

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

В. В. Грабко, С. М. Левицький

**СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ
ТРАНСФОРМАТОРАМИ З ПОЗДОВЖНЬО-
ПОПЕРЕЧНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ НАПРУГИ
ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2010

УДК 621.314.222

Г 75

Рекомендовано до видання Ученою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № від 25.05.2009 р.).

Рецензенти:

О. М. Сінчук, доктор технічних наук, професор

В. М. Кутін, доктор технічних наук, професор

Грабко В. В., Левицький С. М.

Г 75 Система автоматичного керування трансформаторами з поздовжньо-поперечним регулюванням напруги під навантаженням : монографія / В. В. Грабко, С. М. Левицький. — Вінниця : ВНТУ, 2010. — 120 с.

ISBN 978-966-641-...

В монографії представлено математичну, функціональну, та комп'ютерну моделі системи автоматичного керування трансформаторами з поздовжньо-поперечним регулюванням напруги під навантаженням, які виконано на підставі розробленого закону керування. Розглянуто мікропроцесорну реалізацію системи керування.

Розрахована на інженерно-технічних працівників електро-енергетичних компаній, а також може бути корисною студентам та аспірантам вузів, котрі спеціалізуються в галузі розробки систем автоматичного керування електротехнічними комплексами.

УДК 621.314.222

ISBN 978-966-641-...

© В. Грабко, С. Левицький, 2010

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	5
Вступ	6
Розділ 1. Аналіз сучасного стану поздовжньо-поперечного регулювання напруги	9
1.1. Технічні засоби для регулювання напруги з застосуванням вольтододаткових трансформаторів	9
1.2. Поздовжньо-поперечне регулювання напруги в системах електропостачання з контролем технічного та економічного ефекту	17
1.3. Регулювання напруги в системах електропостачання з компенсацією реактивної потужності	22
1.4. Поздовжньо-поперечне регулювання напруги в замкнених мережах систем електропостачання	26
1.5. Узагальнення результатів аналізу	29
Розділ 2. Синтез закону та структури системи автоматичного поздовжньо-поперечного регулювання напруги	30
2.1. Вплив поперечного регулювання напруги на режим мереж за потужністю	30
2.2. Синтез закону поздовжньо-поперечного регулювання напруги	33
2.3. Вибір математичного апарату, придатного для розв'язання задачі	37
2.4. Синтез структури системи автоматичного керування трансформаторами з поздовжньо-поперечним регулюванням напруги	38
2.5. Реалізація синтезованої структури системи автоматичного керування трансформаторами з поздовжньо-поперечним регулюванням напруги	42
Розділ 3. Дослідження якості розробленої системи регулювання напруги	57
3.1. Розроблення математичної моделі для дослідження роботи системи	57
3.2. Комп'ютерне моделювання роботи системи регулювання напруги і дослідження її на стійкість	60
Розділ 4. Мікропроцесорна реалізація системи автоматичного керування трансформаторами з поздовжньо-поперечним регулюванням напруги	78

4.1. Мікропроцесорна реалізація регулятора напруги для поздовжньо-поперечного регулювання.....	78
4.2. Розробка програмного забезпечення мікропроцесорного регулятора для системи автоматичного керування трансформаторами з поздовжньо-поперечним регулюванням напруги	79
4.3. Оцінка похибок вимірювальних каналів мікропроцесорного регулятора в системі поздовжньо-поперечного регулювання напруги	82
4.3.1. Похибки вимірювальних трансформаторів струму та напруги	83
4.3.2. Похибки вимірювальних перетворювачів напруги, струму та потужності	87
4.3.3. Похибки аналого-цифрових перетворювачів	88
4.3.4 Оцінка помилок першого і другого роду при вимірюванні напруги	92
Висновки	98
Література	100
Додаток А. Дослідження моделі комплексу поздовжньо-поперечного регулювання напруги	112
Додаток Б. Моделювання впливу поперечної вольтдобавки на приріст активної та реактивної потужності	115
Додаток В. Оцінка помилок першого і другого роду регулятора напруги	116

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЦП	—	аналого-цифровий перетворювач
БГР	—	блок гальванічної розв'язки
БК	—	батарея конденсаторів
БПСП	—	блок перетворення імпульсного сигналу в потенційний
БФЗН	—	блок формування зони нечутливості
БФУ	—	блок формування уставки
ВДТ	—	вольтододатковий трансформатор
ВН	—	висока напруга
ГТІ	—	генератор тактових імпульсів
ДРП	—	джерело реактивної потужності
ЕРС	—	електрорушійна сила
ЛЕП	—	лінія електропередачі
ЛТ	—	лінійний трансформатор
НН	—	низька напруга
ПБЗ	—	перемикання без збудження
ПІД	—	пропорційно-інтегрально-диференціальний
ПН	—	перетворювач напруги (нормуючий)
ПП	—	перетворювач потужності (вимірювальний)
ППП	—	пакет прикладних програм
ПС	—	перетворювач струму (нормуючий)
РПН	—	регулювання під навантаженням
СК	—	синхронний компенсатор
СКВ	—	середньо-квадратичне відхилення
ТН	—	трансформатор напруги
ТС	—	трансформатор струму
ТПР	—	трансформатор поперечного регулювання
ФСРНН	—	формувавч сигналів рівня напруги на навантаженні

ВСТУП

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

Внаслідок значної протяжності ліній електропередач від електростанцій до споживачів та багатоетапної трансформації електроенергії особливо важливе значення має підтримання норм якості електроенергії не на самих електростанціях, а безпосередньо на вводах споживачів електроенергії. Вирішення цієї задачі необхідне саме на рівні розподільчих мереж [3]. Більшість крупних споживачів потребують надійного підтримання встановленого рівня напруги на їх вводах, оскільки інші критерії (форма та частота напруги) більше впливають на втрати енергії в лініях електропередач та обладнанні підстанцій і, відповідно, в їх зменшенні зацікавлені електропостачальні організації [4, 5].

Існує кілька різновидів систем автоматичного регулювання напруги, які відрізняються способами введення регульовального впливу [6]. Однак більшість розроблених систем мають на меті регулювання за відхиленням, в той час як потрібно враховувати причину відхилення напруги від номінального значення. Комплексне вирішення питання регулювання напруги (за відхиленням та за різного роду збуреннями) дозволить збільшити надійність як електропостачання, так і обладнання розподільчих мереж та підстанцій [7].

Основним збуренням, що викликає відхилення напруги в розподільчих мережах та на вводах споживачів є зміна режиму вузла електропостачання за потужністю (активною, реактивною, повною), відповідно, для своєчасного регулювання напруги слід вводити регульовальну дію перш за все, змінюючи режим поточкорозподілу потужності через підстанцію, запобігаючи відхиленню напруги в кінці лінії [8]. Такі висновки відносяться в основному до реактивної потужності, транзит якої по лініях електропередач намагаються довести до економічно доцільного значення, використовуючи

компенсаційні пристрої. Визначене наперед значення споживаної реактивної потужності споживачів дозволить розрахувати потужність компенсаційних пристроїв або інших джерел реактивної потужності, необхідних для розв'язання задачі комплексного регулювання напруги [9].

На сучасному етапі у вітчизняних електротехнічних комплексах електропостачання планується проведення реконструкції обладнання, яка зумовлена значним рівнем зношення та наростанням споживання електроенергії. Але у зв'язку зі складним станом фінансування висувається вимога максимального використання робочого ресурсу електротехнічного обладнання, що знаходиться в експлуатації, а також оптимального використання трудових ресурсів обслуговуючого та ремонтного персоналу.

Потребує перегляду, відповідно, реалізація технічних засобів регулювання напруги розподільчих мереж та впровадження більш досконалих законів регулювання напруги. Основними засобами регулювання напруги в розподільчих мережах є силові трансформатори з пристроями регулювання під навантаженням (РПН) (з обмеженим ресурсом кількості перемикачів [10]). Ресурс механічних контактів пристрою РПН силового трансформатора порівняно малий, оскільки доводиться комутувати робочі струми. Ускладнений ремонт та перерви в електропостачанні, пов'язані з ремонтом пристроїв РПН, призводять до того, що оперативний персонал підстанцій проводить перемикання відгалужень силового трансформатора якомога рідше. Відповідно якість напруги значно знижується, а втрати від неякісного електропостачання зростають. Для покращення режиму системи електропостачання за напругою і підвищення терміну їх експлуатації вказані пристрої потрібно розвантажити від проведення зайвих перемикачів, викликаних відхиленнями напруги внаслідок складного режиму навантаження, наступними різкими змінами втрат активної та реактивної потужностей, змінами режиму системи електропостачання за потужністю (як переважаючого чинника встановленого рівня напруги в системі електропостачання), використовуючи додаткові шляхи регулювання напруги та перетоку реактивної потужності.

Однією з причин, що викликають відхилення напруги на вводах споживачів, є зміна характеру навантаження та пов'язана з нею зміна режиму системи електропостачання по реактивній потужності. Крім впливу на рівень напруги на вводах споживачів, слід підкреслити, що оплата за додатково спожиту реактивну енергію проводиться відповідно до затвердженої методики, яка передбачає основну та додаткову плату за відсутність або недостатню кількість засобів

компенсації реактивної енергії. Ефективним способом управління режимом системи електропостачання за потужністю є застосування батарей статичних конденсаторів, статичних тиристорних компенсаторів [6], але цілком поєднати і автоматизувати управління пристроями РПН та, наприклад, батареями конденсаторів в межах однієї підстанції досить складно і в більшості випадків таке регулювання розглядається і проводиться окремо. Крім того конденсаторні батареї при їх паралельному включенні (установки поперечної компенсації) застосовуються як компенсуючі, тому для широкого діапазону регулювання балансу потрібно мати певний надлишок потужності компенсуючих пристроїв, що приводить до відповідних перевитрат. При послідовній компенсації за допомогою батарей конденсаторів зменшуються лише втрати реактивної потужності, але не змінюється споживання останньої з системи електропостачання.

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

Дослідженню та створенню засобів регулювання напруги в мережах електропостачання та пов'язане з ними керування перетоками потужності відводиться велика кількість робіт вітчизняних та зарубіжних вчених. Вагомий внесок в розвиток питання оптимізації енергосистем за потоками потужності, втратами, напругою і іншими параметрами зробили вчені: К. А. Ананьєв, Я. Д. Баркан, В. А. Веніков, А. Д. Веселов, Л. А. Герман, П. П. Говоров, М. І. Гончар, В. І. Ідельчик, В. С. Клімаш, П. Д. Лежнюк, М. А. Мельніков, Б. І. Мокін, Б. С. Рогальський та ряд інших.

Відгуки, зауваження і побажання просимо надсилати за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, Видавництво ВНТУ „УНІВЕРСУМ-Вінниця”.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПОЗДОВЖНЬО-ПОПЕРЕЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ

1.1. Технічні засоби для регулювання напруги з застосуванням вольтододаткових трансформаторів

Основним засобом регулювання напруги в розподільчих мережах електропостачальних систем є трансформатори районних підстанцій, оскільки вони можуть узгодити вимоги до напруги близьких і віддалених споживачів [11–15].

Трансформатори можуть бути під'єднані в різних пунктах електричних мереж, в яких режим напруги заздалегідь, як правило, невідомий і, крім того, може змінюватись в процесі експлуатації мережі. Тому трансформатори мають крім основних ще й регулювальні відгалуження. Змінюючи ці відгалуження, можна дещо змінити коефіцієнт трансформації (в межах 10 – 20%). Як правило, регулювальні відгалуження виконуються на стороні високої напруги (ВН) трансформатора, яка має менший робочий струм. При цьому спрощується пристрій перемикачів. Додатковим засобом регулювання напруги є застосування вольтододаткових трансформаторів (ВДТ). Використання останніх дозволяє залежно від їх схеми вмикання вводити до вектора напруги мережі додаткову поздовжню, поперечну або поздовжньо-поперечну ЕРС і координувати тим самим не лише рівень напруги, а й поточкорозподіл потужності в замкнутих мережах систем електропостачання.

Трансформатори з поздовжнім регулюванням напруги під навантаженням [16], тобто з вбудованим пристроєм РПН [17–19] відрізняються від трансформаторів з перемикачів без збудження ПБЗ наявністю спеціального пристрою перемикачів, а також збільшеною кількістю ступенів регулювальних відгалужень і діапазоном регулювання.

Трансформатор поперечного регулювання (ТПР) виконаний як лінійний ВДТ, ЕРС вторинної обмотки якого зміщена відносно ЕРС основного трансформатора на 90° ел. ТПР побудований за схемою, що представлена на рис. 1.1. ТПР це окремий трансформатор, що складається з живильного трансформатора 1 та послідовного трансформатора 2. Первинна обмотка 3 живильного трансформатора отримує живлення від двох фаз обмотки НН основного трансформатора. Вторинна обмотка живильного трансформатора

виконана секціонованою, що підключається до виводу первинної обмотки послідовного трансформатора через пристрій РПН 5.

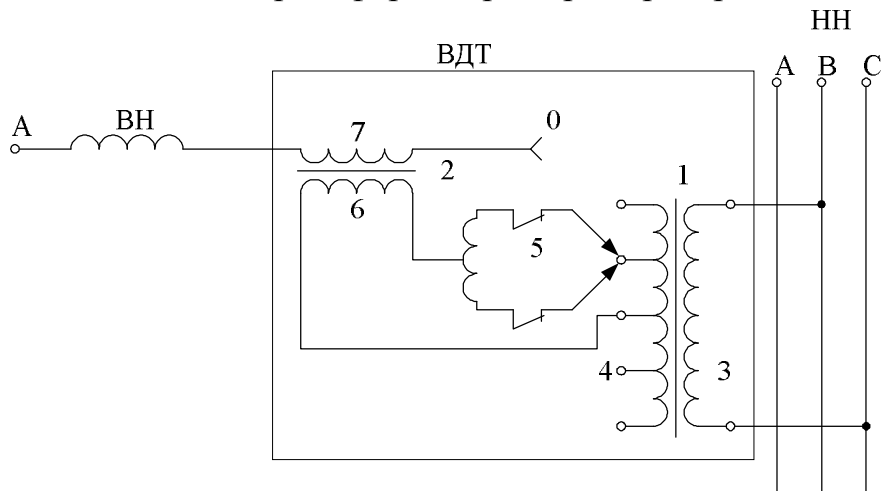


Рис. 1.1. Трансформатор поперечного регулювання з РПН

Другий вивід первинної обмотки послідовного трансформатора приєднаний до середньої точки вторинної обмотки 4 живильного трансформатора. Вторинна обмотка 7 послідовного трансформатора вмикається послідовно в нейтраль обмотки ВН основного трансформатора. Перемикання пристрою РПН проводиться за такою ж послідовністю, як і в пристроях РПН основного трансформатора [20]. Трансформатор поперечного регулювання (ТПР) застосовується для регулювання струморозподілення активної потужності [21], в мережах з трансформаторними зв'язками.

Пристрій для регулювання змінної напруги з застосуванням ВДТ запропонований в [22]. Він містить два послідовно увімкнені однофазних ВДТ, та три керованих елементи. Перший керований елемент подає напругу на первинну обмотку першого по ходу сигналу трансформатора, другий елемент, увімкнений послідовно з дроселем, зашунтовує первинну обмотку першого трансформатора. Третій керований елемент виконаний у вигляді моста з чотирьох керованих ключів. Застосування запропонованого пристрою в системах електропостачання обмежене через ускладнення виконання комутаційних елементів на високу напругу та наявність вищих гармонік, що викликані комутацією ключів в двопівперіодній схемі випрямлення.

Має місце застосування ВДТ для підвищення надійності систем регулювання напруги [23]. Функціональна схема підстанції з застосуванням ВДТ представлена на рис. 1.2. Схема підстанції, що зображена на рис. 1.6 містить основний трансформатор 1 з обмотками

високої та низької напруги 2 і 3 відповідно, ВДТ 5 з обмоткою низької напруги 4 та високої напруги 6, вимикачі 9 та 10.

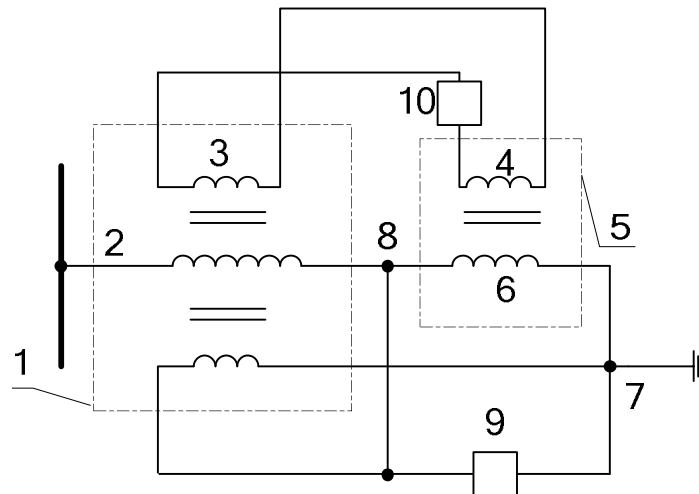


Рис. 1.2. Функціональна схема підстанції з застосуванням ВДТ для одноступеневого регулювання напруги

Обмотка 6 ВДТ включена між землею 7 і нульовою точкою 8 основного трансформатора 1. При необхідності змінити напругу на шинах підстанції, змінити коефіцієнт трансформації (наприклад, збільшити його) вимикають вимикач 10 і з невеликою витримкою часу вмикають вимикач 9. При цьому трансформатор 5 буде короткочасно (0,1 – 0,3 с) працювати в області насичення, опір обмотки ВН ВДТ різко знизиться і напруга на ній складе 1,3 – 1,5 від номінального значення. При цьому ВДТ виключається з схеми, а напруга на шинах високої напруги ПС збільшується (при постійній нарузі на шинах середньої напруги). Компонування ВДТ з основним трансформатором дозволяє уникнути зайвих перемикачів пристроїв РПН, але розглянутий в [23] пристрій не забезпечує управління ВДТ в функції керування перетоком потужності, а також має низьку точність регулювання напруги.

