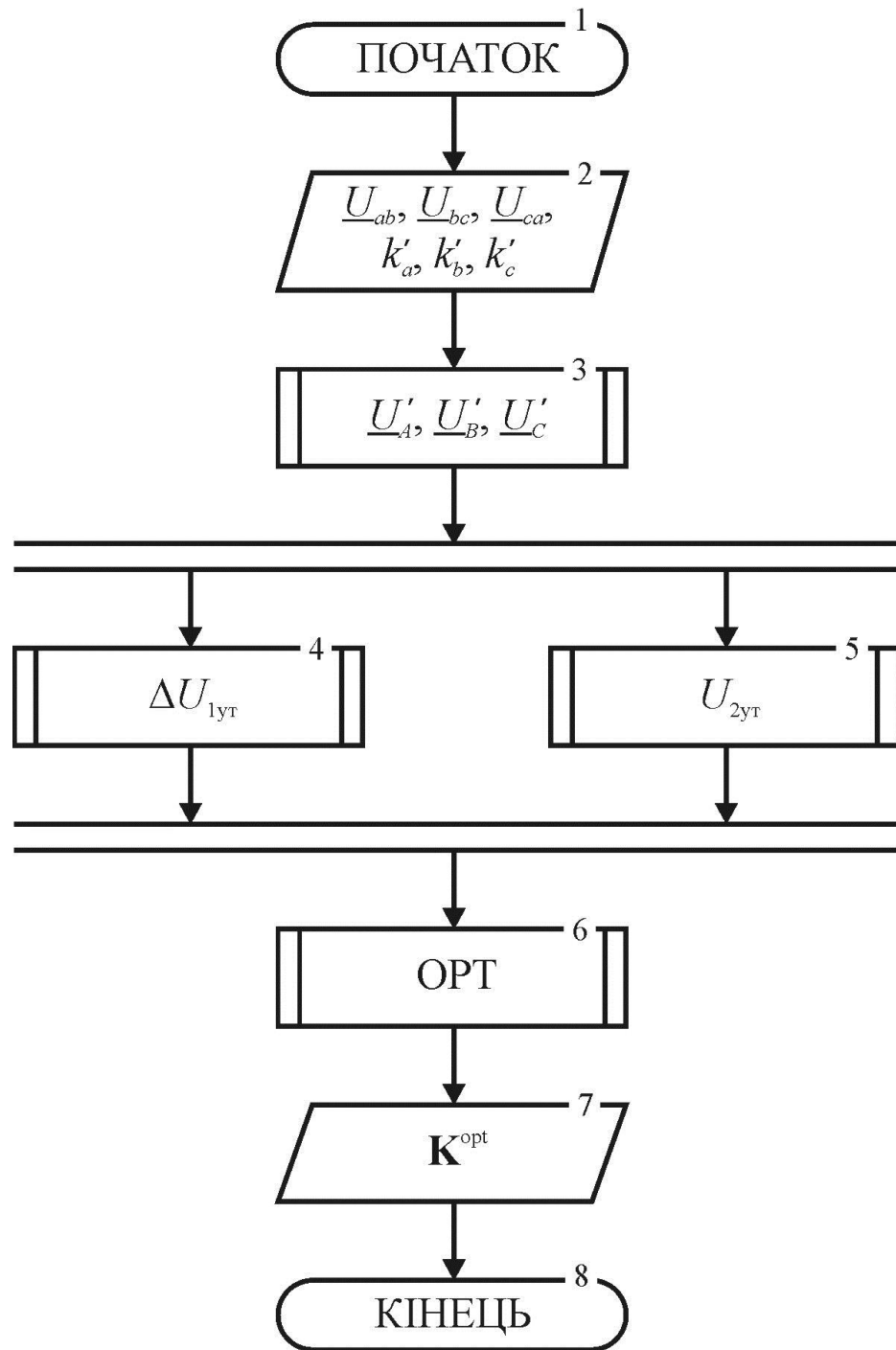
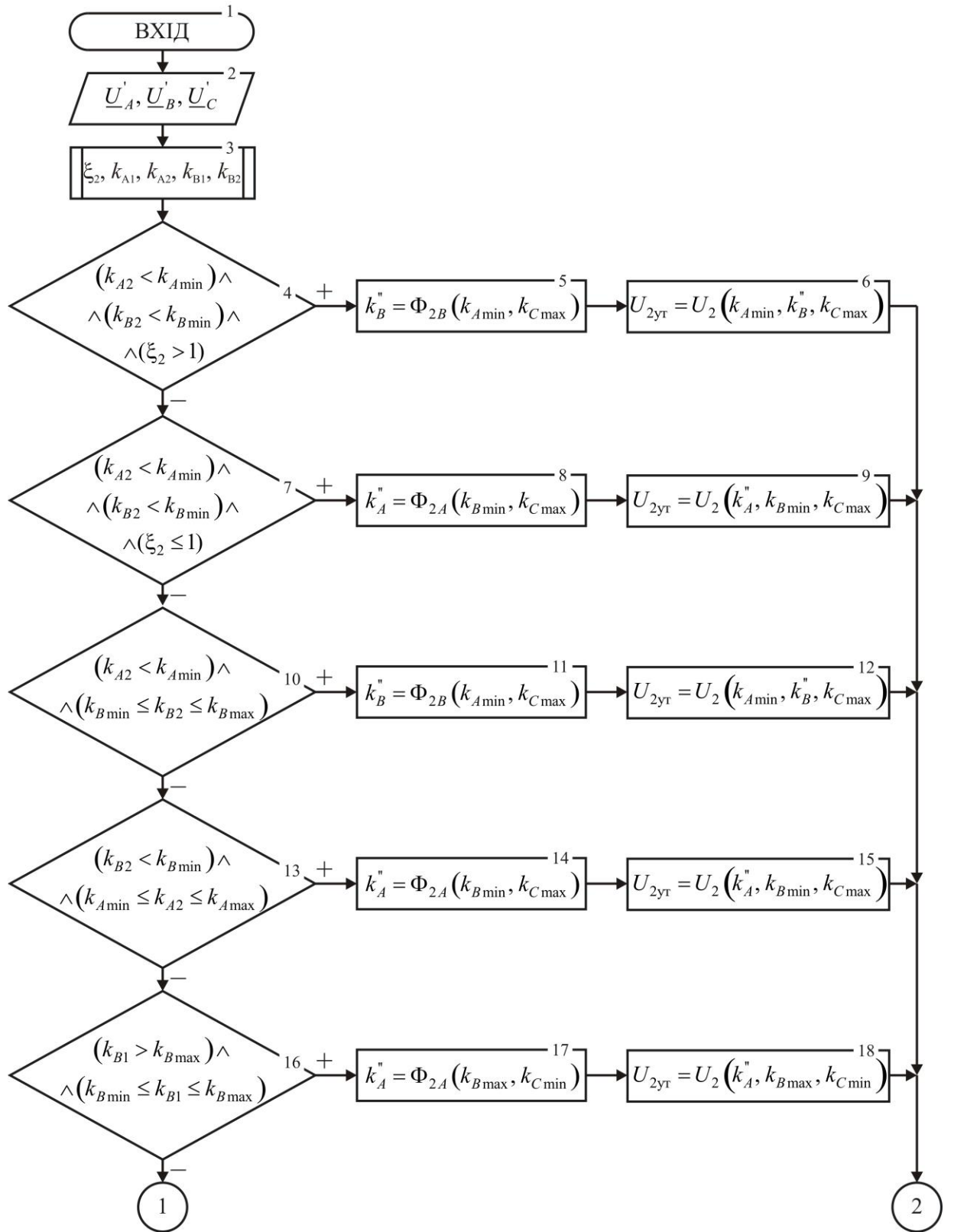


Рис. 3.2. Блок-схема алгоритму розрахунку K^{opt}

Рис. 3.4. Блок-схема алгоритму розрахунку U_{2yr}

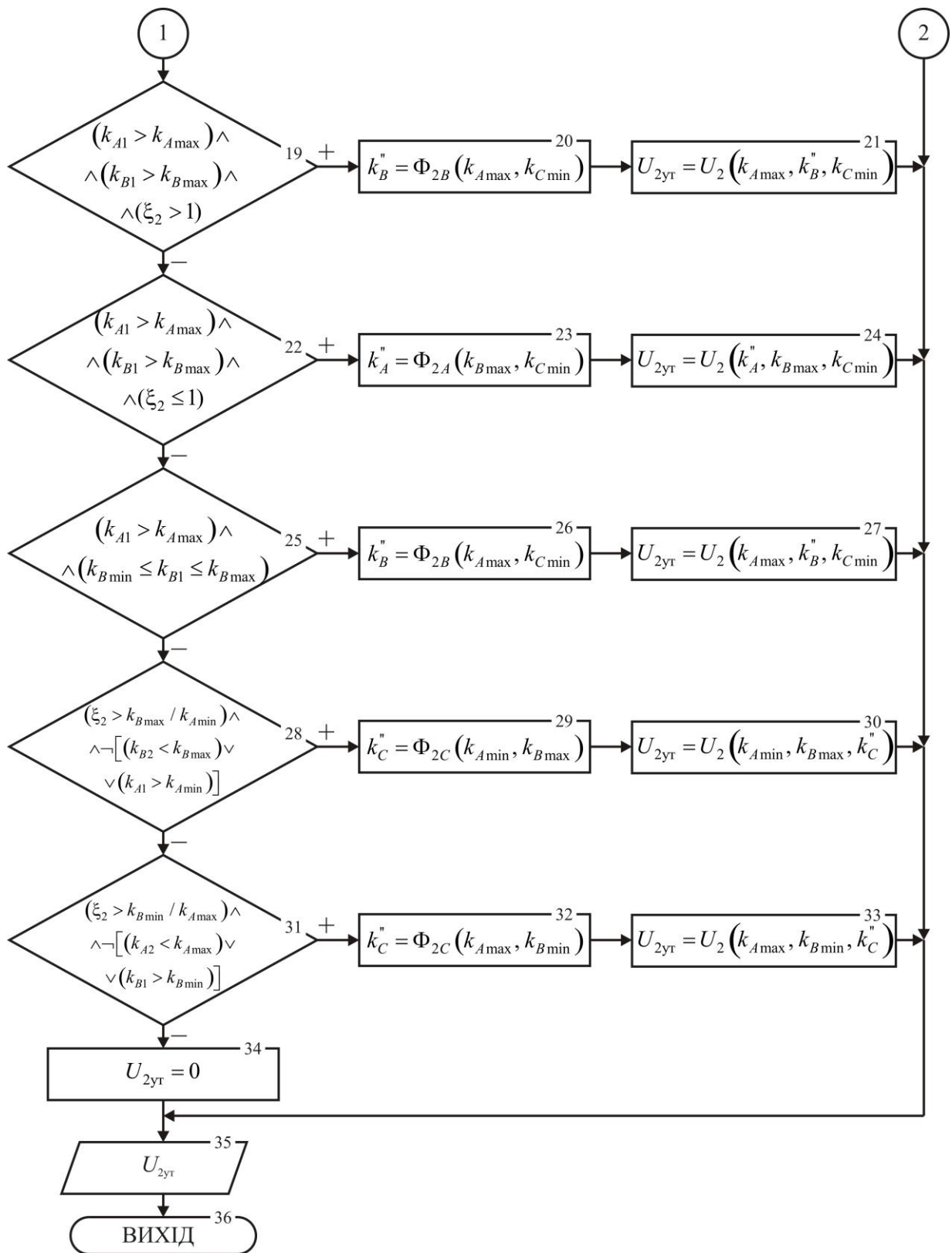
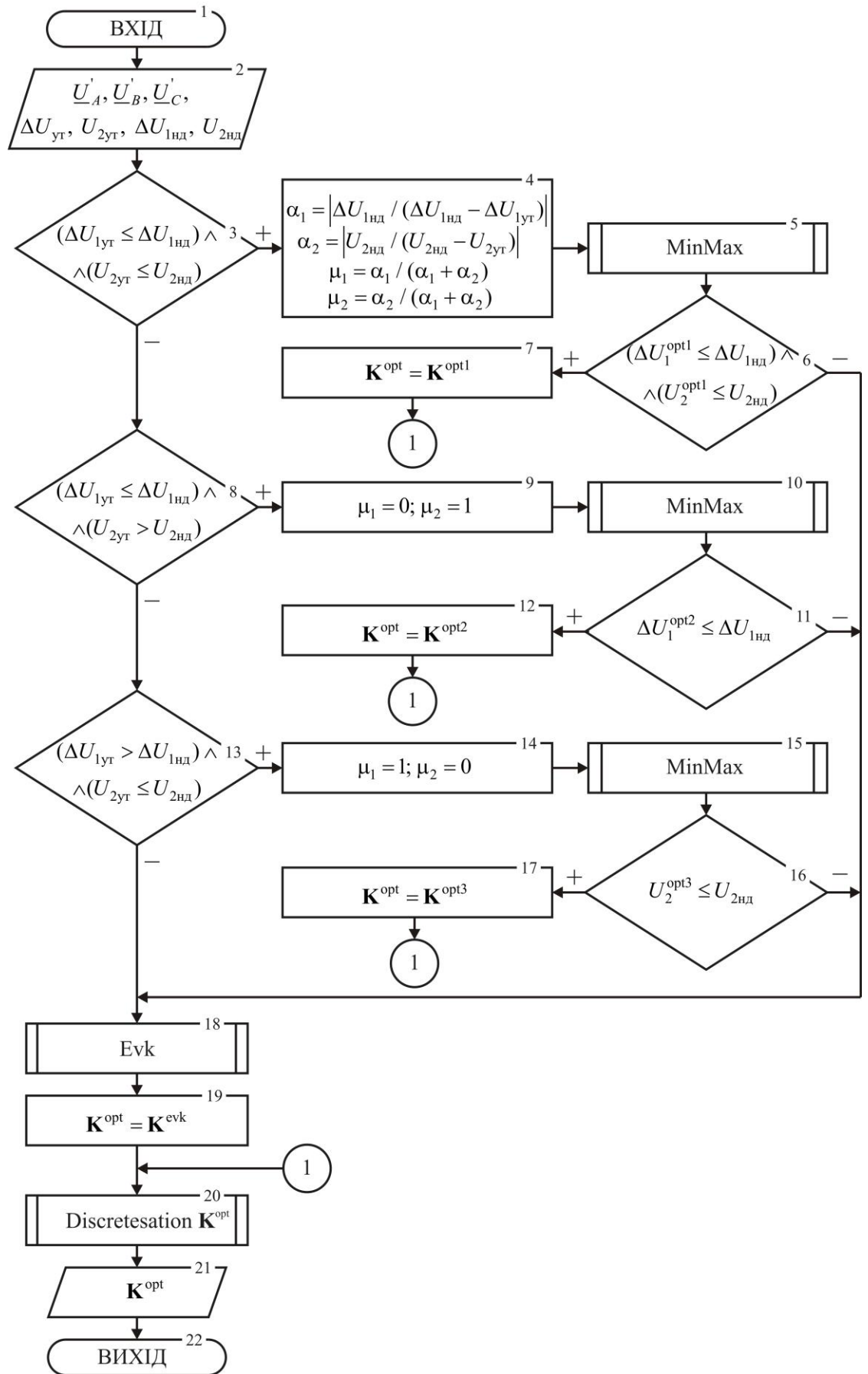


Рис. 3.5. Блок-схема алгоритму розрахунку U_{2yr} (продовження)

На рис. 3.6 показано алгоритм роботи процедури розрахунку $\mathbf{K}^{\text{opt}}$.

Рис. 3.6. Блок-схема алгоритму розрахунку K^{opt}

3.2 Комп'ютерна модель САК пристроєм РПН силового трансформатора

Модель САК пристроєм РПН трансформатора представлена на рис. 3.7

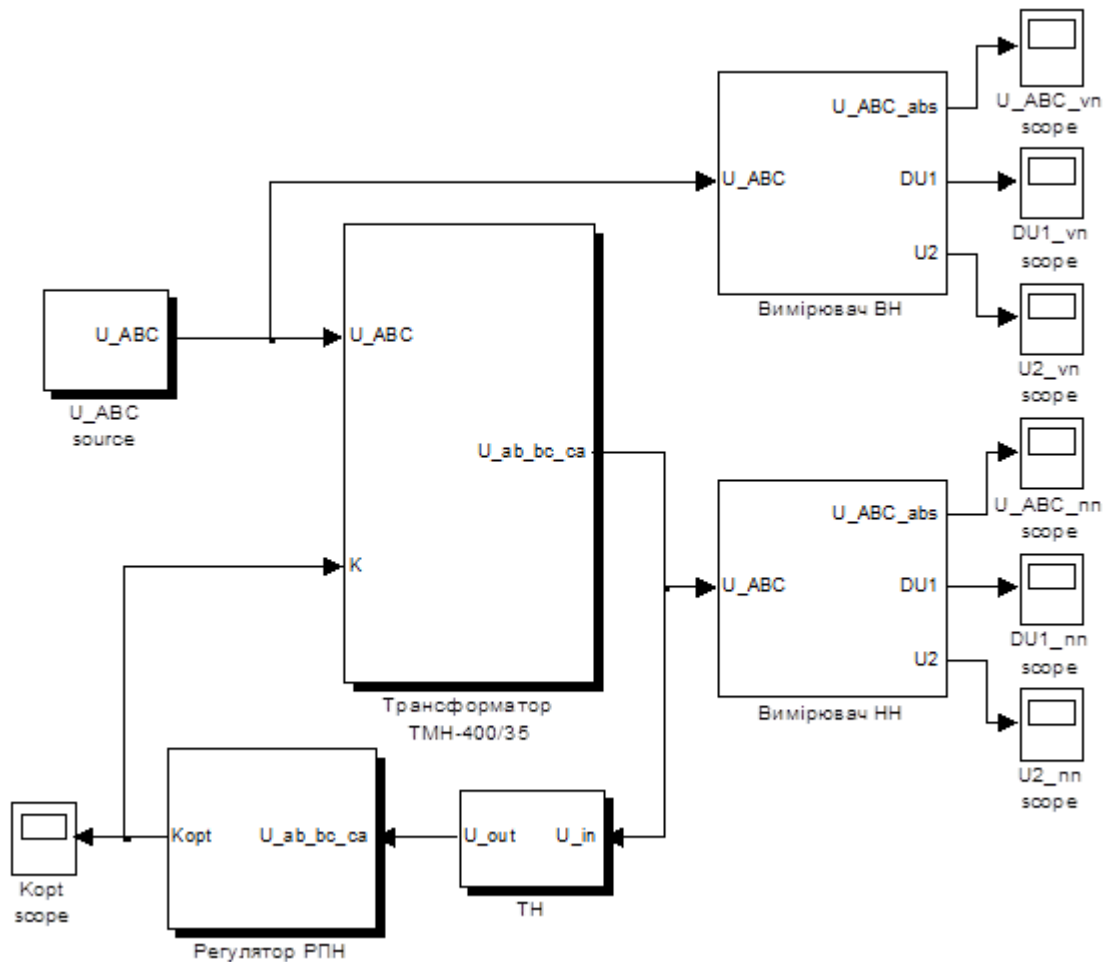


Рис. 3.7. Загальна модель САК пристроєм РПН трансформатора

Загальна модель САК складається з таких елементів:

- «U_ABC_source» – блок задання вихідних даних моделі;
- «Трансформатор ТМН-400/35» – модель трансформатора ТМН-400/35;
- «Вимірювач ВН» – вимірювач ПЯЕ на стороні ВН трансформатора;
- «Вимірювач НН» – вимірювач ПЯЕ на стороні НН трансформатора;

- «ТН» –трансформатор напруги;
- «Регулятор РПН» – модель регулятора РПН.

На рис. 3.7 приведена аодель блоку вихідних даних

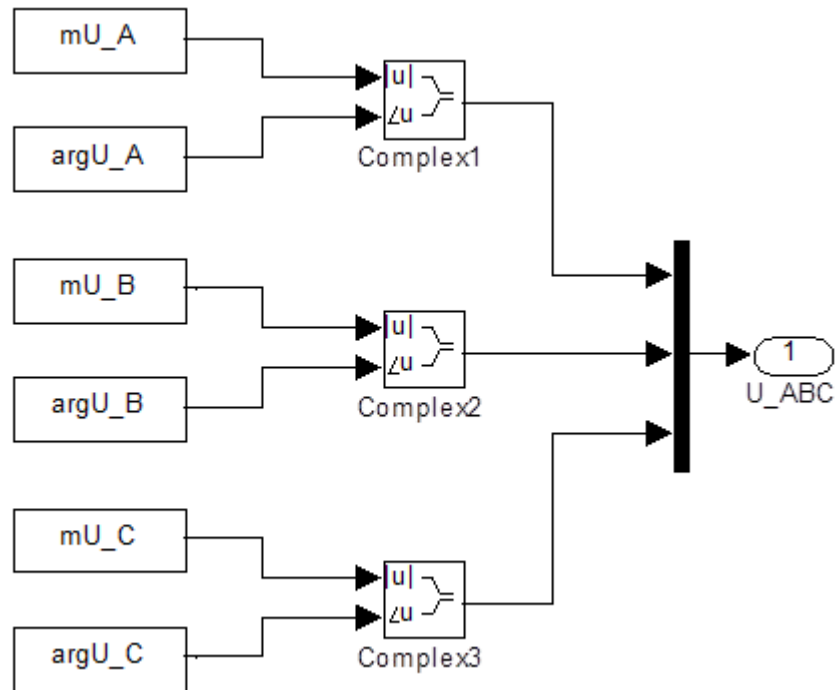


Рис. 3.7. Модель блоку вихідних даних

Модель блоку вихідних даних містить такі елементи:

- mU_A, mU_B, mU_C – блоки зчитування значень модулів комплексів напруг з текстових файлів;
- argU_A, argU_B, argU_C – блоки зчитування аргументів комплексів напруг з текстових файлів;
- «Complex1», «Complex2», «Complex3» – блоки формування комплексів по заданим модулям та аргументам.

На рис. 3.8 зображена модель блоку силового трансформатора «Трансформатор ТМН-400/35»

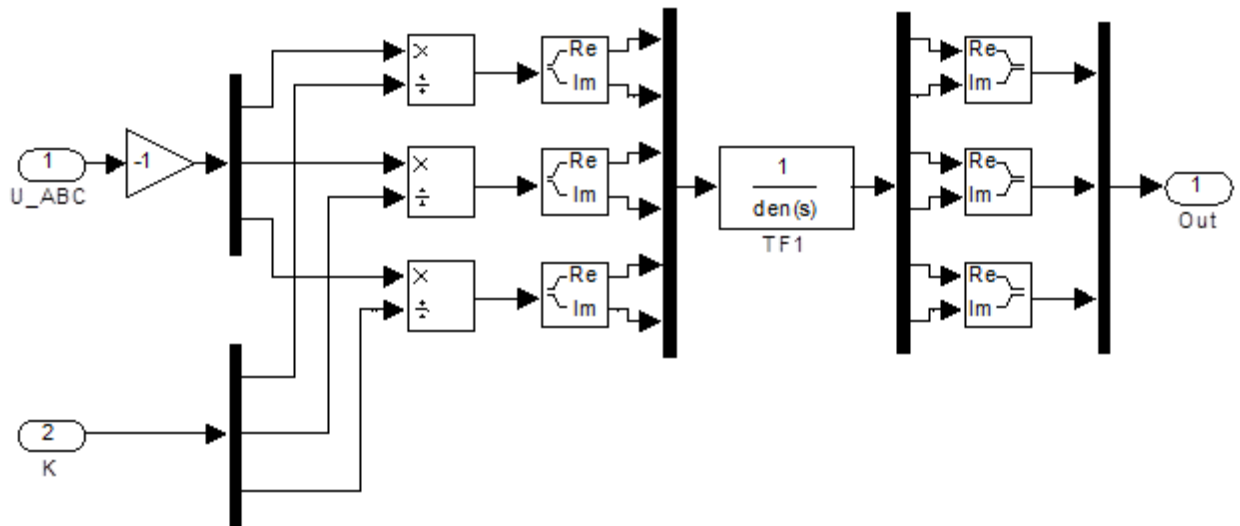


Рис. 3.8. Модель «Трансформатор ТМН-400/35»

В цьому блоці реалізуються вирази (2.2), які описують взаємозв'язок між напругами силового трансформатора на сторонах ВН та НН.

Модель блоку «Вимірювач ВН» наведена на рис. 3.9.