Врахування потужності навантаження в пристроях для регулювання напруги за допомогою силового трансформатора з РПН, дозволяє покращити якість регулювання напруги. Такий пристрій описаний в [24]. Пристрій містить три диференціюючі блоки 1–3, три тригери 4–6, елементи І 7 і АБО 8, блок 9 регулювання напруги під навантаженням, знакоаналізуючий блок 10, фазовимірювальний блок 11, телеканали зв'язку 12, блок ділення 13, формувач дозволяючого сигналу 14, трансформатор вузла навантаження 15 і лічильник напруги 16 (рис. 1.3). Перемикання відгалужень трансформатора 15 проводиться блоком 9 регулювання напруги під навантаженням з

урахуванням мінімуму втрат активної потужності, залежного від коефіцієнта завантаження двигунів, що входять до складу вузла навантаження, за допомогою блока ділення 13. При цьому здійснюється контроль стійкості системи живлення за допомогою диференціюючого блока 1, що одержує інформацію через фазовимірвальний блок 11 від телеканалів зв'язку 12. Цей же блок впливає на вхід блока регулювання напруги 9 залежно від значення параметра, виміряного блоком 11. В приведеному способі регулювання напруги хоча і враховується залежність перетоку активної потужності від величини напруги, але відсутній ефективний регулювальний вплив системи на перетікання як активної так і реактивної потужності, оскільки при зазначеному способі регулюється лише коефіцієнт трансформації силового трансформатора.

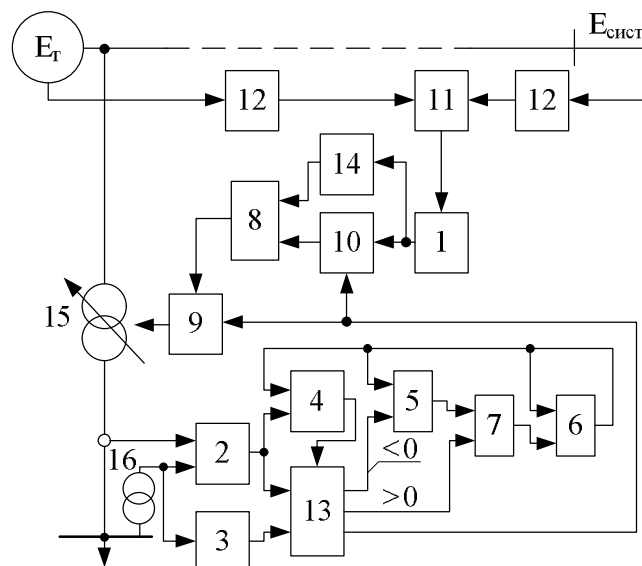


Рис. 1.3. Функціональна схема пристрою для регулювання напруги електричного вузла з двигунним навантаженням

В [25] запропоновано адаптивний пристрій для регулювання напруги, в якому ведеться пошук оптимального співвідношення між зоною нечутливості пристрою та витримкою часу на проведення перемикання. В процесі пошуку оптимальних параметрів регулювання відбувається направлений перебір різних поєднань витримок часу і зони нечутливості (в межах заданих значень), що реалізує пошук оптимального регулювання напруги; за рахунок переходу від повного перебору всіх допустимих поєднань витримки часу і зони нечутливості до направленного перебору з контролем середньоквадратичного відхилення напруги. Зазначений пристрій суттєво

поліпшує якість регулювання напруги, однак він адаптований до застосування на тягових підстанціях залізничного транспорту і не враховує струму навантаження споживачів, що виключає застосування зустрічного регулювання напруги, крім цього в алгоритмі розглянутого пристрою вводиться обмеження на проведення перемикання при перевищенні заданої кількості перемикань за добу.

Відоме застосування ВДТ для вирішення задач пофазового регулювання напруги і виконання таким чином симетрування напруги [26]. Для реалізації такого способу розроблений пристрій, що містить ВДТ з первинною обмоткою, яка виконана по схемі «зустрічний зигзаг». Система керується пристроєм, що вимірює фазні значення напруги в лінії за допомогою АЦП, шляхом комутації схем вмикання первинної і вторинної обмоток проводить регулювання і симетрування напруги в лінії. Недоліками такого способу регулювання напруги є відсутність зворотніх зв'язків за потужністю, дорога та складна у виготовленні конструкція первинної обмотки ВДТ.

Відомий пристрій для регулювання напруги [27], в якому перемикання відгалужень на підвищення напруги у вузлах навантаження проводиться не одночасно, а із зсувом в часі, причому величина зсуву рівна часу перехідного процесу зміни потужності при відхиленні напруги. Розглянутий пристрій не містить каналу вимірювання реактивної потужності та не враховує втрат потужності в лінії електропередач.

Подібний до [28] пристрій з фазовимірювальним блоком визначення кута навантаження та введеним в закон регулювання приростом визначеного кута розроблений в [28], але структура його не забезпечує прямого управління перетоком потужності та впливу на коефіцієнт потужності.

Відомі пристрої [29, 30], що застосовуються для стабілізації змінної напруги, які можуть застосовуватися і в міських мережах електропостачання і мають виконавчий елемент, виконаний у вигляді ВДТ. Схема пристрою [29] представлена на рис. 1.4. На схемі: 1 – ВДТ з вторинною 2 та первинною 3 обмотками; 4, 26 – перший та другий тиристорні ключі; 6, 14 – перший та другий синхронізуючі трансформатори; 7, 16, 24, 25 – тиристори; 8, 17 – захисні діоди; 10, 19 – захисні резистори; 12, 21 – обмежуючі діоди; 15, 23 – струмо-обмежуючі резистори; 27 – блок управління; 28 – первинна обмотка другого синхронізуючого трансформатора. При значенні напруги більшій від заданої ключ 4 відкритий, а ключ 26 закритий, при цьому

прикладається вхідна напруга до первинної обмотки ВДТ 1, чим забезпечується вольтовіднімання, якщо напруга стане меншою заданої, то тиристорний ключ 4 встановлюється в закритий стан, а первинна обмотка ВДТ 3 шунтується за допомогою ключа 26, керування яким здійснюється від блока керування 27.

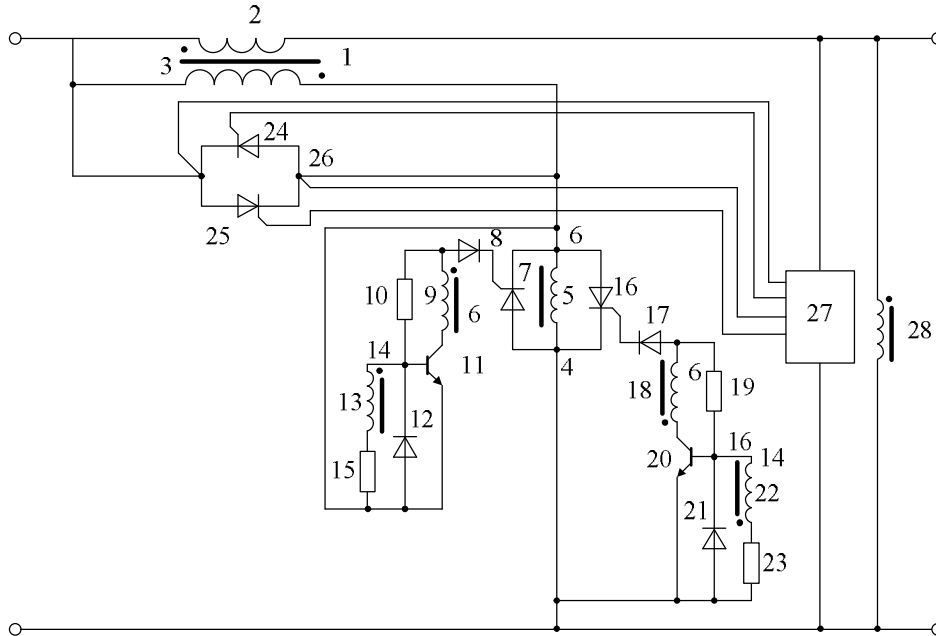


Рис. 1.4. Функціональна схема стабілізатора змінної напруги

Якщо напруга на виході пристрою має значення, що знаходиться в межах між номінальним і максимально допустимим значеннями, то тиристори ключа 26 вмикаються почергово з кутом відкриття, що залежить від величини відхилення напруги від номінального значення, при цьому форма напруги має сходинково-синусоїдну форму, в чому полягає основний недолік розглянутого пристрою, оскільки при цьому він є джерелом вищих гармонік, які безпосередньо трансформуються в мережу.

Пристрій, розглянутий в [30], відрізняється від описаного взаємним розташуванням ключів, які керують комутацією первинної обмотки ВДТ. Ключ, що вмикає ВДТ на вольтовіднімання і увімкнений послідовно з первинною обмоткою, вмикається через блок управління, а ключ, який шунтує первинну обмотку ВДТ, вмикається через схему з синхронізуючими трансформаторами, яка тотожна до представленої на рис. 1.4.

Спосіб амплітудно-фазового регулювання напруги запропонований в [31]. При невеликих відхиленнях напруги в розглянутому пристрої здійснюється фазове управління напругою (тобто змінюється

фаза вихідної напруги інвертора по відношенню до напруги мережі по сигналу від системи керування). Вихідна напруга інвертора, зменшуючись в ВДТ, накладається на напругу мережі, і збільшує напругу на виході стабілізатора до потрібного рівня. Такий пристрій не містить каналу вимірювання струму навантаження, а, отже, не забезпечить виконання зустрічного регулювання напруги.

Схожий спосіб автоматичної компенсації відхилень напруги розроблено в [32, 33]. Пристрій для реалізації цього способу відрізняється від попереднього наявністю двох інверторів, а також додаткового блока нелінійності з переналагоджуваною передавальною функцією, що коректує роботу системи керування інверторами. Останній спосіб адаптований до застосування в мережах напругою до 10 кВ із включенням ВДТ в нейтраль обмотки ВН силового трансформатора. В схемі пристрою (рис 1.5) система регулювання включена між мережею 1 і навантаженням 2. Вона містить головний трансформатор 3 з первинною 4 і вторинною 5 обмотками, ВДТ 6 з первинною 7 і вторинною 8 обмотками, тиристорний перетворювач 9 з ланкою постійної напруги, до складу якої входять два трифазні інвертори напруги 10 і 11 із загальною для них системою керування 12, реверсивний випрямляч 13 з системою керування 14, фільтр 15, а також датчик напруги навантаження 16, датчик напруги мережі 17, перемикач 18 та регульований блок нелінійності 19. В цілому робота пристрою в розглянутій системі така ж, як і в [31].

Пристрій для стабілізації напруги, запропонований в [33], має два рівні заданої напруги та інше розташування вольтододадного агрегату – не в нейтралі, а в розриві фази обмотки ВН головного трансформатора.

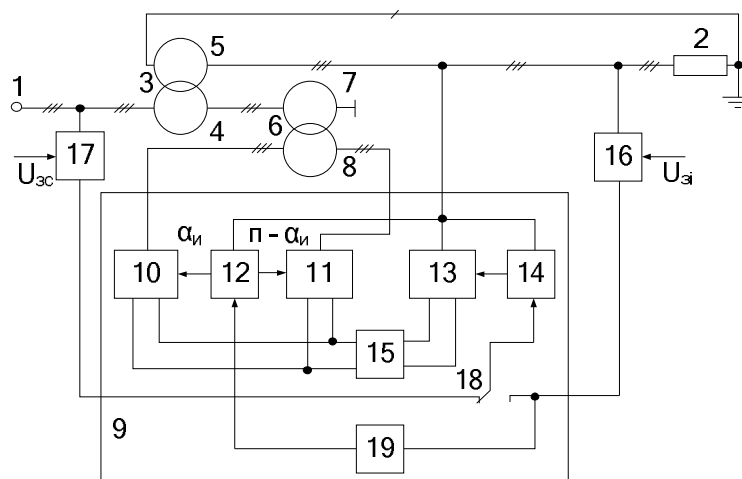


Рис. 1.5. Функціональна схема пристрою для стабілізації напруги з амплітудно-імпульсним регулюванням

Пристрій, який побудований за схожим принципом, але додатково містить канал вимірювання реактивної потужності, в залежності від якого здійснюється поперечне регулювання напруги одним ВДТ та окремий канал вимірювання напруги на навантаженні, в залежності від якого здійснюється поздовжнє регулювання напруги іншим ВДТ, розроблений в [34]. Схема пристрою показана на рис. 1.6. Пристрій містить виводи 1 і 2, трифазні ВДТ 3 і 4, батарею конденсаторів 5, перший інвертор напруги 6 з системою управління 7, виконаною за 180-градусним алгоритмом з широтно-імпульсним регулюванням поперечної складової вольтодобавки, другий інвертор напруги 8 з системою управління 9, виконаною за 180-градусним

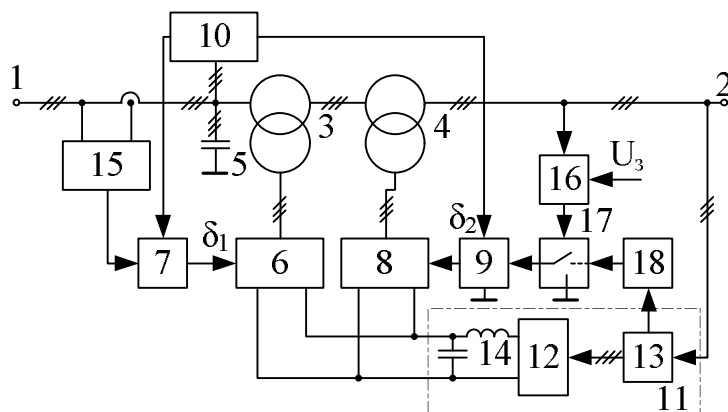


Рис. 1.6. Функціональна схема трансформаторно-тиристорного компенсатора відхилень напруги

алгоритмом з широтно-імпульсним регулюванням поздовжньої складової вольтодобавки, блок синхронізації 10, рекуперативний випрямляч 11 з керованим вентиляним блоком 12, входним автоматом 13 і вихідним індуктивно-ємнісним фільтром 14, датчик реактивної потужності мережі 15, датчик відхилення напруги навантаження 16, перемикач 17 і таймер 18. Недоліком розглянутого пристрою є наявність значної кількості тиристорів (в мостовій схемі випрямляча та двох інверторах), що суттєво ускладнює систему регулювання, робить її джерелом вищих гармонік та при застосуванні на розподільчих мережах значної потужності значно збільшує вартість.

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

В [35] представлений спосіб управління режимом електропередачі з застосуванням вольтододаткового автотрансформатора. Функціональна схема такого пристрою показана на рис. 1.7. Схема складається з автотрансформатора зв'язку 1, лінійного трансформатора (ЛТ) 2 з його обмотками збудження 4 та вторинною 3, перемикача відгалужень автотрансформатора 5, додаткових перемикачів 6–9, шини відправного кінця повітряної ЛЕП 10, повітряної лінії 11, шини приймального кінця повітряної ЛЕП 12, перемикаючого пристрою РПН 13, регулятора напруги повітряної лінії 14, датчика напруги 15, датчика величини перетікання потужності 16, каналу телекерування 17. В такому пристрої для зміни напруги ЛЕП, сформованої у функції параметрів її навантаження, використовують регульовальний діапазон РПН автотрансформаторів для регулювання збудження ЛТ. Зміна збудження ЛТ проводиться перемиканням відгалужень регульовальної обмотки РПН трансформаторів. Регульовальний діапазон РПН використовується двічі: в процесі зміни коефіцієнта трансформації автотрансформатора і в процесі регулювання збудження ЛТ.

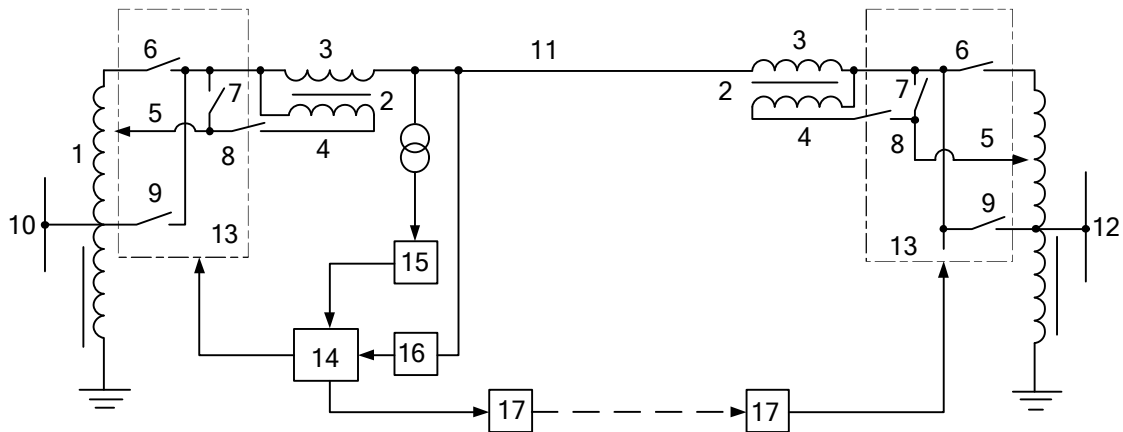


Рис. 1.7. Функціональна схема пристрою для управління режимом електропередачі

Недоліком розглянутого пристрою є відсутність обмежень на проведення перемикання пристроїв РПН вольтододаткового автотрансформатора, що приводить до їх прискореного зношення.