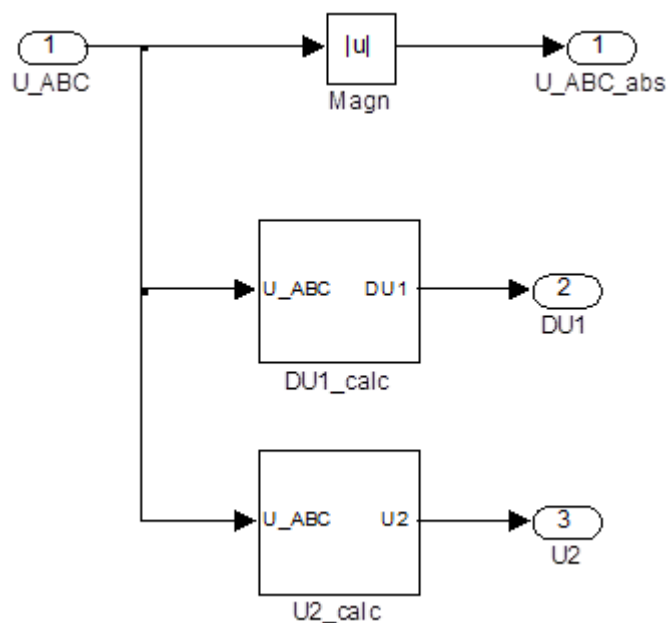


Рис. 3.9. Модель блоку «Вимірювач ВН»

Блок «Вимірювач ВН» призначений для здійснення вимірювань діючих значень напруг, значень несиметрії і усталеного відхилення напруг. Модель блоку «DU1_calc» показана на рис. 3.10.

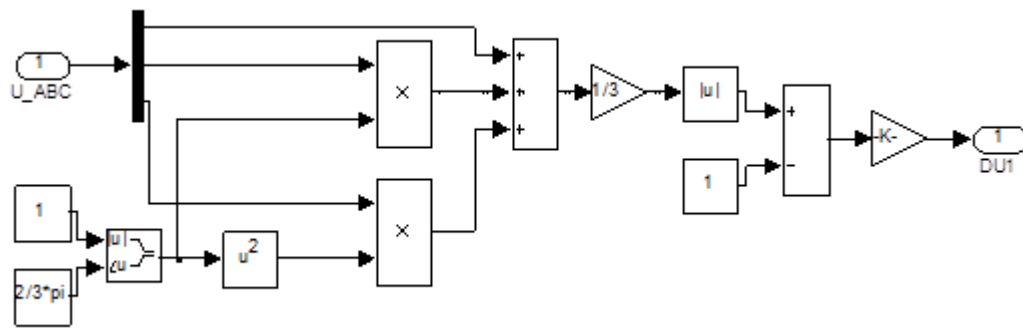


Рис. 3.10. Модель блоку «DU1_calc»

В блоці «DU1_calc» реалізуються вирази (2.2) для розрахунку напруги прямої послідовності.

На рис. 3.11 приведена модель блоку «U2_calc».

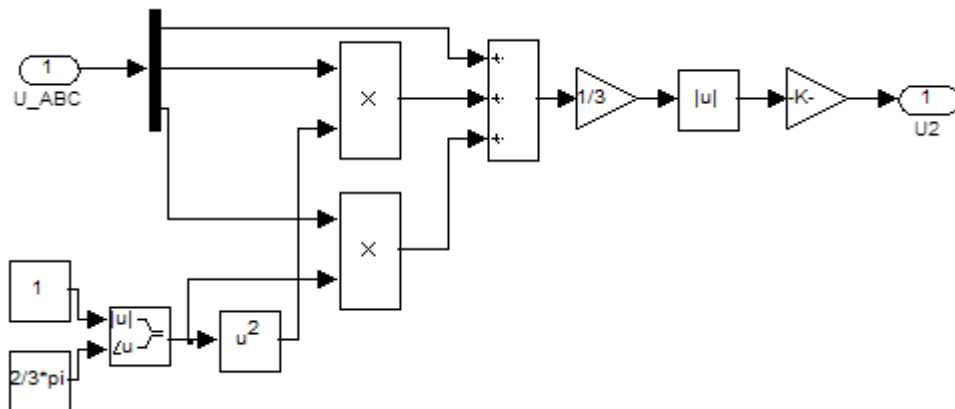


Рис. 3.11. Модель блоку «U2_calc»

В блоці «DU1_calc» реалізуються рівняння (2.3) для розрахунку напруги зворотної послідовності.

В основу роботи блоку «Регулятор РПН», яка зображена на рис. 3.12, покладено розроблений алгоритм визначення вектора керування пристроєм РПН трансформатора.

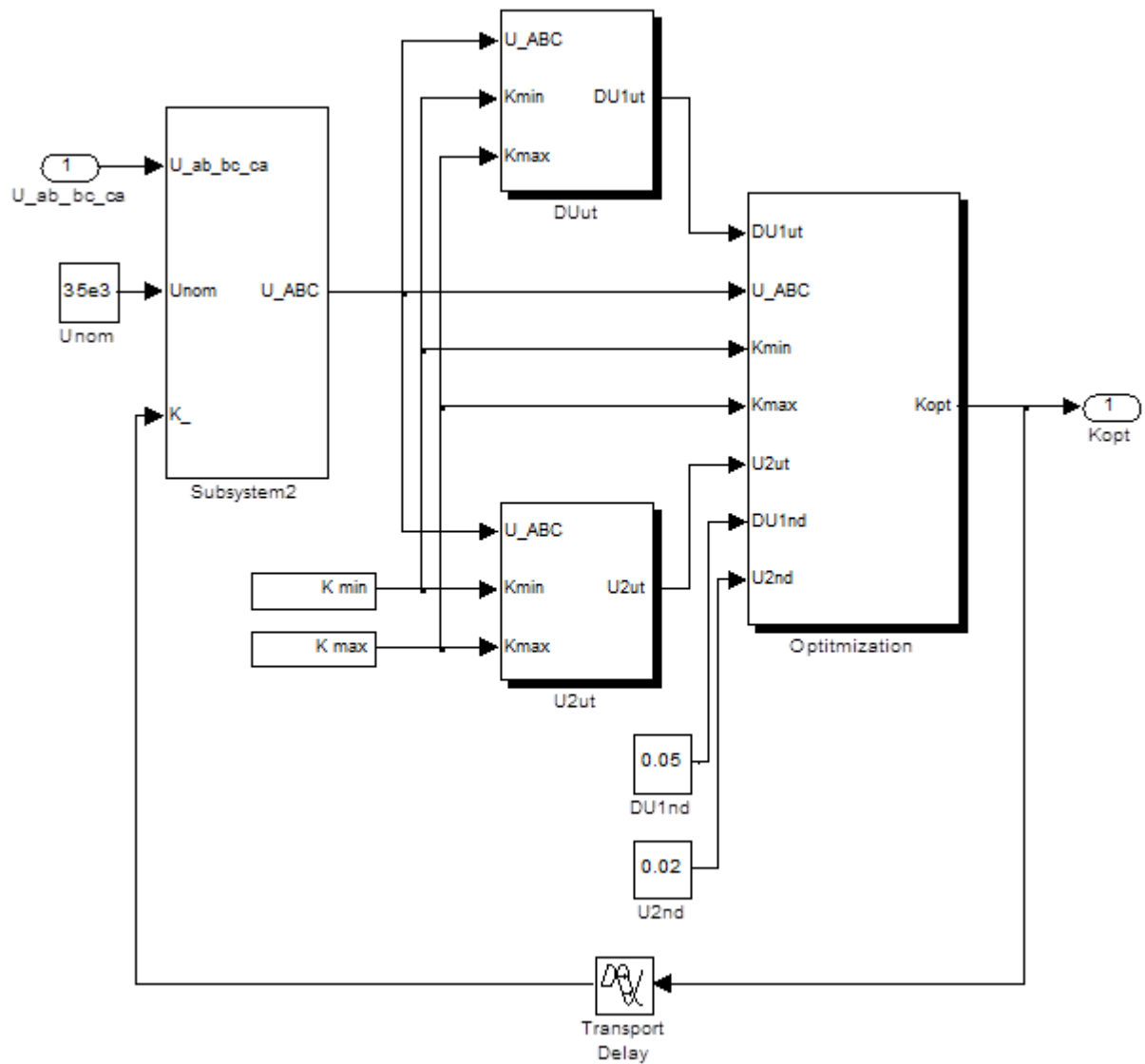


Рис. 3.12. Модель блоку «Регулятор РПН»

Модель блоку «Регулятор РПН» містить такі блоки:

- «Subsystem2» (рис. 3.13) – блок визначення комплексів напруг на стороні ВН трансформатора за відомими значеннями комплексів напруг на стороні НН.

- «DUut» (рис. 3.14) – блок визначення координати утопічної точки $\Delta U_{1\text{ут}}$.

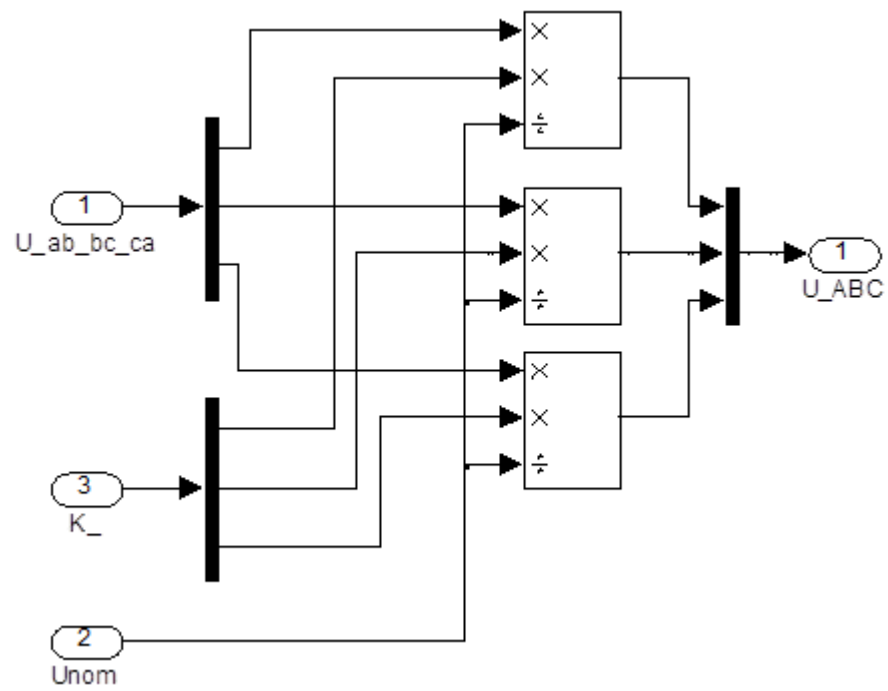


Рис. 3.13. Модель блока «Subsystem2»

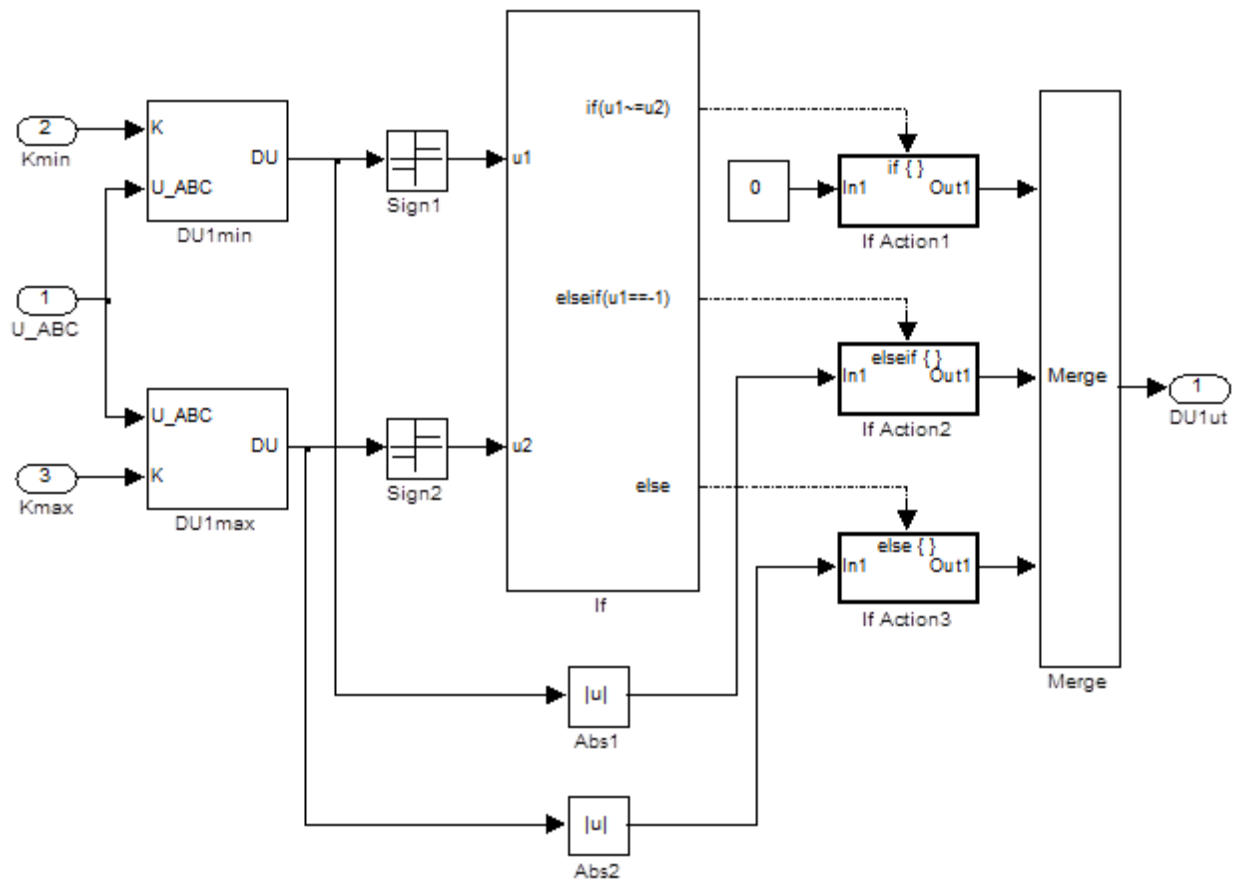


Рис. 3.14. Модель блока «DUut»

- «U2ut» (рис. 3.15) – блок розрахунку U_{2yt} .
- «Kmin», «Kmax» – блоки, що задають діапазон регулювання коефіцієнта трансформації трансформатора;
- «DU1nd», «U2nd» – блоки, що задають нормально допустимі значення несиметрії і усталеного відхилення напруги;
- «Optimisation» (рис. 3.16) – блок розрахунку кінцевого розв'язку задачі (2.5).

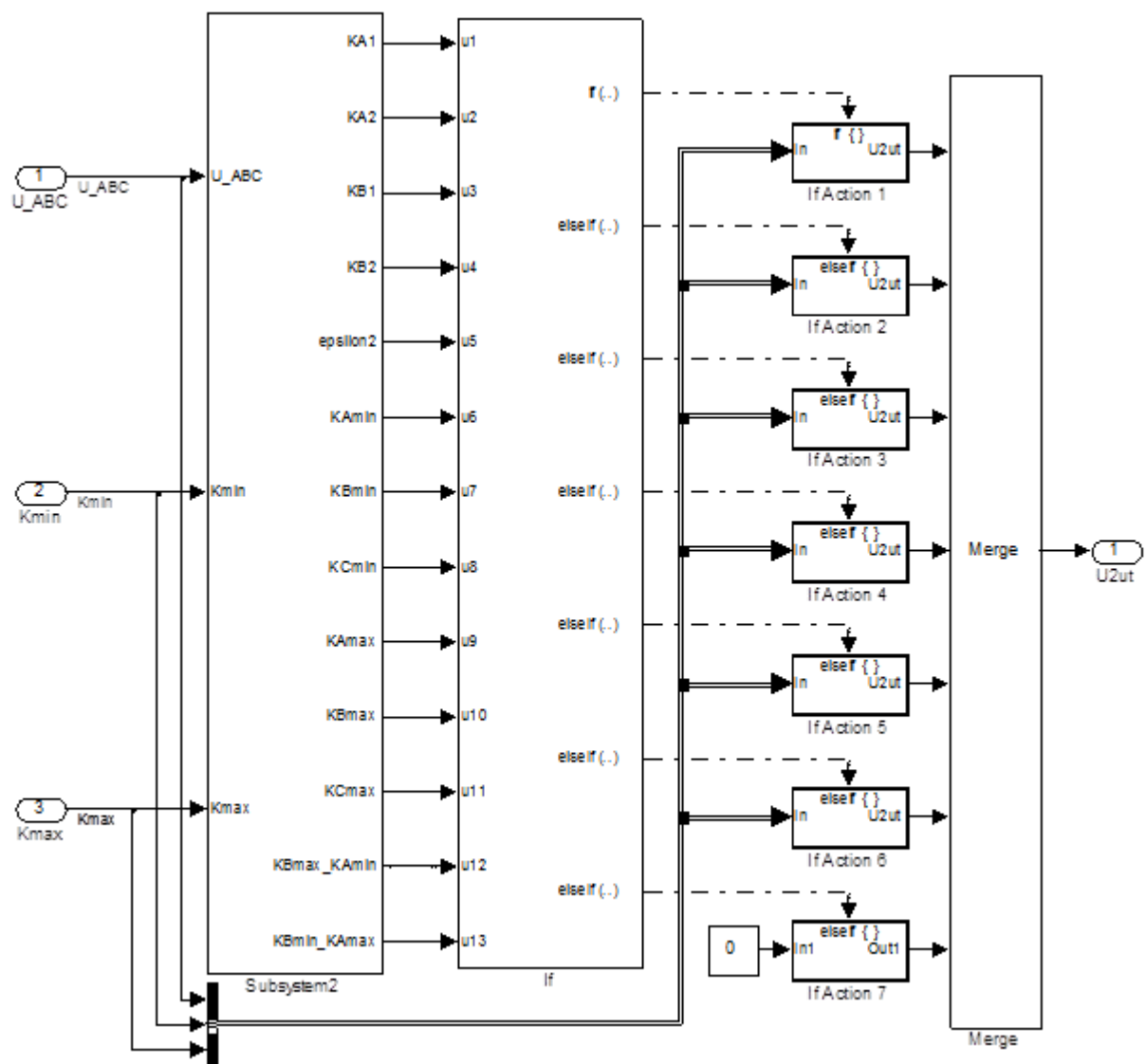


Рис. 3.15. Модель блоку «U2ut»

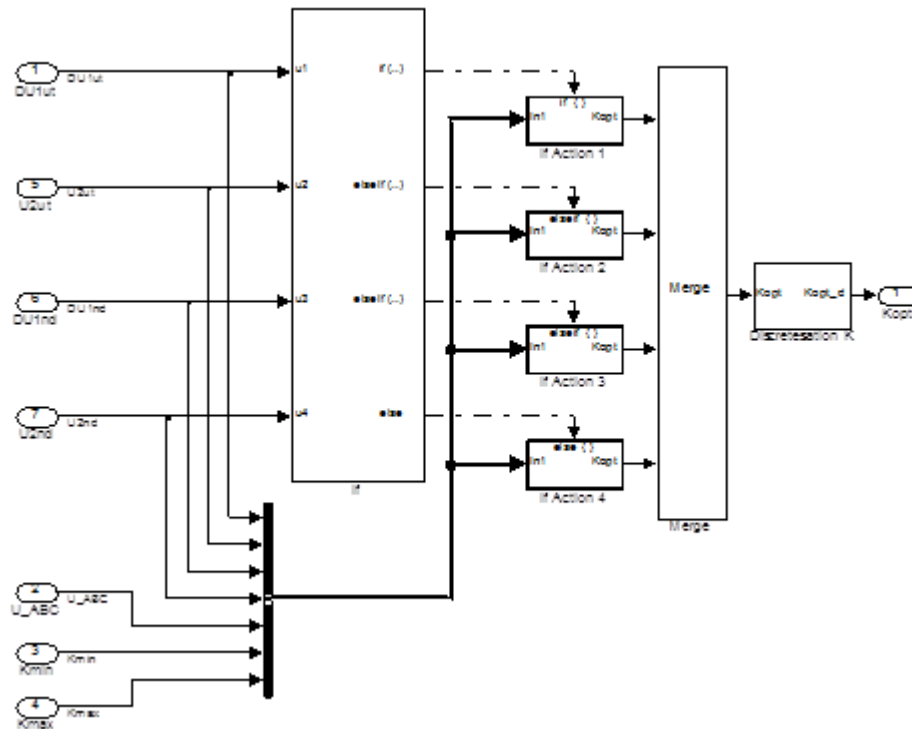


Рис. 3.16. Модель блоку «Optimisation» для Matlab Simulink

3.3 Дослідження стійкості САК пристроєм РПН трансформатора

Зважаючи на те, що розроблена САК є суттєво нелінійною, неможливо застосувати до неї класичні алгебраїчні або частотні критеріїв стійкості.

Дослідження стійкості подібних систем найбільш доцільно проводити шляхом аналізу їх перехідних процесів, що у випадку стійкої роботи САК носитимуть затухаючий характер. Крім цього, для забезпечення стійкої роботи оптимальних регуляторів необхідно, щоб сходився алгоритм розрахунку задачі оптимізації, який використовується для розрахунку оптимального вектора керування.

Для отримання перехідної характеристики $h(t)$ потрібно на вхід САК подати одиничний ступінчатий сигнал:

$$1(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0; \\ 0, & t < 0. \end{cases} \quad (3.2)$$

Найбільш доцільно отримати перехідні характеристики розроблених САК з допомогою комп'ютерного моделювання, використавши розроблені в роботі комп'ютерні моделі.

На рис. 3.17 наведені графіки сигналів збурень.

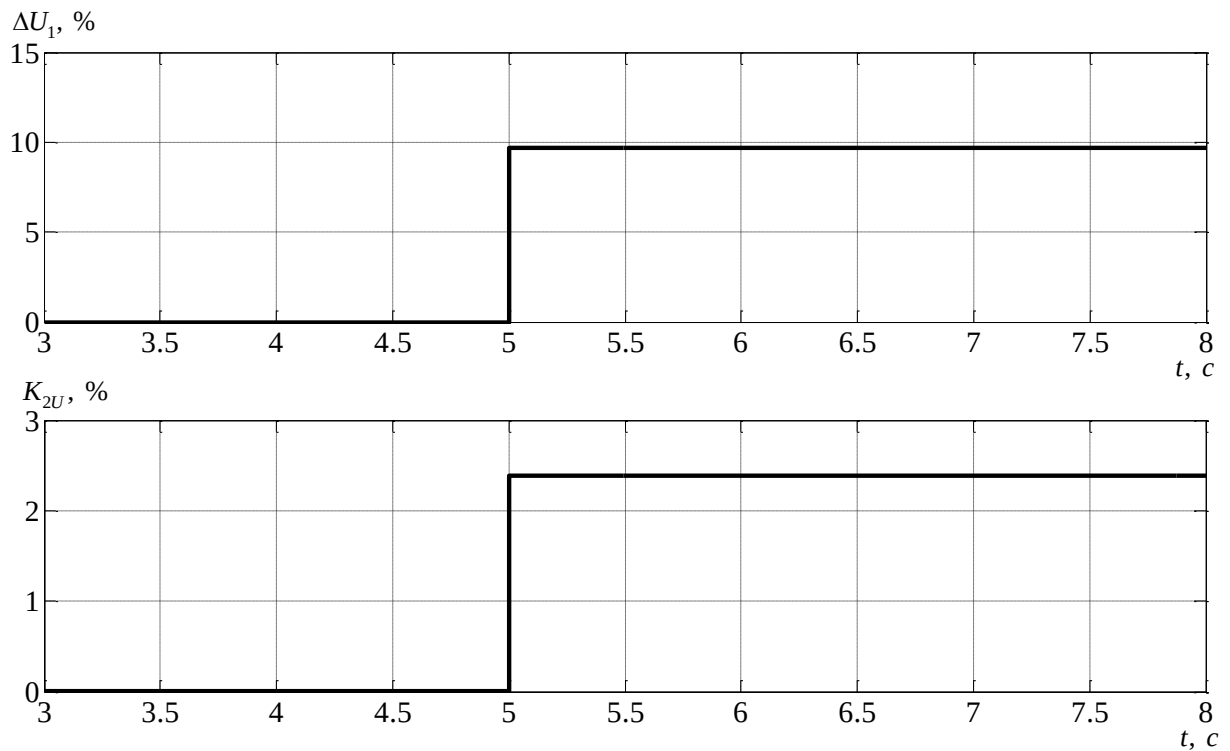


Рис. 3.17. Графіки сигналів збурень САК

На рис. 3.18 і 3.19 наведені графіки перехідних процесів для випадків їх аперіодичного і коливального характеру