Спосіб регулювання напруги, що містить один трансформатор ведений і два ведучі для збільшення точності регулювання напруги на

шинах трансформаторної підстанції, описаний в [36]. Пристрій, що реалізує цей спосіб, крім типового регулятора має елемент контролю початку і закінчення циклу перемикання ведучого трансформатора і блоки управління веденими. Реалізація такого пристрою пов'язана з додатковими затратами на ведені трансформатори, які мають більшу кількість відгалужень та відповідно менший інтервал між встановленими рівнями напруги на вторинних обмотках.

В способі регулювання напруги в лініях електропередачі [37] в якості умови проведення перемикання пристроєм РПН силового трансформатора приймається відношення приросту втрат потужності на корону до втрат потужності в проводах. Втрати потужності на корону визначають як добуток сигналу від датчика напруги на встановлений коефіцієнт, що характеризує швидкість зміни втрат потужності на корону від напруги лінії, а втрати потужності в проводах лінії одержують в блоці множення як добуток збільшеного вшестеро опору фази лінії, з урахуванням сигналу датчика температури і квадрату сигналу датчика струму. Якщо сигнал, отриманий в блоці ділення і пороговому блоці від визначення відношення втрат потужності в проводах до втрат потужності на корону, більший одиниці, то за допомогою формувача формують сигнал на підвищення напруги, а якщо менший одиниці, то, за допомогою іншого формувача, – на пониження напруги. В розглянутому пристрої управляючий сигнал формується в пороговому блоці, який має уставку спрацьовування за величиною втрат активної потужності, а не напруги та струму, що суттєво знижує точність регулювання напруги, крім цього відсутні обмеження на формування вихідних сигналів при короткочасних відхиленнях напруги чи струму навантаження.

Пристрій для регулювання напруги описаний в [38], містить два канали зі збільшеною та зменшеною затримками сигналу на проведення перемикання пристроєм РПН, що дозволяє збільшити надійність системи регулювання напруги в цілому. При зміні напруги на шинах підстанції з боку навантаження регулятором проводиться перемикання відгалуження трансформатора з затримкою часу t_1 . Якщо відхилення напруги виявилось з боку мережі, то перемикання відбувається із затримкою в t_2 , яке менше t_1 . Розглянутий пристрій не має ланцюгів управління перетоком реактивної потужності, а при компенсації відхилень напруги, викликаних зміною перетоку потужності, діапазон регулювання обмежений.

Спосіб регулювання напруги в лінії електропередачі, що розроблений в [39], передбачає визначення балансу втрат потужності

в проводах до і після проведення перемикання. Згідно з застосуванням вказаного способу визначаються баланси втрат потужності в лінії до і після кожного зменшення або збільшення напруги, з отриманих балансів втрат обчислюється фактичний активний опір лінії, а втрати в лінії для режиму після зміни напруги визначаються з обчисленого фактичного активного опору лінії. В блоках пам'яті пристрою, що реалізує спосіб [39], зберігаються значення постійних коефіцієнтів пропорційності, що характеризують зміну втрат потужності на нагрів і коронних втрат при зміні напруги на $n\%$, відповідну одному ступеню регульовального пристрою. Застосування такого пристрою обмежене і має місце лише для повітряних ліній електропередач.

В [40] розроблено структуру системи автоматичного регулювання напруги з врахуванням чутливості збитків від неякісної електроенергії по відхиленню напруги в центрі живлення мережі. Недоліком такої системи, як і попередньої, є відсутність зворотних зв'язків за реактивною потужністю.

Відомий пристрій [41], що використовується для регулювання напруги в цехових мережах і системах електропостачання з низьким коефіцієнтом потужності. Функціональна схема пристрою показана на рис. 1.8.

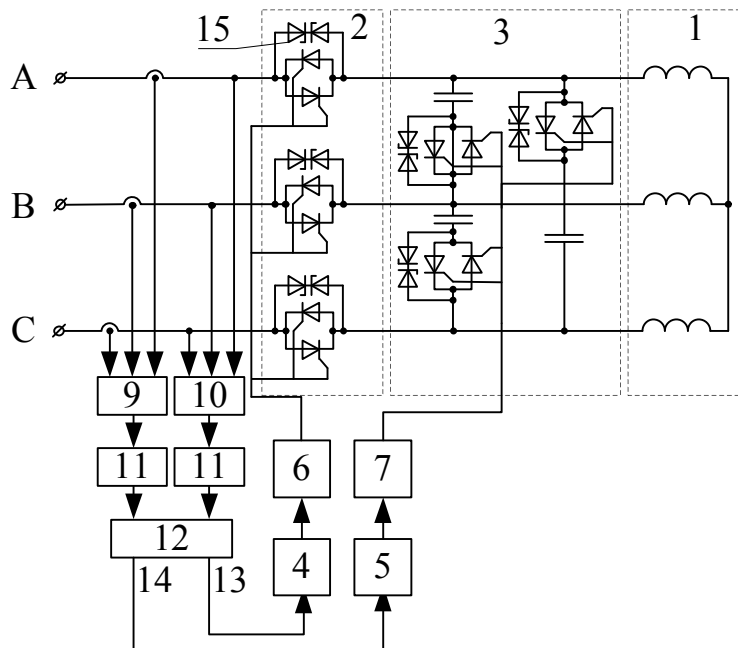


Рис. 1.8. Функціональна схема регулятора напруги

Регулятор напруги містить реактивне навантаження (індукційна піч, трансформатор) 1, керований вентиль 2 з двосторонньою провідністю, вентиль 3, паралельний реактивному навантаженню,

регулятори 4 і 5 шпаруватості імпульсів (одновібратори), формувачі імпульсів 6 і 7 (генератори Ройєра) і датчик фазового зсуву напруги і струму 8 на вході регулятора напруги. До складу датчика 8 входять датчик напруги 9, датчик струму 10, операційні підсилювачі 11 і логічний елемент І-НЕ 12, для усунення короткочасних піків комутаційних напруг вентилі шунтовані зустрічно включеними стабілітронами 15. Згідно з логікою перемикавання вентилів 2 і 3, коли збігаються знаки напруги і струму включаються вентилі 2, а вентилі 3 відключені, і навпаки, в знакозмінні інтервали вентилі 2 відключаються, а включаються вентилі 3. В результаті змінюється контур протікання реактивного струму навантаження і реактивної потужності з фази на фазу за допомогою паралельних вентилів 3 для багатофазних реактивних навантажень. Недоліком пристрою є ускладнення його використання в розподільчих мережах через складну конструкцію вентилів та генерація вищих гармонік в мережу, що викликана комутацією вентилів.

В пристрої, який розроблений в [42], регулювання напруги проводиться з урахуванням місця концентрації втрат в лінії на корону і незалежної зміни напруги на підстанції (що викликана випадковим характером навантаження). Пристрій складається з вимірювачів фазних втрат на корону, вимірювачів фазних втрат на нагрів проводів лінії, суматорів, що підсумовують фазні втрати на корону і фазні втрати на нагрів проводів, перетворювачів, пристрою множення, пристроїв обробки інформації та виконавчих механізмів, які знижують або підвищують напругу в лінії на цій підстанції. В такому пристрої відсутній зворотний зв'язок за реактивною потужністю та ефективний спосіб врахування втрат активної потужності в лінії від передачі останньої, тому динамічні властивості такої системи при роботі з змінним за характером навантаженням будуть погіршені.

Схожий до вищевказаного за структурою та задачами пристрій розроблений в [43], однак в ньому враховується величина втрат, що викликані перетіканням як активної так і реактивної потужності. Суть його роботи полягає в тому, що у разі перевищення приросту потужності втрат на корону над приростом потужності втрат в лінії на величину сигналу, сформованого в перетворювачі, через відповідний вентиль подається сигнал, що впливає на виконавчий механізм, що знижує напругу в лінії на один ступінь, в результаті зниження напруги втрати на корону зменшуються, а втрати в проводах лінії збільшуються. Вихідний сигнал в розглянутому пристрої на проведення перемикавання пристроєм РПН формується безпосередньо при виході втрат потужності за встановлені межі навіть при

короткочасному відхиленні, що приводить до зниження стійкості та надійності системи регулювання.

Комплексне вирішення питання регулювання напруги та перетоку реактивної потужності представлено в [44]. Пристрій використовується для регулювання напруги під навантаженням, а також компенсації реактивної потужності або симетрування навантаження в трифазній мережі. Робота пристрою ілюструється схемою, яка показана на рис. 1.9. Пристрій виконаний на базі центрального процесора 6, та постійно-запам'ятовувального пристрою 7, що керує трифазним ВДТ 1 (2 – первинні обмотки ВДТ, 3 – вторинні обмотки ВДТ). До його складу додатково входять датчик фази навантаження 8 регульовального органу пристрою, блок управління 9, та блок вихідних каскадів 10, блок тиристорних ключів 5. Блок центрального процесора 6 організовує роботу всієї системи програмного управління пристроєм. Застосування вищевказаного пристрою обмежене внаслідок складної конструкції тиристорного блока для високих та середніх напруг, особливо коли йдеться про його застосування в розподільчих електричних мережах, необхідності додаткового захисту тиристорів від перенапруг, що ускладнює саму систему та знижує її надійність.

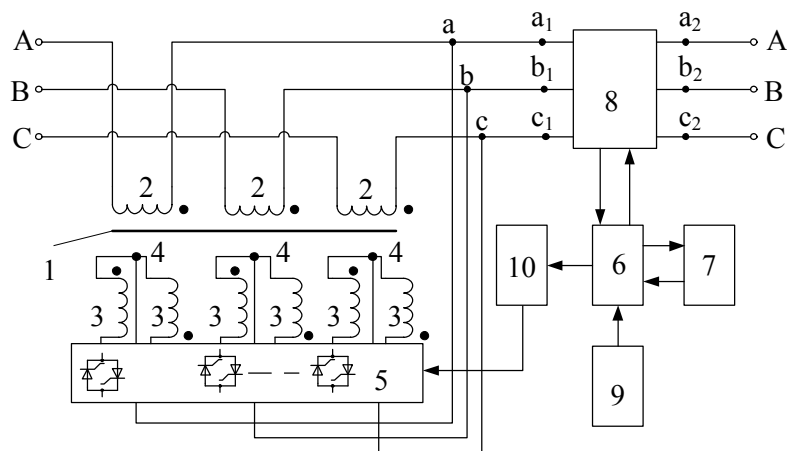


Рис. 1.9. Функціональна схема пристрою для стабілізації і регулювання параметрів електроенергії

Подібний до розглянутого пристрій з вентиляною комутацією виводів ВДТ для регулювання напруги електричної мережі запропоновано в [45]. Пристрій містить три однофазних ВДТ, кожна послідовна обмотка яких розділена на дві секції за допомогою комутуючих пристроїв (тиристорних ключів). Варіюванням

підключення первинної і вторинної обмоток трансформатора послідовного включення між фазами напруги мережі досягається регулювання напруги на виході в межах коефіцієнта трансформації останнього. Такий пристрій вимагає значної кількості комутуючих елементів та не враховує впливу напрямку вольтодобавки до напруги мережі на режим системи за потужністю.

1.3. Регулювання напруги в системах електропостачання з компенсацією реактивної потужності

Одним з пристроїв для регулювання напруги з застосуванням ВДТ для перерозподілу реактивної потужності в лініях електропередач, є пристрій [46], схема якого показана на рис. 1.10. Він призначений для застосування в системах розподілу електричної енергії для компенсації коливання напруги залежно від коливань величини навантаження і регулювання напруги в живильній мережі. Принцип роботи пристрою заснований на зміні еквівалентного опору первинної обмотки трансформатора-реактора 2 за допомогою регулювання струму в його вторинній обмотці за допомогою потенціал-регулятора 1.

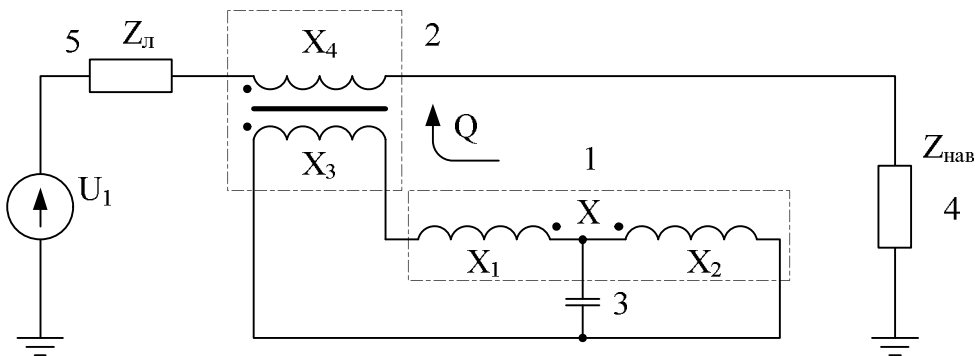


Рис. 1.10. Функціональна схема пристрою для регулювання напруги та реактивної потужності

При зміні кута магнітного зв'язку між первинною і вторинною обмотками потенціал-регулятора 1 змінюється струм у вторинній обмотці трансформатора-реактора 2 і, відповідно, опір первинної обмотки трансформатора-реактора 2. Такий пристрій не забезпечує можливості зустрічного регулювання напруги на навантаженні та пов'язаний з значними втратами в первинній обмотці трансформатора-реактора X_4 .

В пристрої [47] реалізовано спосіб вирішення регулювання напруги шляхом місцевої компенсації реактивної потужності. Пристрій містить конденсаторну батарею, що складається з послідовно сполучених секцій та керованих реакторів. Додатково до його складу входять вимикач, лінія електропередачі, блок управління реакторами з двома окремими ланками. Запропонований спосіб регулювання є компенсаційним, відповідно для широкого регулювання напруги необхідний запас потужності компенсаційних пристроїв. Крім цього не враховується величина навантаження споживачів, що не дозволяє реалізувати закон зустрічного регулювання напруги.

Відомий пристрій для стабілізації напруги в електричних системах, що описаний в [48]. Спосіб базується на фазовому регулюванні напруги. Пристрій містить послідовний реактор, конденсаторну батарею, що складається з n секцій однакової потужності, паралельний керований реактор і навантаження. Блок фазового управління керований від пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) регулятора напруги. Керований реактор плавного регулювання напруги одночасно служить елементом релейної системи дискретного регулювання напруги перемиканням ємності конденсаторної батареї і визначає її зону нечутливості областю зміни свого струму завдяки наявності порогових елементів, що спрацьовують при заданому максимальному і мінімальному струмах керованого реактора, формуючи сигнал на перемикання блоків, що комутують конденсаторну батарею від одного сигналу управління, що надходить з регулятора напруги. Наведений спосіб регулювання напруги пов'язаний з додатковими втратами в послідовному реакторі, крім цього відсутній зворотній зв'язок за потужністю, хоча сам спосіб побудований на використанні значної кількості реактивних елементів у своєму складі.

В [49] запропоновано варіанти електричної мережі, що містить ВДТ, через який відбувається компенсація відхилення напруги на споживачах, що спричинена зміною навантаження (рис. 1.11а) та зміною рівня споживання реактивної потужності (рис. 1.11б)

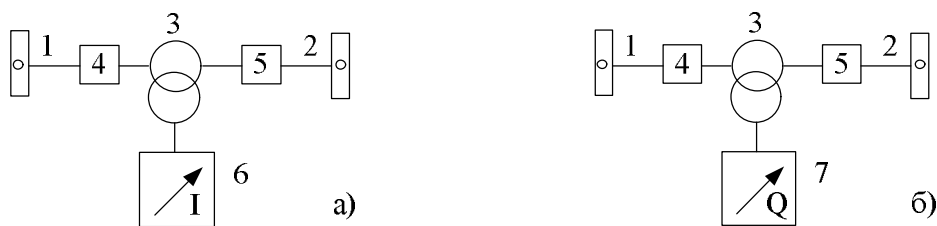


Рис. 1.11. Варіант електричної мережі з ВДТ

На рис. 1.11: 1 та 2 – системи шин електропостачання, 3 – трансформатор послідовного вмикання, 4 та 5 – комутаційні апарати, 6 – пристрій регулювання струму, 7 – регульоване статичне джерело реактивної потужності.

Відомий спосіб поздовжньо-поперечного регулювання напруги мережі [50], що застосовується для компенсації втрат напруги і реактивної потужності в протяжних електричних мережах напругою 0,4–0,69–12 кВ. Пристрій включає в себе ВДТ, батарею конденсаторів (БК), блок управління, перший і другий ключі, навантаження, формувач сигналів рівня напруги на навантаженні (ФСРНН), датчик короткого замикання і регульований резистор. Перший ключ виконаний керованим. В розглянутому пристрої при нарузі на навантаженні $U_{\text{нав}} > |U_{\text{H}} - \Delta U_{\text{H}}|$ замість застосування поздовжньої ємнісної компенсації здійснюється автоматичне переведення вторинної обмотки ВДТ на поперечне включення, при цьому БК здійснює компенсацію реактивної потужності навантаження, а ВДТ виконує роль трансформатора поперечного регулювання. Розглянутий пристрій працює тільки в режимі стабілізації напруги (не забезпечуючи зустрічного закону регулювання) та вимагає додаткових затрат на оснащення необхідною кількістю конденсаторних батарей.

Відомий ряд пристроїв, що використовуються для автоматичного регулювання напруги з врахуванням величини реактивної потужності. Пристрій, що описаний в [51], призначений для автоматичного регулювання режимів реактивної потужності вузла навантаження, являє собою програмну систему регулювання напруги та реактивної потужності за допомогою силового трансформатора з РПН, синхронного компенсатора і батарей конденсаторів. Програмне регулювання виконується за добовий період з допомогою блока примусової комутації і таймера і стандартного пристрою управління реактивною потужністю.