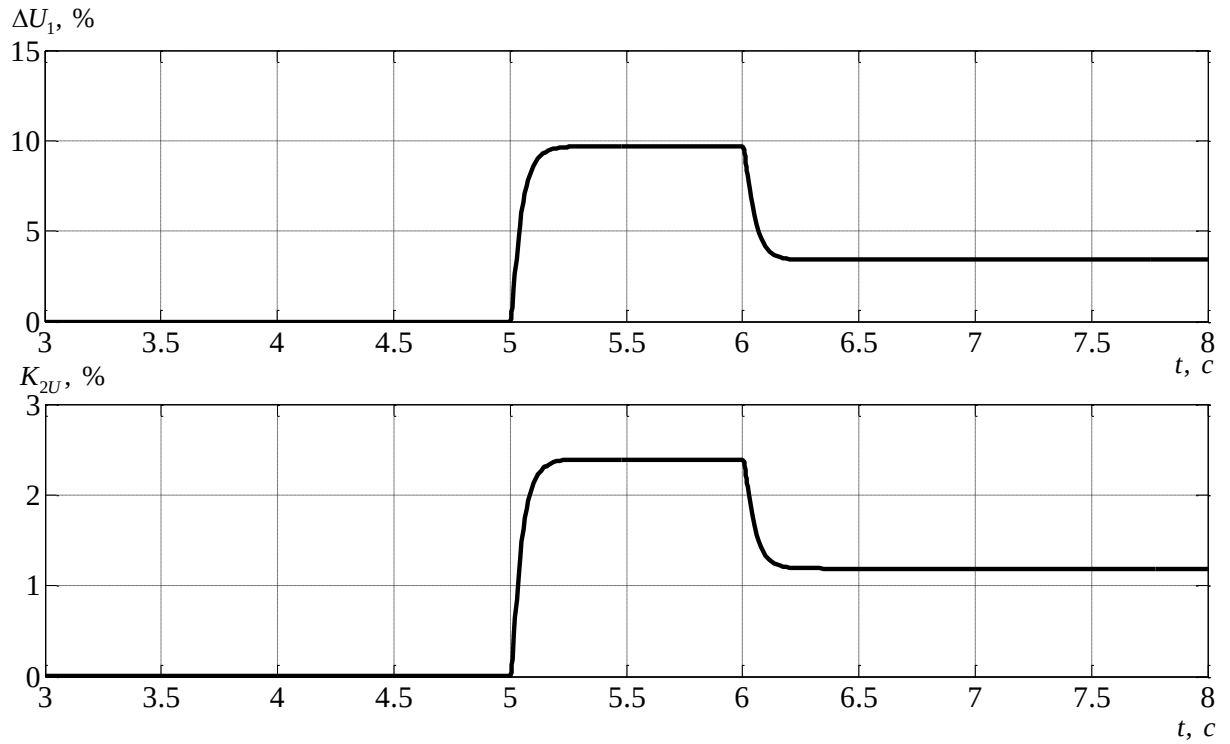


Рис. 3.18. Графіки аперіодичного перехідного процесу

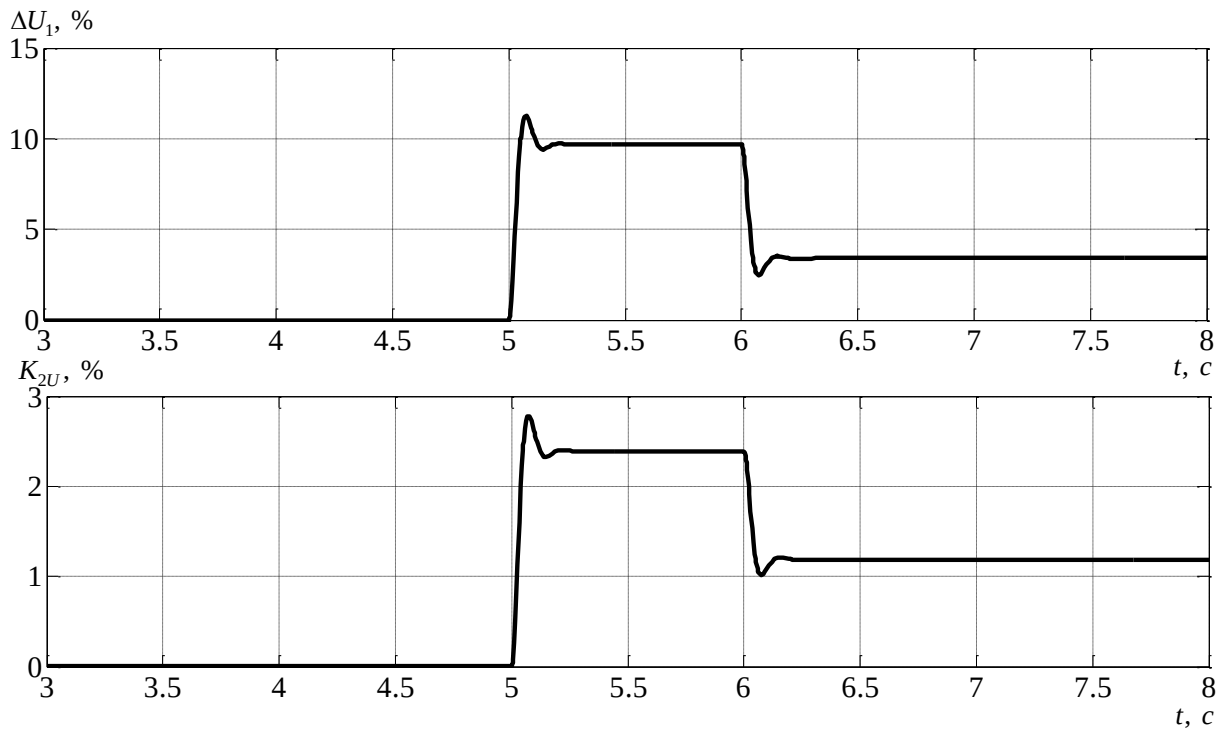


Рис. 3.19. Графіки коливального перехідного процесу

З графіків (рис. 3.18, 3.19) видно, що перехідний процес в САК пристроєм РПН трансформатора, який викликаний дією ступінчатих збурень,

носить затухаючий характер. Це свідчить про стійкість розробленої САК пристроєм РПН.

3.4 Комп'ютерне моделювання роботи САК пристроєм РПН

Для порівняння в якості базової моделі була обрана модель САК, що працює згідно закону керування (1.1).

На рис. 3.20 зображена комп'ютерна модель САК, що реалізує закон керування (1.1).

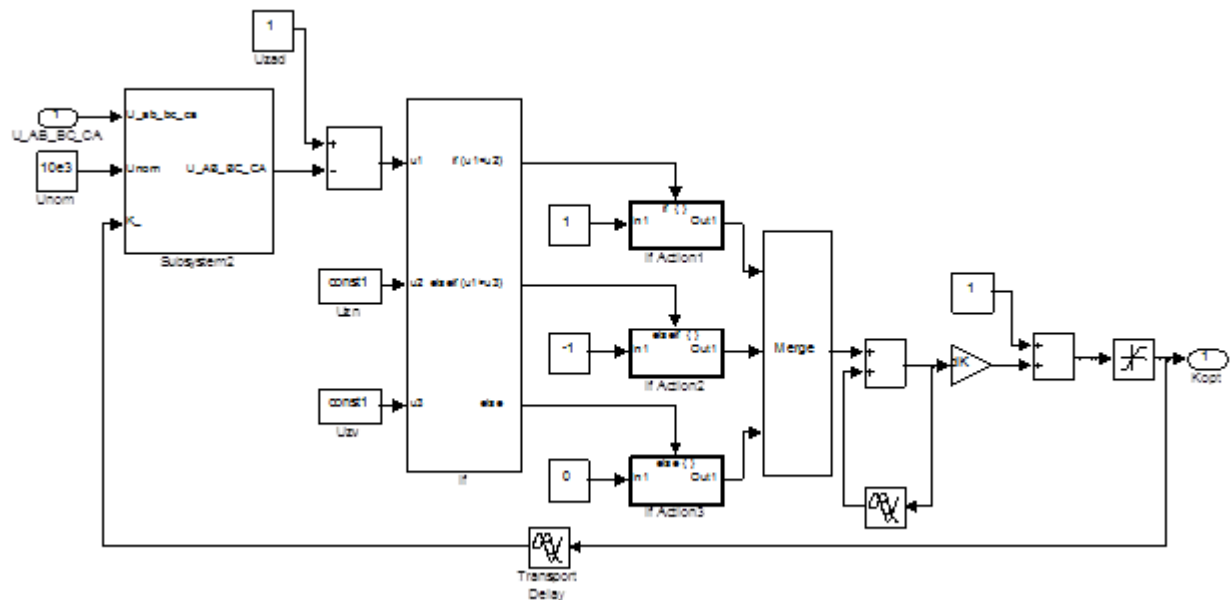


Рис. 3.20. Модель базової САК

Результати моделювання роботи САК для варіантів розробленої і базової моделей показані на рис. 3.22 – 3.26 і у табл. 3.1.

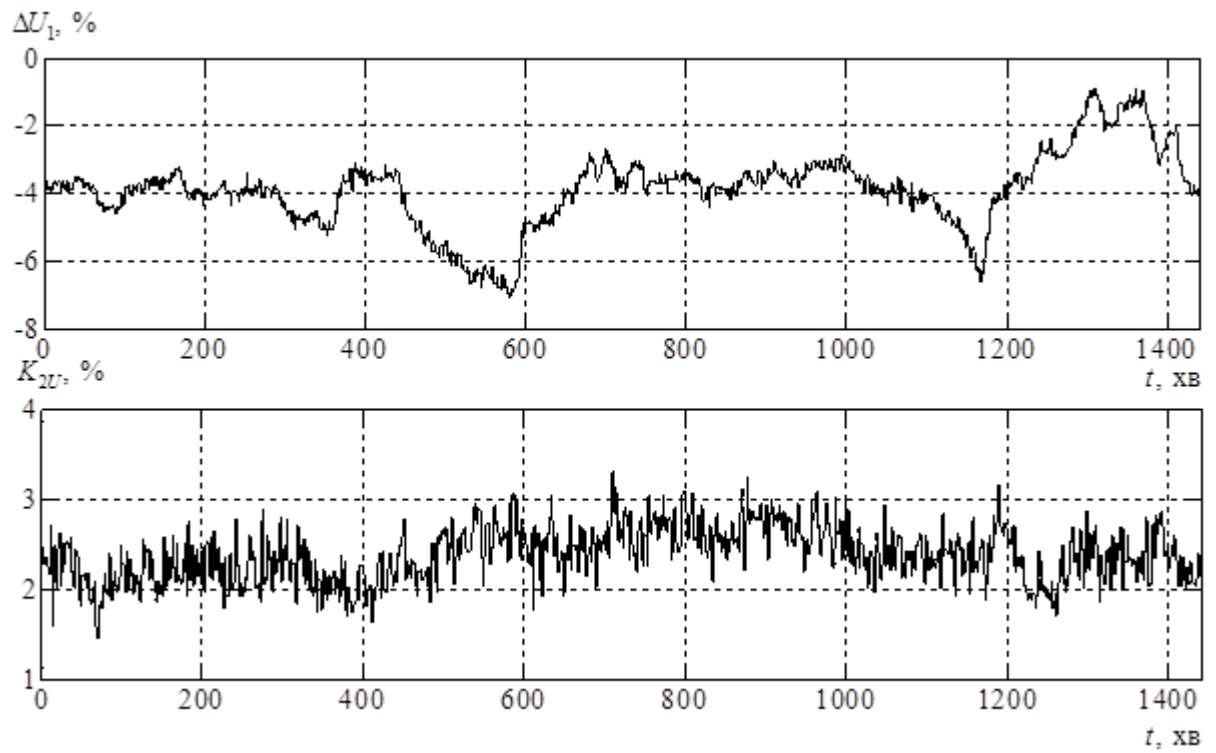


Рис. 3.21. Графіки зміни ΔU_1 і K_{2U} на стороні ВН

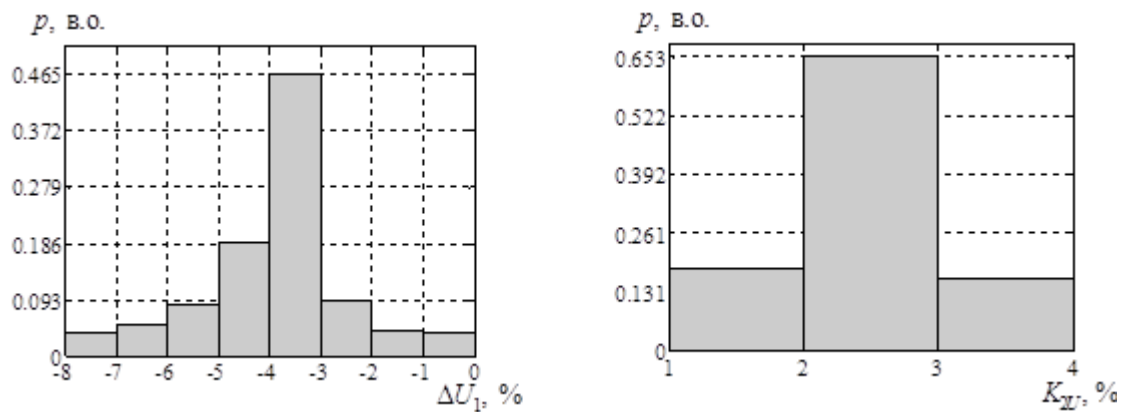


Рис. 3.22. Гістограма розподілу ймовірностей ΔU_1 і K_{2U} на стороні ВН

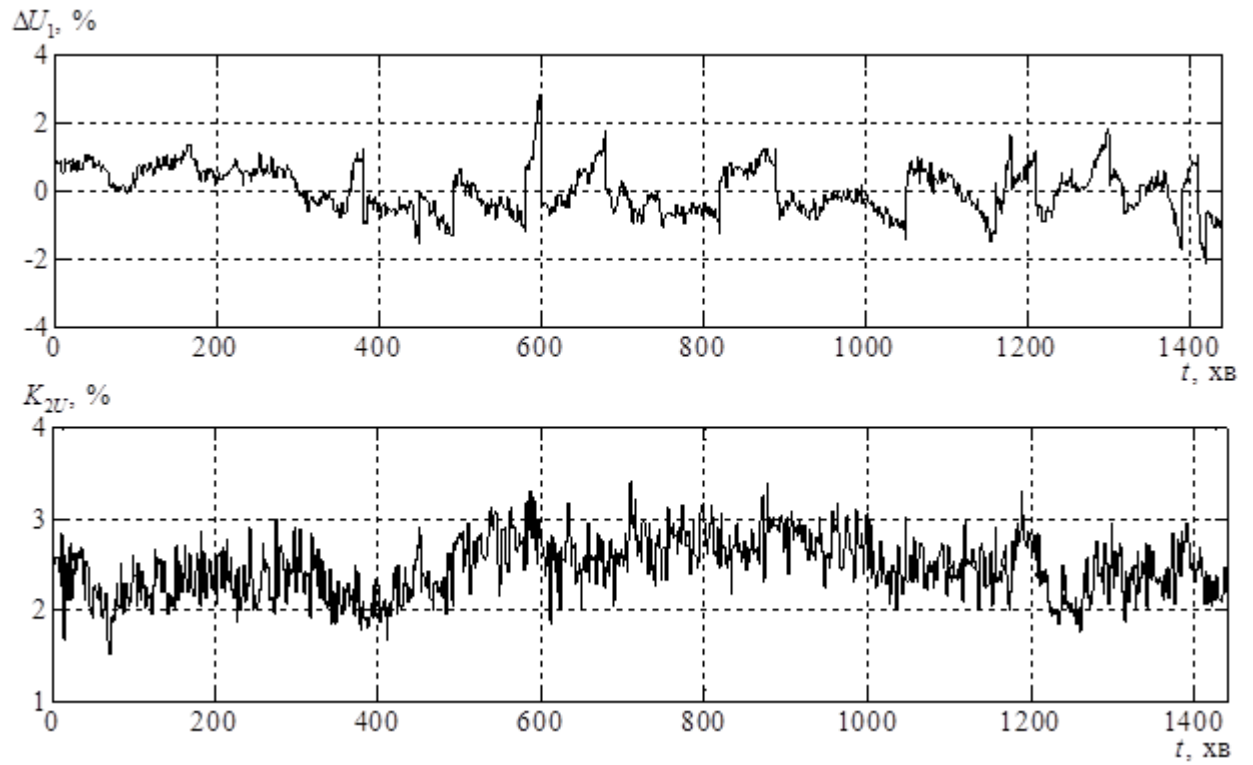


Рис. 3.23. Графіки зміни ΔU_1 і K_{2U} на стороні НН (базова САК)

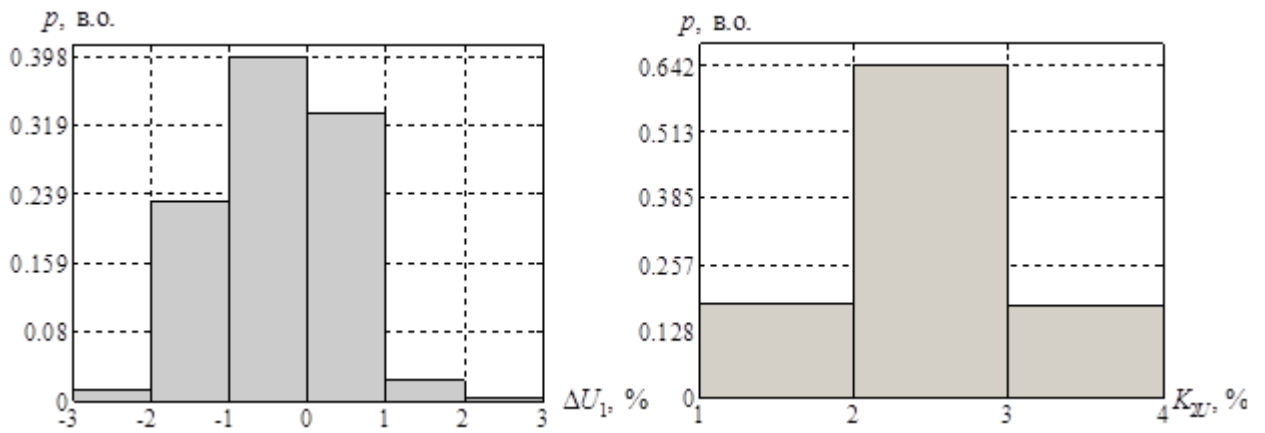


Рис. 3.24. Гістограми розподілу ймовірностей ΔU_1 і K_{2U} на стороні НН (базова САК)

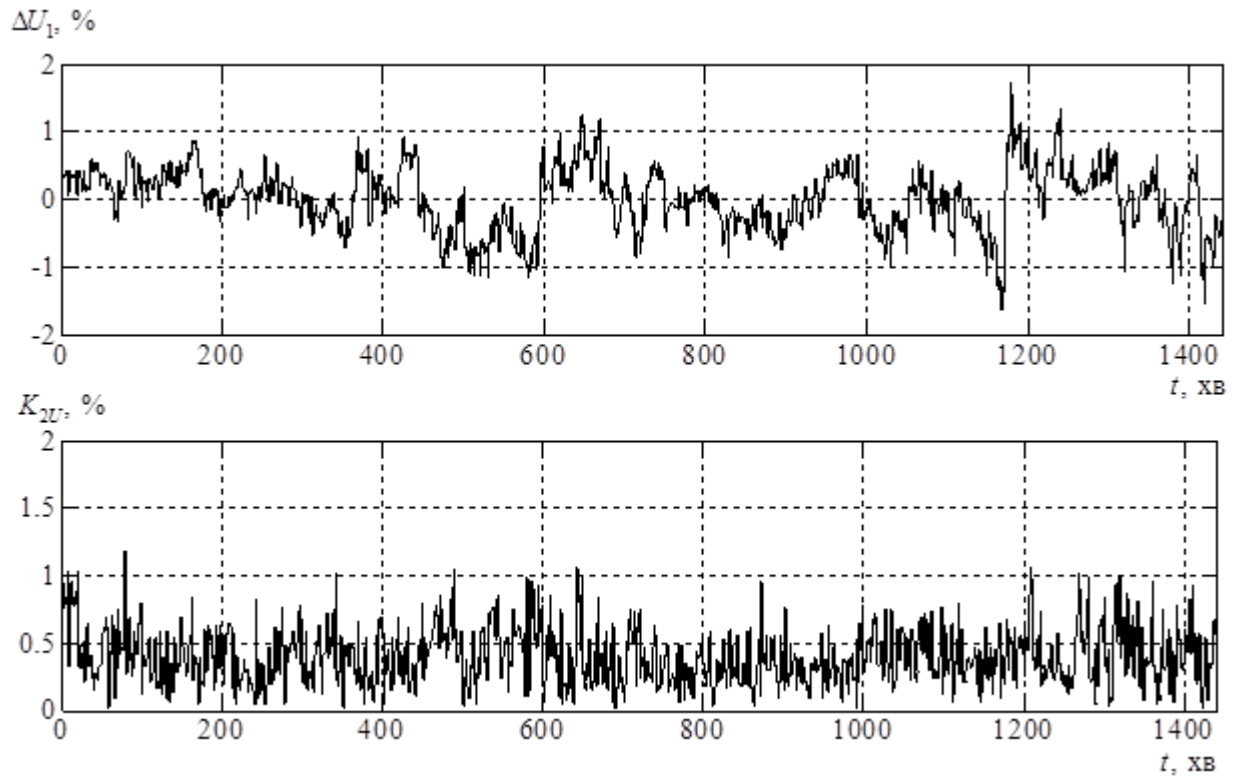


Рис. 3.25. Графіки зміни ΔU_1 і K_{2U} на стороні (розроблена САК)

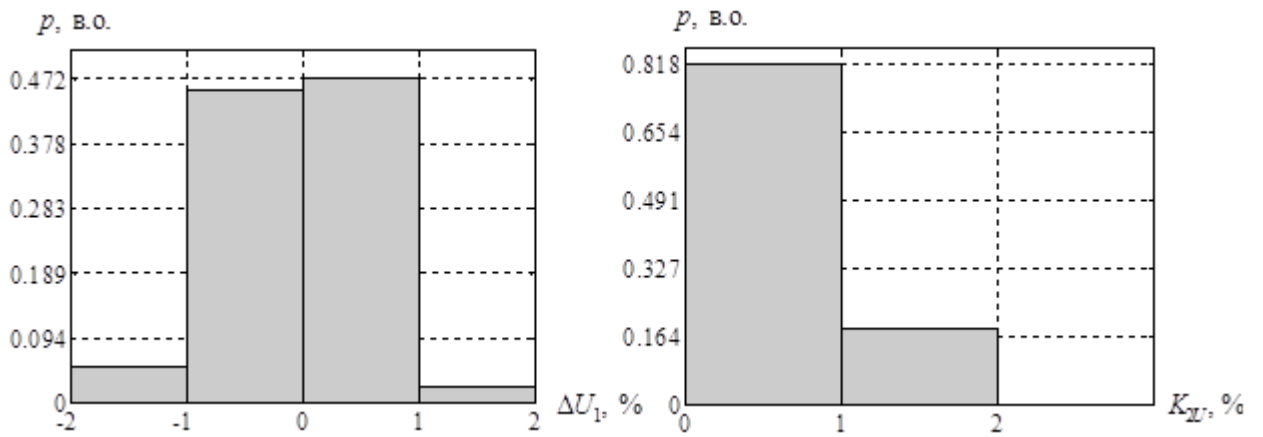


Рис. 3.26. Гістограми розподілу ймовірностей ΔU_1 і K_{2U} на стороні НН (розроблена САК)

Таблиця 3.1. Результати статистичної обробки показників якості електроенергії

№ з/п	Показник якості електроенергії	К-сть потраплянь в нормально допустимі межі	К-сть не потраплянь в нормально допустимі межі	Інтегральна ймовірність, $P(x \leq x_{н.д.})$, відн. од.
Сторона ВН				
1.	ΔU_1	1253	187	0,870
2.	K_{2U}	161	1279	0,110
Сторона НН (базова модель САК)				
3.	ΔU_1	1440	0	1,000
4.	K_{2U}	161	1279	0,110
Сторона НН (розроблена модель САК)				
5.	ΔU_1	1440	0	1,000
6.	K_{2U}	1440	0	1,000

Як видно з результатів моделювання і подальшої статистичної обробки, вихідний режим РЕМ характеризується суттєвими відхиленнями від гранично допустимих значень показників якості як по ΔU_1 ($P(\Delta U_1 \leq 5\%) = 0,87$) так і по K_{2U} ($P(K_{2U} \leq 2\%) = 0,11$). У випадку застосування базової САК спостерігається зменшення лише рівня ΔU_1 на стороні низької напруги ($P(\Delta U_1 \leq 5\%) = 1$). Але, рівень K_{2U} на стороні низької напруги залишається незмінним ($P(K_{2U} \leq 2\%) = 0,11$). Результати комп'ютерного моделювання розробленої САК показали, що при її застосуванні спостерігається зниження рівнів ΔU_1 ($P(\Delta U_1 \leq 5\%) = 1$) та K_{2U} ($P(K_{2U} \leq 2\%) = 1$) на стороні низької напруги силового трансформатора.