Автоматичний регулятор перетоку реактивної потужності, запропонований в [52]. При перевищенні сигналом значення уставки на вхід лічильника пристрою надходять імпульси, частота проходження яких залежить від величини розузгодження. За відсутності сигналу заборони лічильник відлічує ці імпульси і з витримкою часу видає команду на включення або відключення секцій КБ, яка надходить на вхід програматора. Програматор формує команди управління секціями КБ. Комутатор здійснює перетворення потенційних сигналів в релейні, які управляють виконавчими елементами (контакторами або пускачами) конденсаторної установки.

Недоліками обох розглянутих вище пристроїв є потреба в запасі

джерел реактивної потужності та відсутність зустрічного регулювання напруги на споживачах.

Одним із способів регулювання напруги за допомогою статичного компенсуючого пристрою описано в [53]. Схема цього пристрою містить блок активного струму, блок обчислення квадрату сигналу, диференціюючий підсилювач, підсилювач-суматор і датчик напруги, вимірювальні трансформатори струму та напруги, та компенсуючий пристрій, приєднаний до мережі через трансформатор. Пропонований спосіб заснований на прямій залежності активного струму лінії від взаємного кута між еквівалентними ЕРС об'єднаних енергосистем і в той же час практичної незалежності цього режимного параметра від реактивності компенсуючого пристрою.

Використовується також пристрій для комплексного управління режимом системи електропостачання, що описаний в [54, 55] і дозволяє керувати перетоками як активної, так і реактивної потужностей. Схема пристрою, що розглядається в [54] наведена на рис. 1.12. Він містить схему управління реакторами 5, блоки перемикачів реакторів 6 і 7, блок порівняння 8, блок включення елемента пам'яті 9, функціональні перетворювачі 10 і 11, логічні елементи АБО 12 і 13, І 14–16, блок знаку приросту навантаження 17, інтегрально-пропорційний блок 18, елемент пам'яті 19, обмежувач 20, суматор 21, реле 22 з контактами 23 і 24, а також датчик навантаження джерела реактивної потужності (ДРП) 25, вимірювальний трансформатор напруги шин 26 і датчики активної і реактивної потужності лінії електропередачі 27 і 28 відповідно.

На вхід блока 17 подається середня величина \bar{P} активної потужності ЛЕП. На виходах цього блока формуються сигнали, які, надходячи на входи логічних елементів І 16 і 14, деблокують команди включення і відключення реакторів, що виробляються блоками перемикачів реакторів 6, 7 і функціональним перетворювачем 10. Тим самим реалізується заборона на вмикання реакторів в період зростання навантаження лінії електропередачі 1 і їх відключення при її розвантаженні, що необхідно для забезпечення селективності дії каналу комутації, утвореного блоками 5–8, 10, 12–16 каналу управління ДРП 3, в які входять блоки 4, 9, 11, 18–21. Функціональний перетворювач 11 перетворює сигнали датчиків 25, 27, 28 і трансформатора 26 в сигнал $U_{\text{зад}}$, що є основним значенням уставки на вході автоматичного регулятора напруги 4 відповідно до закладеної в нього функціональної залежності. Пристрій забезпечує скоординоване одночасне управління реакторами (дискретними засобами) і ДРП (безперервно керований засіб).

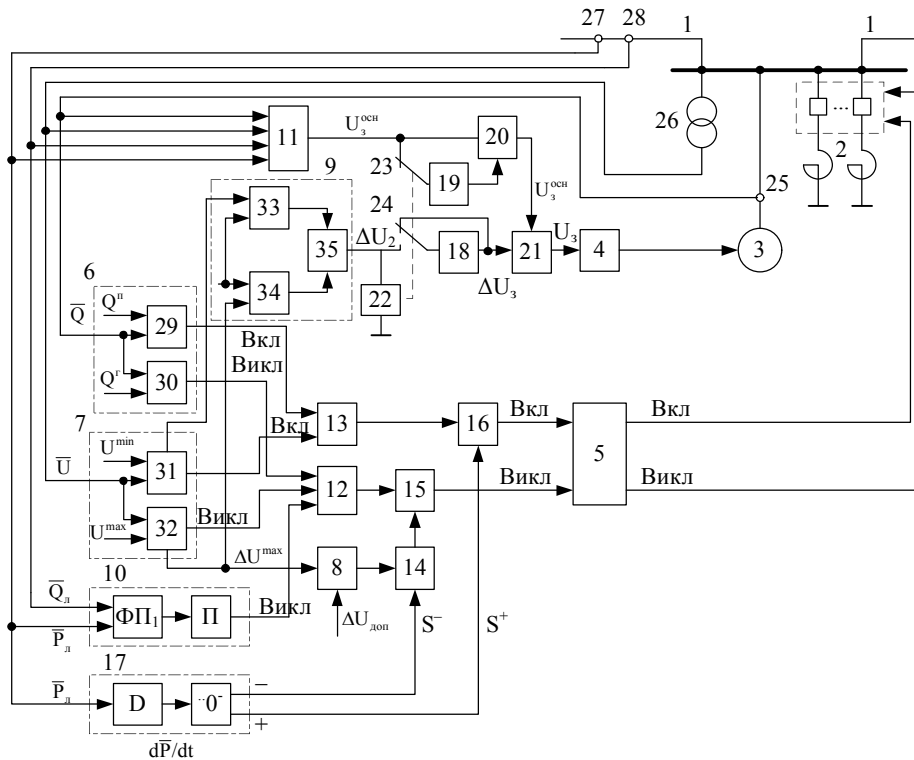


Рис. 1.12. Функціональна схема пристрою для управління режимом електричної підстанції

Спосіб управління режимом електричної підстанції, розроблений в [55] відрізняється від попереднього відсутністю похідної по активній та реактивній потужності в каналах вимірювання. В розглянутих пристроях спільним недоліком є значна кількість виконавчих елементів, що робить всю систему управління режимом підстанції складнішою в обслуговуванні, збільшує вартість системи та зменшує надійність каналів відпрацювання команд пристрою.

1.4 Поздовжньо-поперечне регулювання напруги в замкнених мережах систем електропостачання

Пристрій, який описаний в [56], має в своєму складі умову затримки сигналу на перемикання відпайки трансформатора зв'язку, що дозволяє уникнути проведення перемикання при короткочасних коливаннях навантаження на шинах паралельно працюючих підстанцій. При появі струму в лінії і зростанні напруги на затискачах трикутника ВДТ пристрій формує сигнал із встановленою затримкою в часі на збільшення коефіцієнта трансформації трансформатора

зв'язку. При стійкому зниженні струму в лінії пристрій відключає ВДТ від джерела живлення. При реверсі струму в лінії спрацьовують елементи пристрою, що підключають ВДТ до джерела живлення із зворотним чергуванням фаз. Елементи захисту служать для блокування одночасної появи управляючих сигналів на обох виходах пристрою управління ВДТ при відмовах схеми. Розглянутий пристрій не враховує відхилення напруги на споживачах, якщо воно присутнє одночасно в обох рівновіддалених вітках або у замкнутій мережі живлення.

В системах з обмеженням по перетоках потужності застосовується пристрій, що розроблений в [57]. Схема пристрою зображена на рис. 1.13.

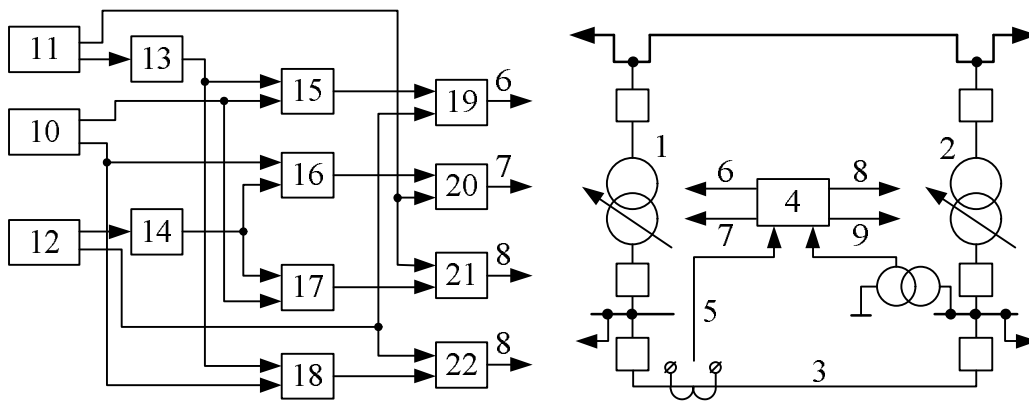


Рис. 1.13. Функціональна схема пристрою для регулювання режимів роботи трансформатора зв'язку

Пристрій складається з трансформаторів зв'язку 1 та 2, елемента контролю перетікання потужності в мережі 3, регулятора напруги 4, трансформатора струму 5, каналів управління пристроями РПН 6–9 трансформаторів зв'язку. Регулятор 4 містить в своєму складі базовий регулятор напруги 10, обмежувач струму в мережі 11 в напрямку від трансформатора 1 до трансформатора 2 і в зворотному напрямку 12 відповідно, логічні елементи НІ 13 і 14, логічні елементи І 15–18 та логічні елементи 19–22. Якщо потрібно підвищити напругу на шинах трансформаторів зв'язку, а потужність по контрольованій лінії знаходиться в допустимих межах, то в тракці регулятора проходить команда на перемикання пристроїв РПН трансформаторів 1 і 2 зв'язку у бік підвищення напруги. При необхідності підвищення напруги та зміни режиму за потужністю регулятор перемикає відгалуження тільки трансформатора 2. Пристрої РПН в описаному регуляторі проводять перемикання безпосередньо при виході струму в мережі за уставку обмежувача навіть при короточасному перевищенні струму,

що приводить до прискороного зносу пристроїв РПН і зниження надійності системи регулювання.

Спосіб регулювання напруги в електричній системі описаний в [58]. Відповідно до нього обчислюються сумарні прирости втрат по напрузі всіх точок регулювання в елементах електричної системи. При зміні напруги в точці регулювання на один ступінь обчислюється сума приростів втрат напруги в елементах системи, потім виміряне значення сумарних приростів втрат порівнюється з обчисленим значенням приростів втрат при проведенні перемикавання. Зазначений пристрій має складний алгоритм обчислення вхідних сигналів, що суттєво знижує швидкодію системи та її надійність. Крім того, в пристрої відсутній зворотний зв'язок за перетоком реактивної потужності та безпосередньо напругою на споживачах, а тому задача зустрічного регулювання не може бути вирішеною.

Відомий пристрій з принципом поперечного регулювання напруги для компенсації падіння напруги в електричній лінії, що використовується в сукупності з трансформатором, обладнаним пристроєм РПН [59]. Пристрій містить фільтр, що працює у всій смузі пропускання і призначений для моделювання складової ємності або активної повного опору лінії електропередачі, і схему 2 зсуву фаз з випередженням або затримкою фази на 90° у відповідності з характером навантаження. В такому пристрої відсутні обмеження на проведення перемикавання при короткочасних відхиленнях контрольованого спаду напруги, що з'являються внаслідок випадкового характеру навантаження трансформатора та струму відповідно.

Пристрої для поздовжньо-поперечного регулювання напруги розроблено в [60, 61]. Функціональна схема пристрою, описаного в [60] показана на рис. 1.14. До його складу входять регулювальні трансформатори 23–25, перемикаючі схеми 26–28, три пари ВДТ 31–36. Перемикаючі схеми з вентилів 5–8 виробляють сигнали на перемикавання регульованої напруги залежно від величини вихідної напруги трансформаторів. Пристрій, що розроблений в [61], відрізняється конструкцією перемикаючих схем. Наявність тиристорних ключів робить систему регулювання чутливою до перенапруг, а керування ВДТ в функції відхилення напруги на навантаженні без врахування втрат та перетікання реактивної потужності погіршує динамічні показники системи регулювання, оскільки спосіб введення регулювального впливу в зазначених пристроях викликає в першу чергу зміну саме цих параметрів.

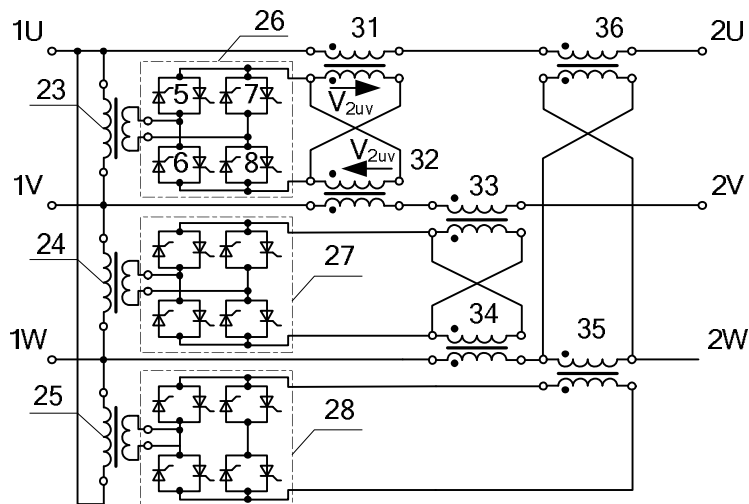


Рис. 1.14. Функціональна схема пристрою для поздовжньо-поперечного регулювання напруги

1.5. Узагальнення результатів аналізу

Аналіз існуючих варіантів для регулювання напруги силових трансформаторів зокрема та з врахуванням режиму лінії за потужністю, показав, що вони побудовані за способами, що дають можливість або підвищити якість напруги на споживачах за рахунок збільшення числа комутацій напівпровідникових ключів чи перемикачів пристроїв РПН, або підвищити надійність електропостачання за рахунок зниження якості напруги, обмежуючи кількість комутацій вказаних пристроїв. В останньому випадку особливо несприятливими є режими з значними відхиленнями напруги, що викликані зміною споживання реактивної енергії, що призводить до тривалого живлення споживачів напругою низької якості, а також негативно впливає на параметри електричної системи. В такому разі при перевантаженні системи електропостачання реактивною потужністю, споживачам електроенергії нараховується додаткова плата за спожиту реактивну потужність згідно з встановленою методикою [62, п.п. 3.4, 3.8]. В більшості ж випадків питання регулювання напруги вирішується відокремлено, без урахування режиму ліній електропередач за потужністю. Застосування тиристорних пристроїв РПН є перспективним напрямком розвитку систем регулювання напруги, але сучасне використання цих пристроїв обмежується вузлами середньої і низької напруги з невеликою потужністю трансформаторів внаслідок значної вартості напівпровідникових ключів на великі напруги і струми та відсутності їх ефективного захисту від перенапруг.

РОЗДІЛ 2

СИНТЕЗ ЗАКОНУ ТА СТРУКТУРИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО ПОЗДОВЖНЬО-ПОПЕРЕЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ

Автоматичне керування режимами напруги та потужності в мережах електропостачальних систем забезпечується пристроями, що застосовуються окремо або в комплексному поєднанні: трансформаторами з пристроями РПН; ВДТ поздовжнього та поздовжньо-поперечного вмикання, батареями конденсаторів, увімкненими за схемами поздовжньої та поперечної компенсації; синхронними компенсаторами та статичними тиристорними компенсаторами, що розташовані в розподільчій мережі, але переважно в місцях сукупного розташування основного обладнання для спрощення обслуговування, заміни чи ремонту [63–66].

2.1. Вплив поперечного регулювання напруги на режим мереж за потужністю

При застосуванні поздовжньо-поперечного регулювання напруги на ділянці замкненої системи електропостачання (рис. 2.1), яка рекомендується в [67] коефіцієнт трансформації є комплексною величиною, а тому його значення впливатиме на розподіл потужностей в електропостачальній системі та режим напруг в ній [64]. Дослідження впливу поперечного регулювання напруги на поточкорозподіл активної та реактивної потужностей в петльовій схемі електропостачання з кабельною лінією електропередач (ЛЕП) на стороні низької напруги та повітряною ЛЕП на стороні високої напруги проведено з використанням пакета програм *AUtoCAD* (додаток А).

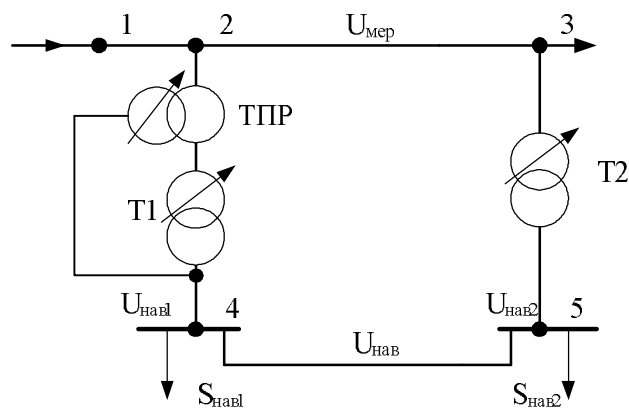


Рис. 2.1. Схема фрагмента системи електропостачання до дослідження впливу поперечного регулювання напруги

Знайдені залежності активної та реактивної потужностей від значення коефіцієнта трансформації ТПР (рис. 2.2) відображують вплив поперечного регулювання напруги на потекорозподіл потужностей.

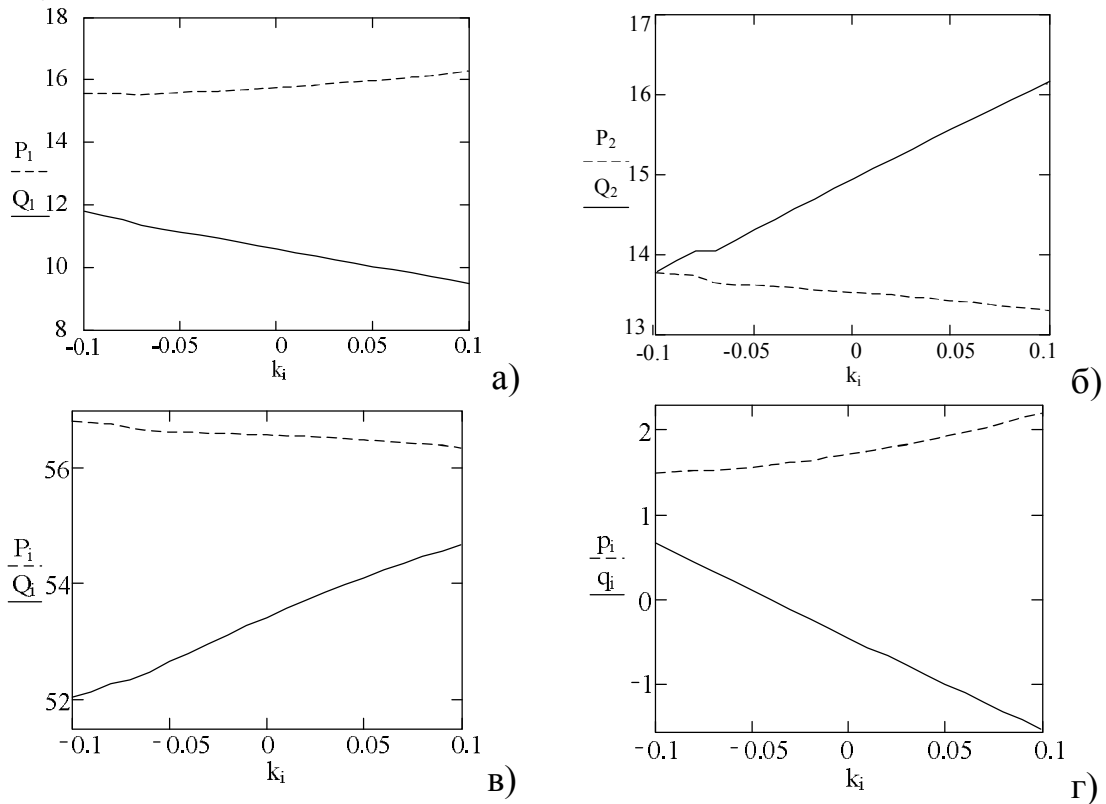


Рис. 2.2. Залежності перетоків активної та реактивної потужностей (МВт, МВАр) через трансформатори Т1 (а) та Т2 (б) і на ділянках 2–3 (в) високої, 4-5 (г) низької напруг від реактивного коефіцієнта трансформації Т1

Згідно з наведеними залежностями (рис 2.2) для розглянутої схеми системи електропостачання встановлено, що приріст перетоку реактивної потужності на всіх ділянках більший, ніж приріст перетоку активної потужності.

При введенні поперечної ЕРС, яка зміщена відносно вектора напруги мережі на $\pi/2$ рад., до обмотки ВН силового трансформатора системи електропостачання прикладатиметься геометрична сума векторів напруги мережі та поперечної ЕРС (рис. 2.3). Така дія викличе зміну амплітуди та фази струму первинної обмотки силового трансформатора по відношенню до напруги мережі, а також напруги та струму вторинної обмотки. При встановленому навантаженні кут між векторами напруги та струму навантаження та обмотки НН

силового трансформатора відповідно визначається співвідношенням активних та реактивних опорів ліній електропередач та навантаження.

Якщо в режимі навантаження силового трансформатора знехтувати опором вітки намагнічування, то амплітуда та фаза струму первинної обмотки силового трансформатора визначатимуться еквівалентним комплексним опором, що відповідає сумі комплексних опорів первинної обмотки, приведених опорів вторинної обмотки, ліній електропередач та навантаження. Однак струм, який споживається з живильної мережі, протікає через місце введення додаткової ЕРС та первинну обмотку трансформатора один і той же. Тому при постійному навантаженні та введенні в деякий момент часу додаткової ЕРС матиме місце зміщення вектора струму первинної обмотки відносно вектора напруги мережі в той час як кут між векторами напруги та струму обмотки ВН залишиться практично незмінним. В результаті струм спожитий з мережі буде зсуватися відносно вектора напруги мережі на кут, що визначається величиною введеної додаткової поперечної ЕРС. Такий зсув споживаного струму в напрямку наближення до вектора напруги мережі еквівалентний появі ємнісної складової струму I_{1pc} (рис. 2.3), яка випереджає вектор напруги мережі на $\pi/2$ рад. Величина ємнісної складової струму визначається величиною введеної додаткової ЕРС і прямопропорційна їй. Внаслідок появи ємнісної складової струму мережі в точці введення додаткової ЕРС змінюватиметься співвідношення активної та реактивної потужностей, які протікають в контурах системи електропостачання [67]. Розрахунок впливу поперечної ЕРС на приріст перетоку активної та реактивної потужностей наведено в додатку Б.

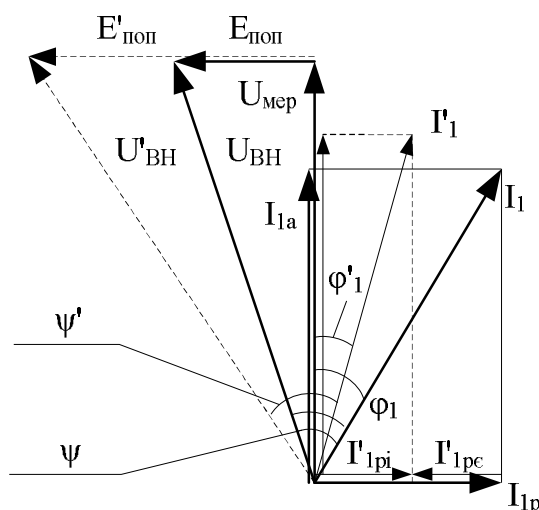


Рис. 2.3. Зміна кута φ між векторами I_1 та $U_{мерp}$ при введенні поперечної ЕРС

На рис. 2.3: ψ – кут зсуву між фазами напруги на первинній обмотці трансформатора та струмом у ній, ϕ_1 – кут зсуву між фазами напруги мережі та струмом у ній).

2.2. Синтез закону позовжньо-поперечного регулювання напруги

Відповідно до розглянутого впливу поперечного регулювання напруги з метою вирішення питання комплексного регулювання напруги з врахуванням режиму системи електропостачання за потужністю доцільно одночасно застосувати обидва способи регулювання – безпосередньо напруги за допомогою трансформатора з пристроєм РПН та режиму системи електропостачання за потужністю за допомогою ТПР. Структурна схема такого електротехнічного комплексу показана на рис. 2.4.

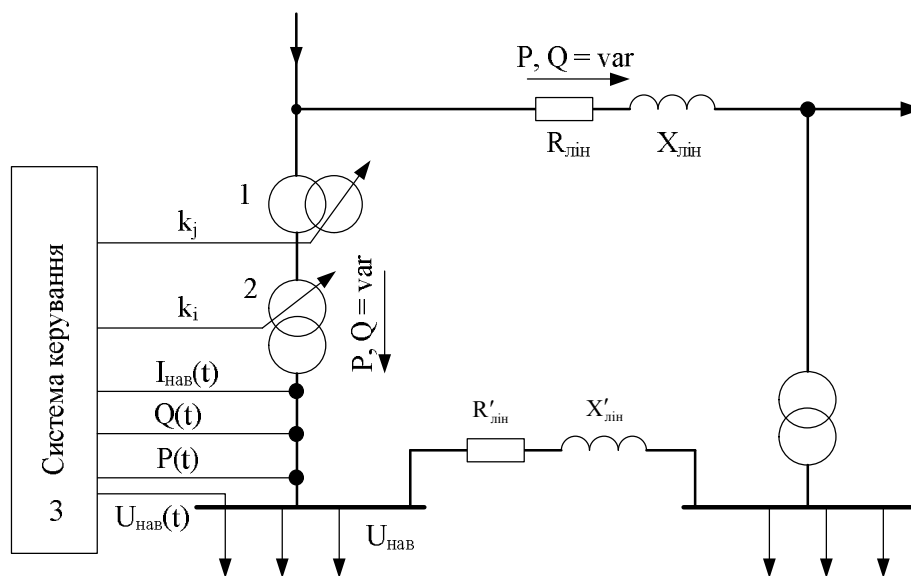


Рис. 2.4. Структурна схема системи електропостачання з трансформатором поперечного регулювання та силовим трансформатором з РПН

На рис. 2.4: 1 – трансформатор поперечного регулювання (ТПР), 2 – силовий трансформатор з РПН, 3 – система керування).

Оскільки основні регулювальні органи в системах електропостачання мають дискретну дію (такі як пристрої РПН тощо), то для запису закону регулювання аналітичної функції на вимірювальному вході регулятора та його статичної характеристики недостатньо. Найбільш зручним та прийнятним способом запису

законів регулювання є спосіб, що запропонований в [68], в якому поєднуються функція, що формується на вимірjuвальному органі регулятора, та логічні умови формування регулювального впливу.

Типовим законом регулювання напруги за допомогою пристрою РПН вважається закон «зустрічного регулювання». Найбільш досконалим можна виділити закон «зустрічного регулювання», що має в своєму складі похідну напруги в часі та визначає час запізнення регулювальної дії, необхідний для уникнення хибних перемикань РПН при короткочасних збуреннях. Вираз цього закону подамо у вигляді:

$$u(t) = k_1 \cdot [(U_{\text{iaa}}(t) - U_{\text{o}}) - k_2 \cdot (I_{\text{iaa}}(t) - I_{\text{min}})];$$

$$k_i = \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{\text{ii}}}, \text{ \textcircled{&}} \begin{cases} u(t) < u_{\text{ic}}, \\ u(t - \tau) < u_{\text{ic}}, \\ \frac{dU_{\text{iaa}}(t)}{dt} < 0, \end{cases} \\ \frac{U_i}{U_{\text{ii}}}, \text{ \textcircled{&}} u_{\text{ic}} \leq u(t) \leq u_{\text{ac}}, \\ \frac{U_{i-1}}{U_{\text{ii}}}, \text{ \textcircled{&}} \begin{cases} u(t) > u_{\text{ac}}, \\ u(t - \tau) > u_{\text{ac}}, \\ \frac{dU_{\text{iaa}}(t)}{dt} > 0, \end{cases} \end{cases} \quad (2.1)$$

де k_i – коефіцієнт трансформації на i -у відгалуженні обмотки ВН; $U_{\text{зад}}$ – задане значення напруги на виводах споживачів; $U_1(t)$ – дійсне значення напруги на виводах споживачів; U_i – ЕРС, що індукується в обмотці ВН на i -у відгалуженні; k_1 – коефіцієнт, що характеризує чутливість регулятора напруги; k_2 – коефіцієнт, що визначає нахил характеристики зустрічного регулювання напруги; $k_2 = 0,05 \cdot U_{\text{ном}} / (I_{\text{max}} - I_{\text{min}})$ [69]; I_{min} – струм навантаження в режимі мінімуму; $I(t)$ – фактичне значення струму навантаження; $\frac{dU(t)}{dt}$ – похідна обвідної контрольованої напруги; $U_{\text{вз}}$; $U_{\text{нз}}$ – верхня та нижня границі зони нечутливості, що задаються, виходячи з умов надійності та точності підтримання напруги.

Пристрій для перемикання відгалужень вторинної обмотки ТПР за будовою тотожний пристрою РПН [21]. Отже, алгоритм управління ним є близьким до алгоритму управління РПН, але слід врахувати, що розподіл активної та реактивної потужностей в системі електропостачання, лінійно залежить від величини напруги на

виводах ТПР ($P(t) \sim U_x(t)$) згідно з рис. 2.2). Тому, якщо розглядати ТПР як відокремлену ланку електротехнічного комплексу для поздовжньо-поперечного регулювання напруги, то найбільш доцільним законом для його управління був би закон (2.1), де в якості регульованого параметра виступали б активна P та реактивна Q потужності на контрольованій ділянці системи електропостачання:

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

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

де $U_x(t)$ – напруга на виході ТПР (поперечна складова напруги на обмотці ВН основного трансформатора); U_j – ЕРС, що індукується в живильній обмотці ТПР на j -у відгалуженні; k_j – коефіцієнт трансформації на j -у відгалуженні ТПР; $Q_{\text{зад}}$ – задане значення реактивної потужності, що визначає стійкий режим мережі з мінімальними відхиленнями напруги у вузлах електропостачання; k_3 – коефіцієнт, що враховує чутливість пристрою автоматичного керування положенням РПН ТПР; k_4 – коефіцієнт, що визначає вагу активної потужності в формуванні регульовального впливу за допомогою ТПР; $\frac{dQ(t)}{dt}$ – похідна обвідної реактивної потужності, яка перетікає через контрольовану ділянку системи електропостачання.

Накладення додаткових умов на формування регульовальної дії за реактивною потужністю обумовлено особливістю транспортування реактивної енергії вздовж ліній електропередач, що протікає з значними втратами, які значно більші порівняно з втратами активної потужності [13].

Для системи керування електротехнічним комплексом (рис. 2.4) закон управління можна синтезувати з законів (2.1) та (2.2). При цьому слід зауважити, що в замкнених системах електропостачання з

використанням поздовжнього регулювання напруги різко змінюватиметься перерозподіл потужностей між паралельно працюючими підстанціями [64]. Регулювальний вплив за допомогою поздовжньої складової регульованої напруги слід вводити з огляду як на відхилення напруги від заданого значення, так і на відхилення потужності.

$$u_y(t) = k_1 \cdot [(U_{i\dot{a}\dot{a}}(t) - U_{\dot{o}}) - k_2 \cdot (I_{i\dot{a}\dot{a}}(t) - I_{\min})]; \quad u_x(t) = k_3 \cdot [(Q_{\dot{c}\dot{a}\dot{a}} - Q(t)) + k_4 \cdot (P(t) - P_{\dot{c}\dot{a}\dot{a}})];$$

$$k_i = \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{ii}}, \text{ \u044e\u0442\u0456} & \begin{cases} u_y(t) < u_{i\dot{c},y}; \\ u_y(t - \tau) < u_{i\dot{c},y}; \\ \frac{dU_{i\dot{a}\dot{a}}(t)}{dt} < 0; \end{cases} \\ \frac{U_i}{U_{ii}}, \text{ \u044e\u0442\u0456} & u_{i\dot{c},y} \leq u_y(t) \leq u_{\dot{a}\dot{c},y}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{ii}}, \text{ \u044e\u0442\u0456} & \begin{cases} u_y(t) > u_{\dot{a}\dot{c},y}; \\ u_y(t - \tau) > u_{\dot{a}\dot{c},y}; \\ \frac{dU_{i\dot{a}\dot{a}}(t)}{dt} > 0; \end{cases} \end{cases} \quad k_j = \begin{cases} \frac{U_{j+1}}{U_{\dot{a}i}}, \text{ \u044e\u0442\u0456} & \begin{cases} u_x(t) < u_{i\dot{c},x}; \\ u_x(t - \tau) < u_{i\dot{c},x}; \\ \frac{dQ(t)}{dt} > 0; \end{cases} \\ \frac{U_j}{U_{\dot{a}i}}, \text{ \u044e\u0442\u0456} & u_{i\dot{c},x} \leq u(t) \leq u_{\dot{a}\dot{c},x}; \\ \frac{U_{j-1}}{U_{\dot{a}i}}, \text{ \u044e\u0442\u0456} & \begin{cases} u_x(t) > u_{\dot{a}\dot{c},x}; \\ u_x(t - \tau) > u_{\dot{a}\dot{c},x}; \\ \frac{dQ(t)}{dt} < 0. \end{cases} \end{cases} \quad (2.3)$$

Для проведення перемикання пристроєм РПН ТПР в напрямку збільшення вольтдобавки потрібно виконання таких умов: значення перетоку активної потужності нижче заданого значення, при цьому значення реактивної потужності перевищує верхню межу зони нечутливості за реактивною складовою і не має тенденції до повернення в зону нечутливості протягом деякого часу τ .

Перемикання в напрямку зменшення вольтдобавки (або її збільшення у протилежному напрямку) вказаним пристроєм проводиться при виконанні зворотних умов. Одночасно з проведенням перемикання відгалужень ТПР буде змінюватися напруга на вводах споживачів за залежністю, близькою до поданої на рис. 2.6, тому потрібно вводити поздовжнє регулювання напруги для компенсації відхилень на вводах споживачів. Умови для проведення перемикання пристроєм РПН силового трансформатора доцільно сформулювати такими ж, як і в (2.2). Такі умови забезпечують зустрічне регулювання напруги з виключенням імовірності проведення помилкових перемикань внаслідок короткочасних збурень за напругою на вводах споживачів.

2.3. Вибір математичного апарату, придатного для розв'язання задачі

З формули (2.3) випливає, що закон керування перемикаючим пристроєм РПН силового трансформатора досить складний і має дискретну форму, оскільки первинна обмотка силового трансформатора та обмотка живлення ТПР (рис. 1.6) має певну кількість регулювальних відгалужень з відповідним кроком зміни напруги. Тому синтез структури регулювального пристрою проводимо в два етапи: синтез дискретно-логічної частини та синтез вимірювальних кіл.

Моделі кінцевих автоматів є необхідними засобами представлення функціонування багатьох систем керування різними об'єктами. Однак класичні мови їх задання (діаграми Вейча, Карно) не завжди виявляються зручними для опису цих систем, оскільки містять багато проміжних станів, які існують теоретично і підлягають мінімізації в процесі їх перетворень. Тому для синтезу структури системи автоматичного регулювання напруги на силовому трансформаторі доцільно застосовувати апарат секвенцій [71, 72].

Апарат секвенційного опису є таким же універсальним, як і класична мова кінцевих автоматів у вигляді автоматного графа або автоматних таблиць, однак цей опис є більш компактним. Мова секвенцій дає змогу достатньо просто перейти до структури, яка будується безпосередньо за описом. Цим вона вигідно відрізняється від інших автоматних мов.