Висновки до розділу

1. Розроблена структурна схема САК та алгоритм розрахунку вектора керування дали змогу створити комп'ютерні моделі САК, які дозволили провести аналіз роботи запропонованих САК безконтактним пристроєм РПН силового трансформатора.

2. Аналіз перехідних процесів розроблених в роботі САК безконтактними пристроями РПН трансформаторів на розробленій комп'ютерній моделі показав, що перехідні процеси носять затухаючий характер, що свідчить про стійкість розробленої САК пристроєм РПН трансформатора.

3. Аналіз ефекту від використання розв'язку задачі керування безконтактними пристроями РПН трансформатора на розробленій комп'ютерній моделі показав що, при використанні запропонованої в роботі САК кількість потраплянь значень K_{2U} у нормально допустимі межі виявилась на 89 % ніж для базової САК пристроєм РПН трансформатора.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

В даному розділі проведено розрахунок блискавки захисту та захисного заземлення.

Результати розрахунку блискавкозахисту наведені нижче.

$$h_0 = 0,85h = 0,85 \cdot 25 = 21,25 \text{ м}$$

$$r_0 = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3}h)h = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot 25) \cdot 25 = 26,25 \text{ м}$$

$$r_x = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3}h)(h - 1,2h_x) = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot 25)(25 - 1,2 \cdot 6) = 18,7 \text{ м}$$

$$h_m = h - h_0 = 25 - 21,25 = 3,75 \text{ м}$$

$$h_a = h - h_x = 25 - 6 = 19 \text{ м}$$

$$\alpha = \arctg \frac{r_0}{h_0} = \arctg \frac{26,25}{21,25} = 51^\circ$$

$$\varphi = \arcsin \frac{B}{2r_x} = \arcsin \frac{100}{2 \cdot 18,7} = 69^\circ,$$

$$\cos \varphi = \cos(69^\circ) = 0,35$$

$$A = 2r_x \cos \varphi = 2 \cdot 18,7 \cdot 0,35 = 13,09 \text{ м}$$

$$A \times B \times H = 13,09 \times 100 \times 6$$

$$N = \left[(B + 6h_x)(A + 6h) - 7,7h_x^2 \right] n \cdot 10^{-6} =$$

$$= \left[(100 + 6 \cdot 6)(13,9 + 6 \cdot 6) - 7,7 \cdot 6^2 \right] \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 3,81 \cdot 10^{-3}.$$

На рис. 5.1 наведено ескіз зони захисту одиночного стрижневого блискавковідводу

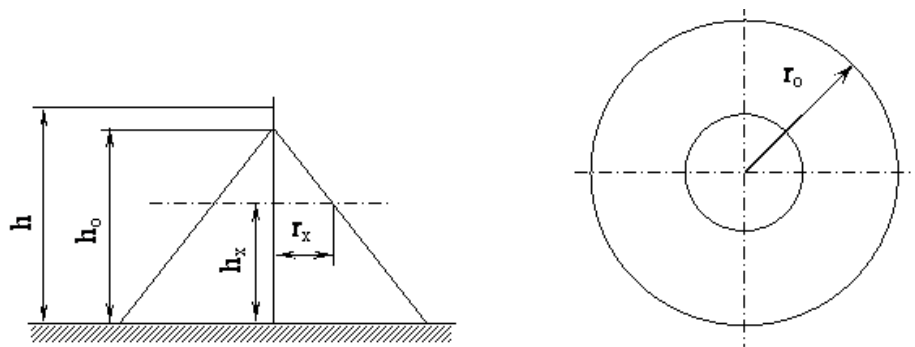


Рис. 5.1 Зона захисту одиночного стрижневого блискавковідводу

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ САК ПРИСТРОЄМ РПН СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Для оцінки ефективності використання розробленої САК пристроєм РПН трансформатора в порівнянні з базовою САК необхідно провести розрахунок економічних показників для цих обох варіантів. В якості базової оберемо САК механічним РПН. Тому при визначенні капіталовкладень в розроблену в роботі САК потрібно включити витрати на переобладнання безконтактним пристроєм РПН силового трансформатора.

Економічний ефект від використання розробленої САК розраховується за формулою:

$$E = Z_6 - Z_p, \quad (5.1)$$

де Z_6 – приведені витрати для базового варіанту;

Z_p – приведені витрати для проектного варіанту.

Приведені витрати розраховуються за формулою:

$$Z_i = E_n K_i + B_{a.o.i} + Z\delta_i, \quad (5.2)$$

де E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень,
 $E_n = 0,15$;

K_i – капіталовкладення в i -й варіант; для базового варіанту $K_6 = 0$;

$B_{a.o.i}$ – витрати на обслуговування і амортизацію обладнання;

$Z\delta_i$ – збиток від погіршення якості електричної енергії;

Щорічний економічний збиток від несиметрії визначається за виразом:

$$Зб = Зб_{\Delta P} + Зб_{\tau}, \quad (5.3)$$

де $Зб$ – загальний щорічний збиток викликаний несиметрією напруги;

$Зб_{\Delta P}$ – щорічний збиток, викликаний додатковими активними втратами;

$Зб_{\tau}$ – щорічний збиток, викликаний скороченням терміну служби обладнання.

Збиток, викликаний додатковими активними втратами потужності визначається за виразом:

$$Зб_{\Delta P} = C_0 \sum_{i=1}^n \Delta P_i T_i, \quad (5.4)$$

де C_0 – вартість втрат електроенергії, грн./кВт·год;

ΔP_i – додаткові втрати потужності, кВт;

T_i – кількість годин роботи групи однорідних елементів РЕМ, год.;

Величина додаткових втрат розраховується за виразом:

$$\Delta P_i = k'_i K_{2U}^2, \quad (5.5)$$

де k'_i – коефіцієнт додаткових втрат потужності від несиметрії напруг для групи однорідних елементів РЕМ, в.о. ;

Щорічний збиток, викликаний скороченням терміну служби обладнання:

$$Зб_{\tau} = \sum_{i=1}^n 3_i \left(\frac{\gamma_i - 1}{1 + E_H T_{Hi}} \right), \quad (5.6)$$

де Z_i – приведені витрати для групи однорідних елементів РЕМ;
 T_{hi} – нормативний термін служби для групи елементів РЕМ;
 γ_i – кратність зниження терміну служби для групи елементів РЕМ:

$$\gamma = e^{k_{\text{сп}}}, \quad (5.7)$$

де $k_{\text{сп}}$ – коефіцієнт спотворення:

$$k_{\text{сп}} = d' K_{2U}^2, \quad (5.8)$$

Приведені витрати в формулі (5.6)::

$$Z_i = E_n K_i + B_{a.o.i}, \quad (5.9)$$

де K_i – капіталовкладення в елемент РЕМ;
 $B_{a.o.i}$ – витрати на обслуговування і амортизацію обладнання;

Згідно із запропонованою методикою проведемо визначення економічних збитків від несиметрії напруг на прикладі САК пристроєм РПН трансформатора, що експлуатується у складі РЕМ, схема якої наведена на рис. 5.1, для двох варіантів:

1. Розроблена в роботі САК пристроєм РПН трансформатора;
2. базова САК пристроєм РПН трансформатора.

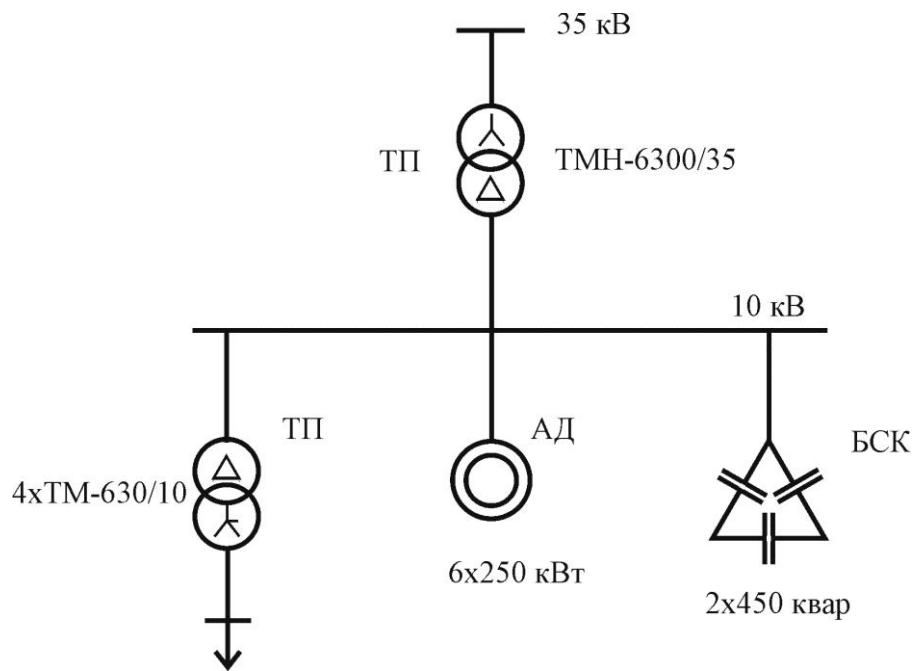


Рис. 5.1. Принципова схема РЕМ

В якості вихідних даних до розрахунку використаємо результати моделювання роботи САК: $K_{2U_{розр}} = 0,4\%$, $K_{2U_{баз}} = 2,38\%$.

Вихідні дані до розрахунку, та результати розрахунку наведені в таблицях 5.1 – 5.3.

Таблиця 5.1. Вихідні дані для розрахунку збитків
від несиметрії напруг в РЕМ

№ з/п	Тип обладнання	Номінальна потужн., кВт, квар	К-сть, шт.	К, тис. грн.
1	ТМН-6300/35/10	2500	2	100
2	АД >100 кВт	250	6	3
3	ТМ-630/10	630	4	30
4	БСК	450	2	3,5

Таблиця 5.2. Каталожні і розрахункові дані для розрахунку збитків від несиметрії напруг в РЕМ

№ з/п	Тип обладнання	$S_{вст},$ кВА	$Z,$ тис. грн. /рік	$K,$ тис. грн	d'	k'	T	$Z_{а.о.}$
1	ТМН-6300/35/10	5000	48,8	200,0	338	0,5	8760	9,4
3	АД >100 кВт	1500	4,698	18,0	434	2,175	1000	11,1
2	ТМ-630/10	2520	29,28	120,0	610	0,67	8760	9,4
4	БСК	900	1,708	7,0	2,6	0,003	7000	9,4

Таблиця А.3. Результати розрахунку

№ з/п	Тип обладнання	$\Delta P,$ кВт	$\Delta W,$ кВт·год	$U_{\Delta P},$ тис. грн	$k_{сп}$	γ	$U_t,$ тис. грн
Базова САК							
1	ТМН-6300/35/10	1,42	12405	15,49	0,19	1,21	2,57
2	АД >100 кВт	1,85	1848	2,31	0,25	1,28	0,33
3	ТМ-630/10	0,96	8378	10,46	0,35	1,41	3,02
4	БСК	0,00153	10,71	0,0134	0,0015	1,0015	0,0006
	Всього			28,28			5,92
Розроблена САК							
1	ТМН-6300/35/10	0,04	350,4	0,44	0,01	1,01	0,07
2	АД >100 кВт	0,052	52,2	0,07	0,01	1,01	0,01
3	ТМ-630/10	0,027	236,6	0,30	0,01	1,01	0,07
4	БСК	0,000043	0,302	0,00038	0,00004	1,00004	0,00002
	Всього			0,80			0,15

Результати розрахунку показників ефективності впровадження САК пристроєм РПН трансформатора наведені в табл. А.4.