При використанні апарату секвенцій кожна складова частина складного логічного вислову записується у такому вигляді [71]:

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

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

Секвенційний запис (2.4) можна інтерпретувати так: вислів ψ істинний, коли істинний вислів φ . Запис виду (2.4) можна використовувати для опису кінцевого автомата з пам'яттю. Для цього знадобляться два таких види секвенцій, які відповідають функціям переходів δ і λ кінцевого автомата:

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

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

де Q – кількість розрядів коду вхідних символів; r – кількість розрядів коду станів; v – кількість розрядів коду вихідних символів; $\tilde{s}_{i_p}, \tilde{s}_{j_p}$ – значення кодових змінних вхідних символів ($t = 1, \dots, Q$); $\tilde{s}_{i_p}, \tilde{s}_{j_p}$ – значення кодових змінних станів ($p = 1, \dots, r$); \tilde{y}_{k_w} – значення кодових змінних вихідних символів ($w = 1, \dots, v$).

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

Співвідношення (2.5) і (2.6) описують закон появи сигналів на зовнішніх і внутрішніх виходах логічного перетворювача. Якщо в склад системи регулювання входять елементи часової затримки сигналів, то ці елементи можна представити за допомогою часових булевих функцій [73], які визначаються з виразів:

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

де τ – змінна часу; t – поточне значення часу; T – поріг часу.

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

На підставі синтезованого закону (2.3) проведемо синтез цифрової частини структури одного каналу регулятора, який здійснює управління пристроєм РПН ТПР і дозволяє запобігти відхиленням напруги у вузлах системи електропостачання, що викликані змінами в усталених значеннях перетоків активної та реактивної потужностей. В остаточній структурі регулятора цифрова частина другого каналу – прямого регулювання напруги на навантаженні – буде тотожна до синтезованої, оскільки логічні умови для відповідного проведення перемикання пристроєм РПН силового трансформатора є схожими до умов перемикання РПН ТПР.

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

Скористаємось математичним апаратом секвенцій [71], який дозволяє створювати компактні представлення та безпосередньо з математичних виразів отримати синтезовану структуру. Позначимо через y_1 та y_2 вихідні змінні регулятора, які відповідають сигналам на перемикання, що надходять від регулятора на пристрій РПН ТПР.

Сигнал u_1 повинен мати місце при збільшеному значенні реактивної потужності та зменшеному у співвідношенні значенні активної потужності і направлений на перемикання пристрою РПН вказаного трансформатора в сторону зменшення коефіцієнта трансформації і, відповідно, збільшення поперечної вольтдобавки. Сигнал u_2 формується для перемикання пристрою РПН ТПР в зворотному напрямку. Сигнали u_1 та u_2 повинні бути імпульсними, причому кожному сигналу на перемикання пристрою РПН має відповідати один імпульс на відповідному виході регулятора. Згідно з таким зауваженням в структурі регулятора передбачається наявність генератора тактових імпульсів (ГТІ), що побудований на тригері T_1 . Генератор формує імпульси з тривалістю τ_1 та паузою між ними τ_2 (значення тривалості імпульсів та їх періоду задаватимуться елементами часової затримки в структурі регулятора відповідно τ_1 та τ_2).

Для проведення перемикання з одного положення пристрою РПН в інше (наприклад з k_j в k_{j-1}) необхідний час, який обумовлений інерційністю механічних ланок системи регулювання та послідовністю проведення самого перемикання. За цей час параметри системи електропостачання змінюються і для запобігання появи чергової команди на будь-якому виході регулятора під час циклу перемикання слід збільшити тривалість між тактовими імпульсами на величину, що не менша тривалості одного циклу перемикання. Отже, ГТІ повинен працювати в двох різних режимах – режимі очікування (з нормальною паузою між імпульсами τ_2) та режимі перемикання (зі збільшеною тривалістю між тактовими імпульсами – близько $3 \cdot \tau_2$). Тому для задання циклу обробки даних в регуляторі в режимі перемикання необхідно використати тригер T_2 , що формує імпульси з тривалістю τ_1 і проміжком між ними $3 \cdot \tau_2$. По закінченню циклу перемикання регулятор переходить в початковий стан S_0 після надходження від пристрою РПН сигналу про завершення перемикання D (*done*). Таким чином, якщо регульований параметр знаходиться в зоні нечутливості ($U_x(t) \in [U_{нз.х}; U_{вз.х}]$), то з імпульсом τ_1 регулятор переходить в стан S_1 , а з його закінченням повертається у вихідний стан S_0 . Входам регулятора згідно з запропонованим законом регулювання (2.2) відповідають змінні:

– L (*low*) – сигнал напруги на вимірювальному вході тракту поперечного регулювання менший встановленої зони нечутливості, ($U_x(t) < U_{нз.х}$);

- H (*high*) – сигнал напруги на вимірювальному вході тракту поперечного регулювання більший встановленої зони нечутливості ($U_x(t) > U_{вз.х}$);
- DN – похідна регульованого параметра менша 0, ($dQ/dt < 0$);
- DP – похідна регульованого параметра більша 0, ($dQ/dt > 0$);
- DZ (*derivative zero*) – похідна регульованого параметру рівна 0, ($dQ/dt = 0$);
- B (*blocking*) – сигнал блокування і зупинки регулятора (формується під дією команди на перемикання в відповідному напрямку, коли РПН знаходиться в крайньому положенні або в ручному режимі при виникненні аварійної ситуації);
- R (*reset*) – сигнал, що відповідає увімкненому стану регулятора і працюючому ГТІ.

Для управління режимом роботи ГТІ (перемикання чи очікування) і встановлення останнього в режим перемикання під дією появи вихідних сигналів y_1 або y_2 введемо тригер T_3 . Для запам'ятовування знаку похідної регульованого параметра при виході його за зону нечутливості протягом часу затримки сигналу перемикання (що рівний τ_2) введемо відповідно тригери T_4 та T_5 .

З врахуванням наведених тверджень граф функціонування каналу управління ТПР в регуляторі, що реалізує закон (2.2), матиме вигляд, поданий на рис. 2.5.

Граф функціонування системи приведено в формі аналітичного запису, використовуючи секвенційний запис залежностей станів графа.

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

З врахуванням, що кожному із станів графа відповідають такі стани введених тригерів (2.9):

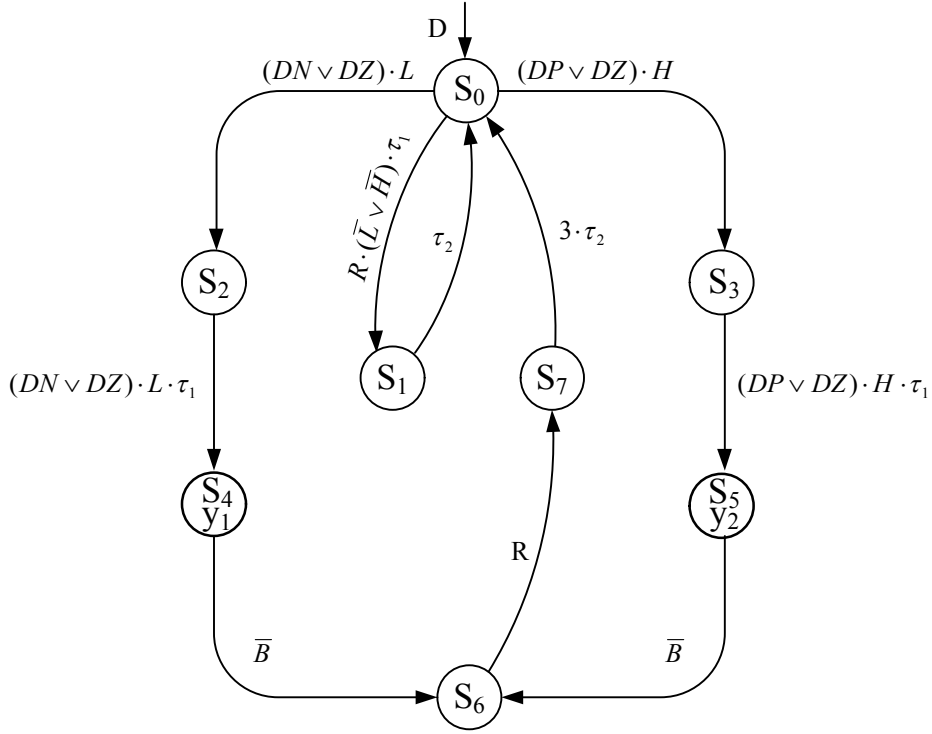


Рис. 2.5. Граф функціонування каналу управління пристроєм РПН трансформатора поперечного регулювання

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

Підставивши вирази (2.9) в систему (2.8) проведемо їх мінімізацію згідно з [71]. В результаті отримаємо систему секвенцій (2.10).

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

На основі мінімізованої системи секвенціальних виразів (2.10) синтезуємо структурну схему каналу регулятора напруги.

Перший етап синтезу полягає в побудові функціональної схеми, яка реалізує систему секвенціальних рівнянь (2.10). Кожна з цих секвенцій реалізується схемою збігу, на входи якої подаються сигнали, що відповідають кодовій комбінації лівої частини секвенції, і двостабільним елементом, до входу якого через діодну матрицю під'єднаний вихід системи збігу. Якщо код стану двостабільного елемента в правій частині секвенції не має знаку інверсії, то вихід схеми збігу з'єднується з прямим входом двостабільного елемента. При наявності інверсії в коді стану вихід схеми збігу з'єднується з інверсним входом двостабільного елемента [72].

Із врахуванням наведених зауважень, остаточну структурну схему автоматичного регулятора отримують, використовуючи метод структурно-логічного синтезу для аналогових каналів вимірювання регульованих параметрів [73]. Крім цього у вказаній структурній схемі взаємозв'язки між елементами та їх сукупність повинні відповідати існуючій елементній базі схемотехніки [74, 75]. Аналогові канали вимірювання у синтезованому регульовальному пристрої розроблені для трьох параметрів, що забезпечують виконання закону регулювання (2.2). До них належать: канал вимірювання перетоків активної та реактивної потужності, канал вимірювання напруги на навантаженні та струму навантаження вузла електропостачання [76].

2.5. Реалізація синтезованої структури системи автоматичного керування

На підставі цієї структурної схеми (рис. 2.7), остаточну структуру регулятора напруги отримаємо, доповнюючи її каналом управління пристроєм РПН трансформатора, що тотожний синтезованому, та необхідними аналоговими ланцюгами обробки інформації від вимірювальних перетворювачів. З врахуванням існуючої елементної бази схемотехніки [75, 77] схема регулятора напруги, який реалізує закон (2.3) матиме вигляд, показаний на рис. 2.8. На схемі (рис. 2.8): 1 – вимірювальний трансформатор напруги системи електропостачання; 2 – вимірювальний перетворювач струму системи електропостачання; 3, 32 – елементи НІ; 4, 10, 33, 39 – елементи АБО; 5, 9, 13, 24, 25, 26, 34, 38, 42, 52, 54, 55 – елементи І; 6, 27, 35, 56 – блоки пам'яті; 7, 36 – блоки визначення похідної обвідної вхідного сигналу; 8, 37 – блоки визначення знаку похідної; 11, 21, 40, 50 – перетворювачі.

чі імпульсного сигналу в потенційний; 12, 22, 41, 51 – блоки часової затримки; 14, 23, 43, 53 – підсилювачі регулятора; 15 – блок множення; 16, 45 – блоки формування і зміни зони нечутливості; 17, 46 – блоки формування і зміни уставки регулятора; 18, 47 – порогові блоки; 19 – фазовий детектор; 20 – блок обчислення тригонометричної функції [78].

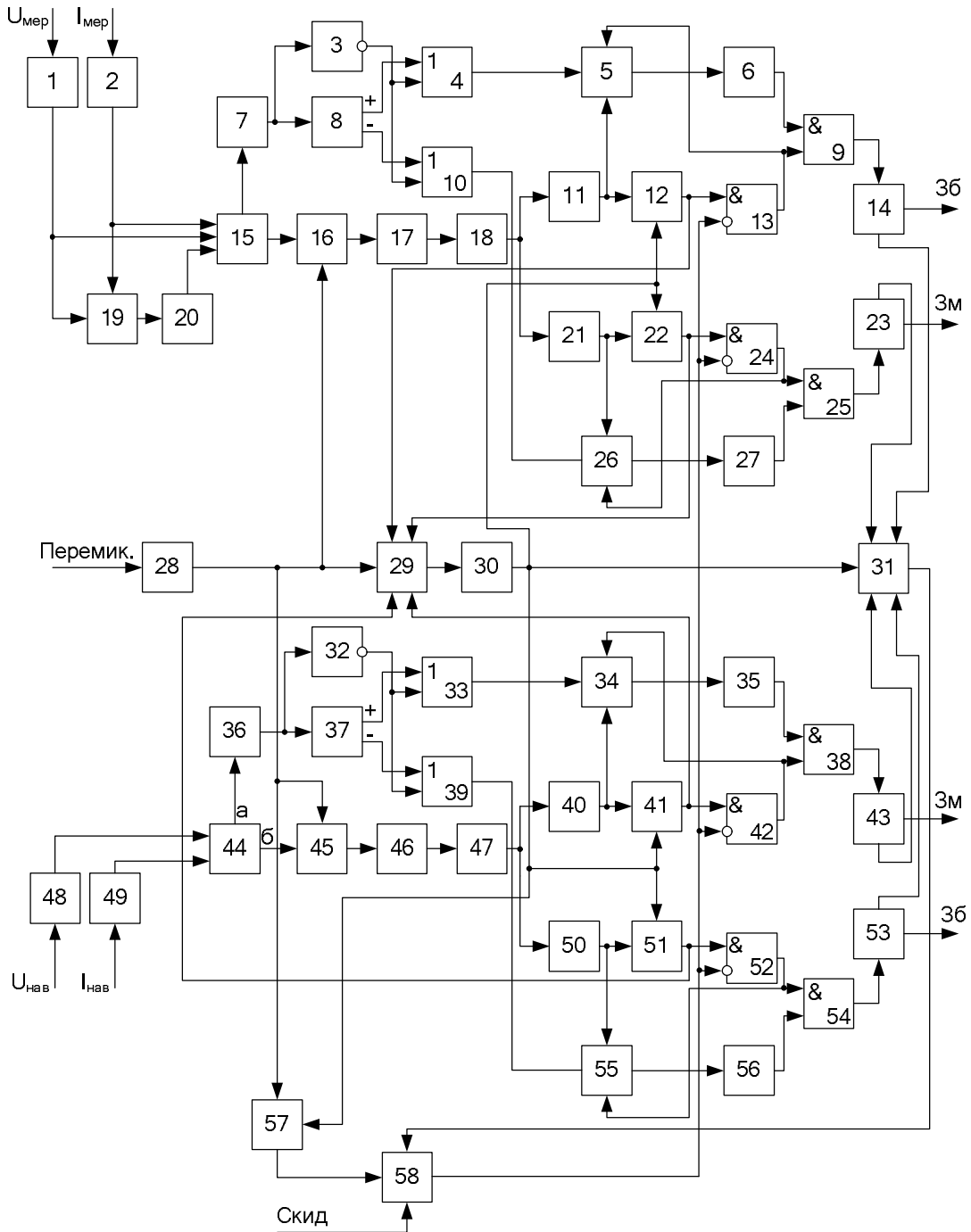


Рис. 2.8. Структурна схема регулятора в системі поздовжньо-поперечного регулювання напруги

Синтезований регулятор напруги працює таким чином.

Напруга системи електропостачання вимірюється за допомогою вимірювального трансформатора напруги 1, з якого надходить сигнал (рис. 2.8) на другий вхід блока множення 15 та на другий вхід фазового детектора 19 в якості опорного сигналу. Струм, який споживається з системи електропостачання, вимірюється за допомогою вимірювального перетворювача 2, що складається з вимірювального трансформатора струму та нормуючого перетворювача струмового сигналу в пропорційний сигнал за напругою, з якого вихідний сигнал (рис. 2.8) надходить на перший вхід блока множення 15 та одночасно на перший вхід фазового детектора 19 в якості сигналу порівняння. Вихідний сигнал фазового детектора 19 у вигляді напруги, що пропорційна куту зсуву фаз напруги та струму системи електропостачання φ (рис. 2.8), надходить для обчислення значення синуса цього кута на блок обчислення тригонометричної функції 20. В блоці множення 15 обчислюється миттєве значення перетоку реактивної потужності з формули (2.11)

$$Q(t) = U(t) \cdot i(t) \cdot \sin(\varphi(t)), \quad (2.11)$$

де $Q(t)$ – миттєве значення перетоку реактивної потужності; $U(t)$ – миттєве значення напруги системи електропостачання; $\varphi(t)$ – кут зсуву фаз між напругою та струмом системи електропостачання.

На його виході має місце сигнал (рис. 2.9в), частотою, вдвічі більшою, ніж частота напруги і струму мережі, та постійною складовою, що приблизно рівна середньому значенню змінної складової. Амплітуда цього сигналу залежить від величини струму, що споживається з мережі, та характеру навантаження (співвідношення між його активним та реактивним опорами). При сталому характері навантаження (наприклад, силові обладнання з $\cos \varphi \rightarrow 0,8$) миттєве значення реактивної потужності зберігає відносне положення відносно осі абсцис, і зі зміною струму змінюється лише амплітуда сигналу на виході блока множення 15, а постійна складова цього сигналу залишається незмінною, якщо характер перетоку потужності в контрольованій ділянці системи електропостачання має тенденцію до збільшення реактивної потужності та зменшення активної (збільшується реактивний опір або зменшується активний), а струм залишається незмінним, то сигнал на виході блока множення $Q_{\text{мер}}$ (рис. 2.9в) має напрямок до зниження відносно осі абсцис за рахунок зменшення постійної складової. І в першому, і в другому випадках

середнє значення реактивної потужності є пропорційним до амплітуди x від'ємних імпульсів сигналу на виході блока множення.

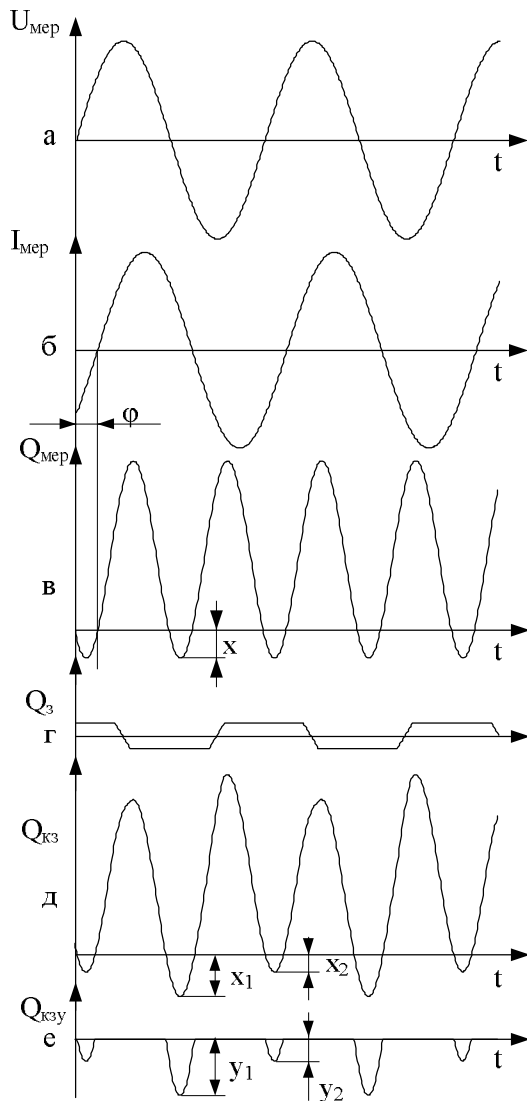


Рис. 2.9 Діаграма сигналів вимірювального каналу потужності

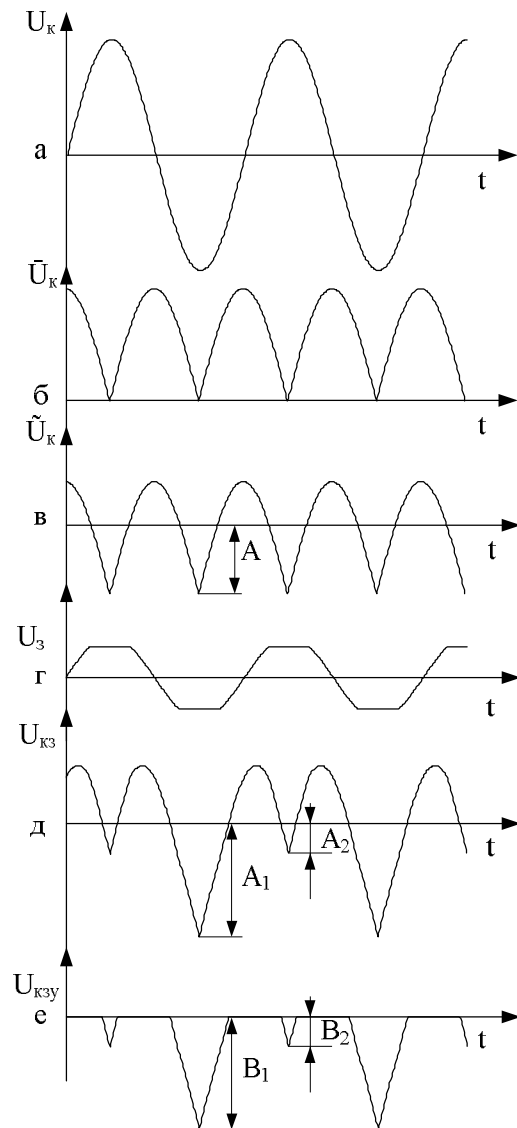


Рис. 2.10 Діаграма сигналів вимірювального каналу напруги на вводах споживачів

В другому блоці формування і зміни зони нечутливості 16 здійснюється модуляція сигналу $Q_{\text{мер}}$ сигналом трапецеїдальної форми $Q_з$ (рис. 2.9г), що задає значення зони нечутливості по тракту керування ТПР. Зона нечутливості по цьому каналу встановлюється досить великою, з верхнім значенням, що відповідає заданому значенню реактивної потужності для забезпечення відповідного режиму системи електропостачання. На виході другого блока

формування і зміни зони нечутливості 16 має місце сигнал $Q_{кз}$ (рис. 2.9д), різниця амплітуд $\Delta x = x_1 - x_2$ імпульсів від'ємної полярності якого несе інформацію про задане значення зони нечутливості по каналу вимірювання перетоку потужності.

Сигнал $Q_{кз}$ з виходу блока 16 надходить на вхід другого блока формування і зміни уставки 17 реактивної потужності, в якому з нього формується імпульсний сигнал $Q_{кзу}$ (рис. 2.9е), амплітуди імпульсів якого y_1, y_2 підсилюються чи послаблюються так, щоб задавати потрібний рівень перетоку потужності в системі електропостачання.

Імпульсний сигнал $Q_{кзу}$, що несе в собі інформацію про задану зону нечутливості і уставку регулятора по реактивній потужності, з виходу блока 17 надходить на вхід другого порогового блока 18, основним елементом якого є стабілітрон з заданим порогом спрацьовування $Q_{пор}$. Якщо $y_1, y_2 < Q_{пор}$, то струм через стабілітрон настільки малий, що на виході порогового блока 18 сигнал відсутній. Якщо $y_1 > Q_{пор}$, а $y_2 < Q_{пор}$, то лише імпульси більшої амплітуди збуджують стабілітрон, що викликає на виході порогового блока послідовність прямокутних імпульсів з частотою мережі 50 Гц. Якщо ж $y_1 > Q_{пор}$ та $y_2 > Q_{пор}$, то стабілітрон збуджується кожним імпульсом сигналу $Q_{кзу}$ (рис. 2е), тому на виході порогового блока має місце послідовність прямокутних імпульсів з частотою 100 Гц. Таким чином, відсутність імпульсного сигналу на виході другого порогового блока 18 (навіть при значній зоні нечутливості, як було вказано вище) відповідає низькому рівню перетоку реактивної потужності з мережі в навантаження, що веде до нестійкого режиму, пов'язаного з підвищенням напруги внаслідок ємнісних струмів; наявність на виході порогового блока послідовності імпульсів з частотою 50 Гц свідчить про те, що регульований параметр $Q_{мер}$ знаходиться в допустимих межах, які задаються вибраними зоною нечутливості та уставкою; якщо ж на виході порогового блока має місце послідовність імпульсів з частотою 100 Гц, то це свідчить про те, що параметр $Q_{мер}$ має значення, більше допустимого.

З виходу другого порогового блока 18 імпульсний сигнал надходить на входи третього та четвертого перетворювачів імпульсного сигналу в потенційний 11, 21. Обидва перетворювачі влаштовані таким чином, що при подачі на їх входи імпульсів з частотою 50 Гц на виході потенціальний сигнал відсутній – це відповідає знаходженню значення перетоку активної та реактивної потужностей в допустимих межах. На виході перетворювача 11 потенційний сигнал логічної 1 має місце при надходженні на його вхід послідовності імпульсів з частотою 100 Гц – це відповідає перевищенню встановленої межі

перетоку потужності з мережі в навантаження. Вихідний сигнал перетворювача 11 запускає третій блок часової затримки 12 каналу вироблення команди «Збільшити» для переключення пристрою РПН трансформатора поперечного регулювання (ТПР) і введення додаткової поперечної ЕРС в напругу мережі, що випереджає її на 90° ел., а вихідний потенційний сигнал перетворювача 21 запускає четвертий блок часової затримки 22 каналу вироблення команди «Зменшити». Блоки часової затримки 12 та 22 необхідні для того, щоб регулятор не посилав в схему електроприводу пристрою РПН ТПР команди «Збільшити» та «Зменшити» у відповідь на короткочасні коливання потужності в даний момент часу.

Збуджений від третього перетворювача імпульсного сигналу в потенційний 11 (або 21) блок часової затримки 12 (або 22) спрацьовує по закінченні встановленої витримки часу від імпульсу генератора тактових імпульсів ГТІ 30, його вихідний сигнал подається через відповідний відкритий дев'ятий елемент І 13 (або десятий елемент І 24) і потім на вхід одинадцятого логічного елемента І 9 (або дванадцятого елемента І 25). На інший вхід одинадцятого логічного елемента І 9 (або дванадцятого елемента І 25) надходить потенційний сигнал, що формується у третьому блоці пам'яті 6 (або четвертому блоці пам'яті 27), де зберігається інформація у вигляді логічного сигналу про знак похідної обвідної реактивної потужності протягом затримки часу вироблення сигналу перемикавання третім блоком часової затримки 12 (або четвертим блоком часової затримки 22). Знак похідної визначається в другому блоці визначення знаку похідної обвідної 8 по вихідному сигналу другого блока визначення похідної обвідної вхідного сигналу 7, що визначає цю похідну шляхом обробки сигналу $Q_{\text{мер}}$ (рис. 2.9в), який надходить на вхід блока 7 з виходу блока множення 15.

Знакові сигнали з виходів блока 8 надходять на входи третього та відповідно четвертого логічних елементів АБО 4 та 10 і звідти на перші входи сьомого та відповідно восьмого елементів І 5 та 26. Стан елементів управляється вихідними сигналами третього та четвертого перетворювачів імпульсного сигналу в потенційний 11 та 21, а також сигналами переривання з третього та четвертого блоків часової затримки 12, 22 та відкритих третього і четвертого блоків заборони 13 та 24. Така конструкція дозволяє утримувати логічні елементи 5 та 26 відкритими тільки протягом заданої затримки часу, встановленої в блоках 12 та 22. Цього часу достатньо для проходження на третій та четвертий блоки пам'яті 6 та 27 знакових сигналів з виходів логічних елементів АБО 4 і 10. Відсічка цих сигналів після збудження одного з

підсилювачів 14 або 23 та їх запам'ятовування необхідні для забезпечення стійкого перемикання пристрою перемикання під навантаженням для зміни коефіцієнта трансформації трансформатора поперечного регулювання на одне відгалуження при можливих змінах обвідної реактивної потужності в одному такті регулювання.

Включення елементів АБО в тракти проходження знакових сигналів похідної обумовлено тим, що блок визначення знаку похідної обвідної має зону нечутливості, в межах якої сигнал, що характеризує похідну обвідної реактивної потужності слід вважати рівним нулю. Якщо похідна в момент появи сигналу на виходах блоків заборони 13 або 24 рівна нулю, тобто значення перетоку реактивної потужності не має тенденції до повернення в область допустимих значень, що задаються зоною нечутливості в блоці 16, то слід виробити команду на перемикання. Другий логічний елемент НІ 3 перетворює нульовий вихідний сигнал блока визначення похідної обвідної вхідного сигналу 7 в одиничний, на який реагують третій та четвертий елементи АБО 4 та 10. Таким чином, якщо в момент появи потенційного сигналу на виході блока часової затримки 12 значення перетоку реактивної потужності вище допустимого, але похідна її обвідної має від'ємний знак, то на першому вході елемента І 9 сигнал відсутній і команда «Збільшити» не буде сформована. Ця команда буде вироблятися тільки тоді, якщо похідна обвідної реактивної потужності стане рівною нулю, або додатною. Аналогічно, якщо в момент появи сигналу на виході блока часової затримки 22 значення перетоку реактивної потужності буде менше допустимого, а похідна його обвідної має додатний знак, то на другому вході елемента І 25 сигнал відсутній і команда «Зменшити» не буде сформована. Вона буде сформована в тому разі, якщо похідна стане рівною нулю або буде від'ємною і матиме місце сигнал на виході четвертого логічного елемента АБО 10.

Тракт регулювання напруги на споживачах в запропонованому регуляторі працює таким чином. Напруга на споживачах вимірюється за допомогою вимірювального трансформатора напруги 48, встановленого на стороні високої напруги (ВН) трансформаторної підстанції нижнього рівня та подається на перший вхід суматора 44. Струм навантаження для введення корегуючого впливу на регулювання напруги вимірюється за допомогою датчика струму 49, що підключається до шинного трансформатора струму, а сигнал, що пропорційний вимірюваному значенню струму надходить на другий вхід суматора 44. Суматор 44 формує сумарну напругу U_k (рис. 2.10а). Суматор 44 має два виходи, перший *a* і другий *b*. З вихода *a* суматора

44 надходить пульсуюча напруга \tilde{U}_k (рис. 2.10б), що отримується двохнапівперіодним випрямленням сумарної напруги U_k , що несе інформацію про зміни обвідної цієї напруги. З виходу б суматора надходить змінна напруга \tilde{U}_k (рис. 2.10в), амплітуда A від'ємних імпульсів якої пропорційна середньому значенню сумарної напруги. В першому блоці формування і зміни нечутливості 45 здійснюється модуляція сигналу \tilde{U}_k (рис. 2.10 в) сигналом трапецеподібної форми U_3 (рис. 2.10 г), амплітуда якого задає значення зони нечутливості регулятора по каналу регулювання напруги на споживачах. На виході блока 45 має місце сигнал $U_{кз}$ (рис. 2.10 д), різниця амплітуд $\Delta A = A_1 - A_2$ імпульсів від'ємної полярності якого несе інформацію про задане значення зони нечутливості по каналу регулювання напруги.

Сигнал $U_{кз}$ з виходу блока 45 надходить на вхід першого блока установки і зміни уставки 46, в якому з нього формується імпульсний сигнал $U_{кзу}$ (рис. 2.10е), амплітуди імпульсів якого B_1, B_2 підсилюються або послаблюються до потрібного рівня напруги на шинах трансформаторної підстанції. Імпульсний сигнал $U_{кзу}$, що несе в собі інформацію про задану зону нечутливості і уставку регулятора по напрузі на споживачах, з виходу блока 46 надходить на вхід першого порогового блока 47, основним елементом якого також є стабілітрон з заданим порогом спрацьовування $U_{пор}$. Якщо $B_1, B_2 < U_{пор}$, то струм через стабілітрон малий, і на виході першого порогового блока 47 сигнал відсутній. Якщо $B_1 > U_{пор}$, а $B_2 < U_{пор}$, то лише імпульси більшої амплітуди збуджують стабілітрон, що викликає на виході порогового блока 47 послідовність прямокутних імпульсів з частотою мережі 50 Гц. Якщо ж $B_1 > U_{пор}$ та $B_2 > U_{пор}$, то стабілітрон збуджується кожним імпульсом сигналу $U_{кзу}$ (рис. 2.10е), тому на виході порогового блока має місце послідовність прямокутних імпульсів з частотою 100 Гц. Таким чином, відсутність імпульсного сигналу на виході першого порогового блока 47 відповідає випадку, коли напруга на споживачах нижча допустимого значення, що задане в блоках формування зони нечутливості 45 та установки і зміни уставки напруги 46; наявність на виході порогового блока 47 послідовності імпульсів з частотою 50 Гц означає, що напруга на споживачах знаходиться в допустимих межах; коли на виході порогового блока має місце послідовність імпульсів з частотою 100 Гц, то це свідчить про те, що параметр $U_{нав}$ має значення, більше допустимого.

З виходу порогового блока 47 імпульсний сигнал надходить на входи першого та другого перетворювачів імпульсного сигналу в

потенційний 40, 50. Як і вищеописані, обидва перетворювачі імпульсного сигналу в потенційний влаштовані таким чином, що при подачі на їх входи імпульсів з частотою 50 Гц на виході потенціальний сигнал відсутній – це відповідає знаходженню напруги $U_{\text{нав}}$ в допустимих межах. На виході першого перетворювача імпульсного сигналу в потенційний 40 потенційний сигнал має місце при надходженні на його вхід послідовності імпульсів з частотою 100 Гц – це відповідає перевищенню допустимого значення напруги. Вихідний сигнал перетворювача 40 запускає перший блок часової затримки 41 каналу вироблення команди «Зменшити» для переключення пристрою РПН силового трансформатора, а вихідний потенціальний сигнал перетворювача 50 запускає другий блок часової затримки 51 каналу вироблення команди «Збільшити».

Блоки часової затримки 41 та 51, як і блоки часової затримки в тракті керування ТПР, необхідні для того, щоб регулятор не посилав в схему електроприводу пристрою РПН силового трансформатора команди «Збільшити» та «Зменшити» у відповідь на короточасні імпульсні коливання напруги при підключенні чи відключенні потужних споживачів тощо. Збуджений від першого перетворювача імпульсного сигналу в потенційний 40 (або 50) блок часової затримки 41 (або 51) спрацьовує по закінченню встановленої витримки часу від імпульсу генератора тактових імпульсів ГТІ 30, його вихідний сигнал подається через відповідний відкритий третій елемент І 42 (або четвертий елемент І 52) і потім на вхід першого логічного елемента І 38 (або другого логічного елемента І 54). На інший вхід цього логічного елемента І 38 (або 54) надходить потенційний сигнал, що формується у першому блоці пам'яті 35 (або 56), де зберігається інформація про знак похідної обвідної напруги.