Таблиця 5.4. Показники ефективності впровадження САК

№ з/п	Показники	Од. виміру	Базова САК	Проектна САК
1.	Капіталовкладення:	тис. грн.		
	- безконтактний пристрій РПН, тис. грн.	тис. грн.	-	90
	- блок автоматичного керування, тис. грн.	тис. грн.	-	1,20
	Всього:	тис. грн.	-	91,20
2.	Витрати на амортизацію і обслуговування	тис. грн./рік	1,80	0,30
4.	Збитки від неякісної електроенергії	тис. грн./рік	34,20	0,950
5.	Приведені затрати	тис. грн./рік	36,0	12,19
6.	Економічний ефект	тис. грн./рік	23,80	
7.	Срок окупності	роки	3,8	

Очікуваний розрахунковий економічний ефект для розробленої САК пристроєм РПН трансформатора для підстанції з 2 трансформаторами типу ТМН-6300/35 становить 23,8 тис. грн./рік, а срок окупності складає 3,8 роки і виявився меншим за нормативне значення (8 років). Це свідчить про доцільність застосування розробленої в роботі САУ.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Виконані в роботі дослідження дають змогу зробити такі висновки:

1. Проведений аналіз методів і технічних засобів регулювання напруги в розподільних електричних мережах показав, що головною причиною недостатньої ефективності підвищення якості електроенергії є неврахування можливості одночасного зменшення рівнів несиметрії та відхилення напруг шляхом пофазної автоматичної зміни коефіцієнтів трансформації силових трансформаторів.

2. Проведений аналіз відомих технічних засобів регулювання коефіцієнту трансформації трансформатора показав, що найбільш досконалим є безконтактний РПН, який дозволяє здійснювати пофазне регулювання значення коефіцієнта трансформації трансформатора, що дає змогу керування не лише рівнем усталеного відхилення напруги, а й значеннями несиметрії напруг в електричних мережах.

3. В результаті проведеного аналізу методів і засобів автоматизації керування регулюючими пристроями силових трансформаторів визначено, що існуючі методи автоматизації керування пристроєм РПН трансформатора не враховують мультифункціональність силового трансформатора з безконтактним РПН, яка полягає в можливості впливу не тільки на рівні відхилення напруги, але і на несиметрію напруг за рахунок здійснення пофазного регулювання коефіцієнтів трансформації трансформатора. Необхідність врахування цієї можливості вимагає проведення досліджень з питання автоматизації керування безконтактними пристроями РПН трансформаторів.

4. Формалізація задачі керування безконтактним РПН силового трансформатора показала, що ця задача приводиться до задачі багатокритеріальної оптимізації.

5. Проведений аналіз залежностей між напругами і струмами на стороні високої та низької напруги трансформатора дав змогу визначити кількість і вигляд критеріальних виразів для задачі багатокритеріальної оптимізації.

6. В результаті проведеного обґрунтування методу розв'язку задачі автоматичного керування безконтактним РПН силових трансформаторів у вигляді задачі багатокритеріальної оптимізації встановлено, що найдоцільнішим методом розв'язання цієї задачі є метод наближення до утопічної точки.

7. Отримані в результаті вирішення задачі автоматичного керування співвідношення дають змогу розробити на їх основі структурну схему та алгоритм роботи САК безконтактним пристроєм РПН трансформатора, реалізація яких дасть змогу забезпечити одночасне зниження рівнів несиметрії і відхилення напруги в електричних мережах.

8. Аналіз перехідних процесів розроблених в роботі САК безконтактними пристроями РПН трансформаторів на розробленій комп'ютерній моделі показав, що перехідні процеси носять затухаючий характер, що свідчить про стійкість розробленої САК пристроєм РПН трансформатора.

9. Аналіз ефекту від використання розв'язку задачі керування безконтактними пристроями РПН трансформатора на розробленій комп'ютерній моделі показав що, при використанні запропонованої в роботі САК кількість потраплянь значень K_{2U} у нормально допустимі межі виявилась на 89 % ніж для базової САК пристроєм РПН трансформатора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Взамен ГОСТ 13109-87; Введ. 01.01.00. – К.: Госстандарт Украины, 1999. – 31 с.
2. Веников В. А. Регулирование напряжения в электроэнергетических системах / В. А. Веников, В. И. Идельчик, М. С. Лисеев. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 216 с.
3. Мельников Н. А. Регулирование напряжения в электрических сетях / Н. А. Мельников, Л. А. Солдаткина. – М. : Энергия, 1968. – 152 с.
4. Грабко В. В. Моделі і засоби регулювання напруги за допомогою трансформаторів з пристроями РПН / В. В. Грабко. – Вінниця, УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 109 с.
5. Ким Д. П. Теория автоматического управления / Д. П. Ким. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – Т. 1. – 288 с.
6. Жежеленко И. В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко И. В., Ю. Л. Саенко. – М. : Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
7. Шидловский А. К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А. К Шидловский., В. Г Кузнецов. – К. : Наук. думка, 1985. – 268 с.
8. Шидловский А. К. Стабилизация параметров электрической энергии в распределительных сетях / А. К. Шидловский, В. А. Новский, Н. Н. Каплычный. – Киев : Наук. думка, 1989. – 312 с.
9. Electrical Power Systems Quality. Second Edition / R. Dugan, M. McGranaghan, S. Santoso, W. Beaty. – Boston : McGraw-Hill, 2003. – 525 p
10. Гриб О. Г. Контроль и регулирование несимметричных режимов в системах электроснабжения [учебное пособие] / О. Г. Гриб. – Харьков : ХНАГХ, 2004. – 180 с.

11. Бурбело М. Й. Формування математичних моделей вимірювальних систем установок симетрування / М. Й. Бурбело, О. В. Бабенко // Вісник ВПІ. – 2005. – №6. – С. 242-251.
12. Бурбело М. Й. Квазірівноважені вимірювальні канали для симетрувальних установок / М. Й. Бурбело, О. В. Бабенко. – Вінниця, УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 96 с.
13. Сергеев Б. Н. Электрические машины: Трансформаторы [учебное пособие для электромех. спец. вузов] / Б. Н. Сергеев, В. М. Киселев, Н. А. Акимова. – М. : Высш. шк., 1989. – 352 с.
14. Беркович М. А. Автоматика энергосистем / М. А. Беркович, В. А. Гладышев, В. А. Семенов. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
15. Солдаткина Л. А. Электрические сети и системы / Л. А. Солдаткина. – М.: Энергия, 1978. – 256 с.
16. Мельников Н. А. Электрические сети и системы / Н. А. Мельников. – М.: Энергия, 1969. – 321 с.
17. Глазунов А. А. Электрические сети и системы [учебное пособие] / А.А. Глазунов, А.А. Глазунов. – М. : Госэнергоиздат, 1960. – 368 с.
18. Файбисович Д. Л. Справочник по проектированию электрических сетей [Справочник] / Д. Л. Файбисович, И. Г. Карапетян, И. М. Шапиро. – М. : ЭНАС, 2012. – 376 с.
19. Овчаренко Н. И. Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем [учебник для вузов] / Н. И. Овчаренко. – М. : НЦ ЭНАС, 2000. – 504 с.
20. Вольдек А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – Л. : Энергия, 1974. – 840 с.
21. Будник В. В. Тиристорно-контактные установки для регулирования напряжения под нагрузкой в сетях с изолированной нейтралью: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук : 05.09.12 „Силовая электроника” / В. В. Будник. – Нижний Новгород, 1996. – 18 с.

22.Гребенщиков В.В.. Тиристорно-контактные установки со вспомогательными трансформаторами для широкодиапазонного регулирования под нагрузкой силовых трансформаторов: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук : 05.09.12 „Полупроводниковые преобразователи электроэнергии” / В. В. Будник. – Нижний Новгород, 1995. – 16 с.

23.Галанов В.И. Современные мощные полупроводниковые приборы и их функциональные особенности / В.И. Галанов, Ю.А. Шершнев, М.К. Гуревич, М.А. Козлова // Электротехника. – 1998. – №3. – С. 48 – 52.

24.Лизец М. Новое в активной электронной элементной базе для силовой электроники фирмы "Siemens AG" / М. Лизец, М.Ю. Поташников // Электротехника. – 1998. – №3. – С. 52 – 56.

25.Афанасьев А.И. К расчету надежности тиристорных переключающих устройств силовых трансформаторов / Афанасьев А.И., Дмитренко А.И., Миронченко В.Л. // Изв. вузов. Сер. Электромеханика. – 1979. – №3. – С. 237–241.

26.Афанасьев А.И. О целесообразности контроля за исправностью тиристорных бесконтактных переключающих устройств РПН /А. И. Афанасьев // Изв. вузов. Сер. Энергетика. – 1984. – №4. – С. 38–39.

27.Грабко В. В. До питання підвищення якості напруги в електричних мережах / В. В. Грабко, І. Ю. Львов // Сучасні інформаційні та енергозберігаючі технології життєзабезпечення людини, випуск 6. – Київ : “ФАДА, ЛТД”. – 1999. – С. 94-96.

28.Мокин Б.И. Автоматические регуляторы в электрических сетях / Б. И. Мокин, Ю. Ф. Выговский. – К.: Техніка, 1985. – 104 с.

29.А.с. 259244 СССР, МПК Н 02 Р 13/06. Устройство для автоматического регулирования коэффициента трансформации силового трансформатора / Ю. В. Артемьев, Г. С. Берман, Л. В. Росман. – №1201452/24-07 ; заявл. 20.11.67 ; опубл. 12.12.69, Бюл. №2.

30. Баркан Я. Д. Автоматизация энергосистем [учебное пособие] / Я. Д. Баркан, Л. А. Орехов. – М. : Высш. школа, 1981. – 271 с.

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

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

33. 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. – №4498743/07; Заявл. 25.10.88; Оpubл. 07.06.91, Бюл. №21.

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

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

36. Жмак Е. И. Регулирование напряжения в электроэнергетических системах на основе нечеткой логики: дис. канд. техн. наук: 05.11.13 / Жмак Егор Иванович. – Новосибирск, 2004. – 120 с.

37. Kasztenny B. Fuzzy logic controller for on-load transformer tap changer / B. Kasztenny, E. Rosolowski, J. Izykowski, M. Saha // IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, 1998. – 164-170 pp.

38. Hsu Y. Y. A combined artificial neural network-fuzzy dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution

substation / Y. Y. Hsu, F. C. Lu // IEEE Transactions on Power Systems, Vol 13, 1998. – 1265-1271 pp.

39.Larsson M. Coordinated Control of Cascaded Tap Changers in a Radial Distribution Network // M. Larsson, D. Karlsson // KTH Stockholm Power Tech Conference, 1995.

40.Львов І. Ю. Дворівнева система регулювання напруги електротехнічних пристроїв: дис. канд.. техн. наук: 05.09.03 / Львов Ілля Юрійович. – Львів, 2003. – 153 с.

41.Бурбело М. Й. Застосування багатоцільової оптимізації для симетрування та зменшення відхилень напруг в електричних мережах / М. Й. Бурбело, А. М. Волоцький, О. В. Бабенко, О. В. Салій // Вісник ВПІ. – 2007. – 2005. – № 6. – с. 76 – 79.

42.Ehrgott M. Multicriteria Optimisation [Second Edition] / M. Ehrgott. – Berlin: Springer, 2005. – 328 p.

43.Кини Р. Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Р. Л. Кини, Х. Райфа. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.

44.Макаров И. М. Теория выбора и принятия решений / [И. М. Макаров, Т. М. Виноградская, А. А. Рубчинский, В. Б. Соколов]. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 328 с.

45.Нетушил А. В. Теория автоматического управления: нелинейные системы, управление при случайных воздействиях: [учебник для вузов] / А. В. Нетушил, А.В. Балтрушевич, В.В. Бурляев. – М.: Высш. школа, 1983 – 432 с.

46.Растринин Л. А. Современные принципы управления сложными объектами / Л. А. Растринин. – М.: Сов. радио, 1980. – 232 с.