Знак похідної обвідної напруги визначається в блоці 37 по вихідному сигналу першого блока визначення похідної обвідної вхідного сигналу 36, що визначає цю похідну шляхом обробки сигналу \bar{U}_k (рис. 2.10б), який надходить на вхід блока 36 з виходу a суматора 44. Знакові сигнали з виходів блока 37 надходять на входи першого та другого відповідно логічних елементів АБО 33 та 39 і звідти на входи п'ятого та шостого відповідно елементів І 34 та 55. Стан логічних елементів управляється вихідними сигналами першого та другого перетворювачів імпульсного сигналу в потенційний 40 та 50, а також сигналами переривання з першого та другого елементів часової затримки 41, 51 та відкритих третього та четвертого елементів І 42 та 52. За час затримки між дозволяючим та заборонним сигналами на перший та другий блоки пам'яті 34 та 55 надходять знакові сигнали

з виходів першого та другого відповідно логічних елементів АБО 33 і 39. Відсічка цих сигналів після збудження одного з підсилювачів 43 або 53 та їх запам'ятовування також необхідні для забезпечення стійкого алгоритму перемикання пристрою РПН силового трансформатора на одне відгалуження при можливих змінах обвідної напруги в одному такті регулювання. Якщо похідна обвідної напруги в момент появи сигналу на виходах елементів І 42 або 52 рівна нулю, тобто регульований параметр $U_{\text{нав}}$ не має тенденції до повернення в область допустимих значень, що задаються зоною нечутливості в блоці 45, то слід виробити команду на перемикання.

Перший логічний елемент НІ 32 перетворює нульовий вихідний сигнал блока визначення похідної обвідної напруги 36 в одиничний, що проходить через перший та другий елементи АБО 33 та 39. Таким чином, якщо в момент появи потенційного сигналу на виході першого блока часової затримки 41 регульована напруга на споживачах має значення, вище допустимого, але похідна її обвідної від'ємна, то на першому вході елемента І 38 сигнал відсутній і команда «Зменшити» не буде сформована. Ця команда буде формуватися тільки тоді, якщо похідна обвідної напруги стане рівною нулю, або буде додатною. Аналогічно, якщо в момент появи сигналу на виході блока часової затримки 51 регульований рівень напруги на споживачах матиме значення, менше допустимого, а похідна його обвідної додатна, то на другому вході елемента І 54 сигнал відсутній і команда «Збільшити» не буде сформована. Вона буде сформована в тому разі, якщо похідна стане рівною нулю або буде від'ємною.

За сигналами третього та четвертого підсилювачів 14 або 23, що відповідають командам «Збільшити» чи «Зменшити» вольтдобавку, запускається електропривід пристрою РПН трансформатора поперечного регулювання, а за сигналами першого та другого підсилювачів 43 або 53, що також відповідають командам «Збільшити» чи «Зменшити» напругу на споживачах запускається електропривід пристрою РПН силового трансформатора. Блок зміни періоду тактових імпульсів генератора 29 управляється блоком 28 перемикання генератора тактових імпульсів в нормальному режимі. Генератор тактових імпульсів (ГТІ) 30 представляє собою релаксаційний генератор прямокутних коливань, а блок зміни періоду тактових імпульсів 29 набір RC-ланцюгів з різними постійними часу, кожен з яких вмикається в схему ГТІ за відповідною командою блока 28 або за сигналами з виходів блоків затримки часу 12, 22, 41, 51. ГТІ задає послідовність всіх процесів управління і контролю під час циклу перемикання пристроїв РПН на одне відгалуження.

Такт роботи пристрою в нормальному режимі пояснюється діаграмою сигналів, показаною на рис. 2.11. Якщо регульовані параметри – перетоки потужностей чи напруга у вузлі електропостачання знаходяться в області допустимих значень, то ГТІ генерує послідовність імпульсів з періодом τ_1 (рис. 2.11а). При виході якогось з параметрів в момент t_1 (рис. 2.11д) з області допустимих значень регулятор посилає в схему відповідного електроприводу пристрою РПН команду «Зменшити» або «Збільшити» (рис. 2.11б). Електропривід, увімкнувшись, кулачковим елементом забезпечує собі режим самоутримання (рис. 2.11в) при переключенні пристрою РПН на одне відгалуження незалежно від стану підсилювачів 14, 23 (або 43, 53) регулятора. Той же кулачковий елемент забезпечує подачу на вхід блока 28 сигналу «Перемикавання» (рис. 2.11г). По сигналу «Перемикавання» блок 28 посилає сигнал, що змінює структуру блока 29 зміни періоду тактових імпульсів генератора таким чином, що ГТІ починає генерувати імпульси з періодом τ_2 (рис. 2.11а).

Збереження попереднього періоду проходження імпульсів ГТІ відповідає несправності регулятора. Справний електропривід повинен закінчити перемикавання пристрою РПН на одне відгалуження за час t' (рис. 2.11 д). Якщо тривалість сигналу «Перемикавання» (рис. 2.11 г), що надходить на вхід блока 28 і відповідає тривалості режиму самоутримання електроприводу (рис. 2.11 в), буде більшою часу t' , то це свідчить про «стопоріння» електроприводу. Блок 58 блокування і сигналізації здійснює перевірку справності регулятора і виявлення несправностей електроприводу в період з моменту t_1 до моменту t_2 (рис. 2.11д).

Якщо регулятор і електроприводи справні, то після проведення перемикавання на одне відгалуження обмотки відповідного трансформатора, електропривід вимикається, що приводить до відсутності сигналу на вході блока 28. Блок 28 посилає сигнал на перемикавання структури блока 29 зміни періоду тактових імпульсів ГТІ 30 до попередньої, з заданим періодом проходження імпульсів τ_1 (рис. 2.11 а). Якщо перемикавання на одне відгалуження пристрою РПН є недостатнім для компенсації відхилень по перетоках потужності (або напруги), то регулятор здійснює другий такт перемикавання, аналогічний першому. Блок 28 крім формування команди на зміну періоду тактових імпульсів ГТІ 30 виконує додаткову функцію – за сигналом «Перемикавання» він встановлює таке значення зони нечутливості в блоках 16 та 45, при якому будь-який сигнал, що надходить на їх входи знаходиться в зонах нечутливості регулятора по відповідному трактові регулювання.

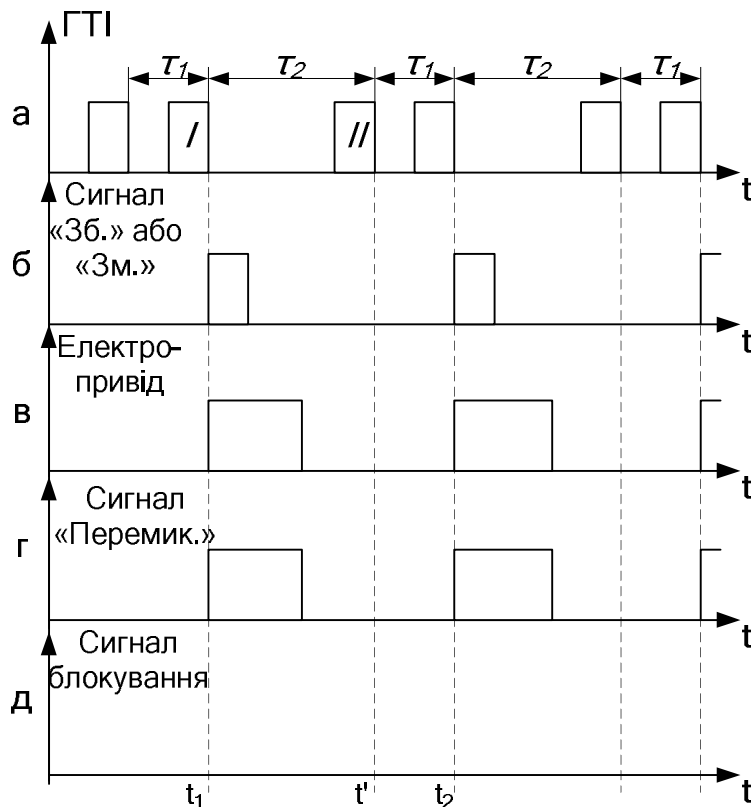


Рис. 2.11. Діаграма сигналів управління регулятора в системі поздовжньо-поперечного регулювання напруги

Це приводить до того, що після вмикання, релейні виконавчі елементи 14, 23 (або 43, 53) пославши команду «Збільшити» або «Зменшити» в схему електроприводу пристрою РПН (рис. 2.11б), відключаються. При цьому електропривід, що відпрацьовує команду, встигає увійти в режим самоутримання (рис. 2.11в), а відключення релейних виконавчих елементів 14, 23 (або 43, 53) використовується для контролю справності його власної схеми та необхідне для встановлення їх у вихідний стан готовності до наступного такту перемикання.

Блок блокування і сигналізації 58 здійснює виявлення несправностей електроприводу «Стопоріння» і «Рух відсутній», а також несправностей власної схеми регулятора таким чином. Якщо імпульс ГТІ 30, позначений I на рис. 2.11а, формує команду «Збільшити» або «Зменшити» (рис. 2.12б), яка нормально відпрацьовується електроприводом (рис. 2.12в), то імпульс ГТІ 30, позначений II (рис. 2.12а), надходить на вхід блока 57 контролю електроприводу в режимі «Стопоріння» вже після того, як на його перший вхід перестає надходити сигнал з виходу блока 28, що припиняється з припиненням сигналу «Перемикання» та зупинкою

електроприводу (рис. 2.12г). Тому на виході блока 57, що реалізує логічну функцію І, сигнал буде відсутній. Якщо ж виникло «Стопоріння» електроприводу (рис. 2.12в), то під дією сигналу «Перемикання» (рис. 2.12г) на вхід блока 57 надходить сигнал з виходу блока 28 і в той момент, коли на другий вхід цього блока надійде імпульс ІІ з ГТІ 30. Внаслідок цього на виході блока 57 з'являється імпульс, що відкриває блок блокування і сигналізації 58 (який реалізує логічну функцію АБО в якості основної) який, відкриваючись, переходить в режим самопідхвату. Спрацьовування блока блокування і сигналізації 58 приводить до посилення ним сигналу логічної 1 на інверсні входи елементів І 13, 24, 42, 52 і тим самим розривання ланцюга подачі сигналів з виходів блоків витримки часу 12, 22, 41, 51 на входи елементів І 9, 25, 38 та 54.

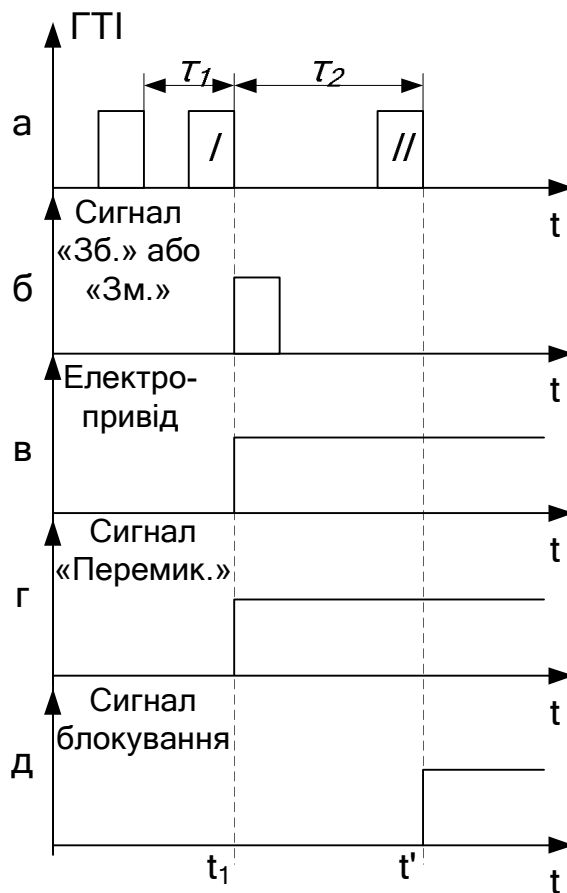


Рис. 2.12. Діаграма сигналів управління регулятора напруги

Це приводить до відключення підсилювачів 14, 23, 43 та 53, що відповідає відміні формування та виконання команд «Збільшити» або «Зменшити» регулятора. При цьому здійснюється також сигналізація про несправності. В вихідний стан блок блокування і сигналізації встановлюється тільки після усунення несправності і ручної подачі на

нього сигналу «Скид» від зовнішнього джерела. Якщо команда «Збільшити» або «Зменшити» (рис. 2.13б) сформувалась в результаті включення підсилювача 14, 23, 43 або 53 сигналом, що з'явився на виході відповідного блока затримки часу 12, 22, 41 або 51 в результаті несправності власної схеми регулятора, що блокує тракти регулювання, то по сигналу «Перемикання» (рис. 2.13г) блоки перемикання періоду тактових імпульсів в нормальному режимі та блоки 16 і 45 формування і зміни зон нечутливості регулятора не можуть повернути блок затримки часу, що спрацював, в вихідний стан.

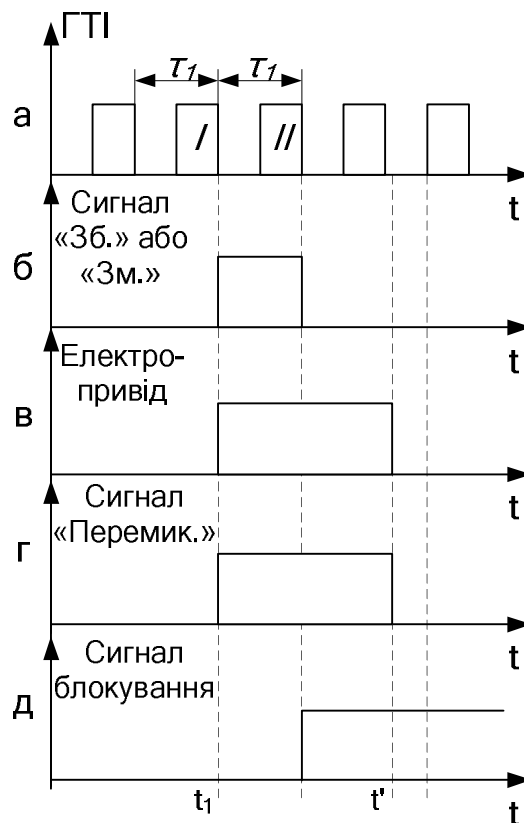


Рис. 2.13. Діаграма сигналів управління синтезованого регулятора напруги при несправності схеми ГТІ

В цьому випадку, незалежно від приходу на вхід блока зміни періоду тактових імпульсів 29 з виходу блока перемикання 28 сигналу на переналадження структури для формування періоду імпульсів ГТІ 30 τ_2 , ГТІ 30 продовжуватиме формувати імпульси з періодом τ_1 (рис. 2.13 а), що обумовлено впливом на час перезаряду RC-ланцюга ГТІ 30, що задає період коливачів генератора високого потенціалу, що надходить з виходу несправного елемента затримки часу. Тому імпульс, позначений номером II (рис. 2.13 а) ГТІ 30, надходячи на вхід блока 57, на іншому вході якого вже присутній вихідний сигнал блока

перемикання 28, викликає появу на виході блока 57 сигналу, що вмикає блок блокування і сигналізації 58 (рис. 2.13д), який в свою чергу через елементи І 13, 24, 42, 52 здійснює заборону формування нової команди (рис. 2.13б), а також здійснює сигналізацію несправності.



Рис. 2.14. Діаграма сигналів управління регулятора напруги при несправності електроприводу РПН

Якщо при появі команди «Збільшити» або «Зменшити» (рис. 2.14б) електропривід знаходиться в режимі «Рух відсутній» (рис. 2.14в), то з схеми електроприводу на вхід блока перемикання 28 не надходить сигнал «Перемикання» (рис. 2.14г), тому ГТІ 30 продовжує генерувати послідовність імпульсів з періодом τ_1 . Імпульс II ГТІ 30 (рис. 2.14а), впливаючи на блок 31 разом з сигналом, що надійшов від відповідного включеного підсилювача, викликає появу на виході блока 31 сигналу, що надходить на вхід блока блокування і сигналізації 58 (рис. 2.14д), який через елементи І 13, 24, 42, 52 блокує обидва тракту регулювання, відмінюючи команду та сигналізуючи про несправність.

Синтезований регулювальний пристрій для системи автоматичного керування трансформаторами з поздовжньо-поперечним регулюванням напруги захищено патентом [79].

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ

3.1. Математична модель системи автоматичного керування трансформаторами з поздовжньо-поперечним регулюванням напруги

Математичне моделювання процесів в системах регулювання дозволяє значно спростити налагодження елементів системи регулювання, виходячи з критеріїв стійкої роботи [80]. При цьому рівняння, що входять до складу математичної моделі і якими описуються перехідні процеси в системі, повинні адекватно відображати фізичну сутність об'єкта дослідження та бути достатньо простими.

Диференціальні рівняння мають досить складну методику розв'язання та пошуку коренів [81], а тому їх прийнято аналізувати за допомогою передаточних функцій, які отримують з цих рівнянь з використанням перетворень Лапласа для сигналів об'єктів [82].

Якщо структурувати об'єкт дослідження по елементарних ланках, кожна з яких має власну передаточну функцію, то отримують наочну структурну схему об'єкта з визначеними вхідними та вихідними зв'язками. При розробці такої структурної схеми та відповідної їй математичної моделі системи автоматичного регулювання необхідно врахувати лише ті ланки функціональної схеми, які безпосередньо беруть участь в перетворенні вхідного сигналу у вихідний.

Розглянемо структурну схему каналу керування ТПР (рис. 2.8). На схемі, показаній на рис. 3.1, 1, 3 – елементи АБО; 2 – блок визначення знаку похідної обвідної напруги на навантаженні; 4, 14 – перетворювачі імпульсного сигналу в потенційний; 5, 15, – блоки часової затримки; 6, 16 – імпульсні елементи; 7, 17 – елементи І; 8 – електрична мережа; 9 – вимірювальний канал реактивної потужності; 10 – вимірювальний канал активної потужності; 11 – масштабатор; 12 – підсилювач; 13 – пороговий блок; 18 – електропривід пристрою перемикання відгалужень ТПР, 19 – перемикаючий пристрій [83].

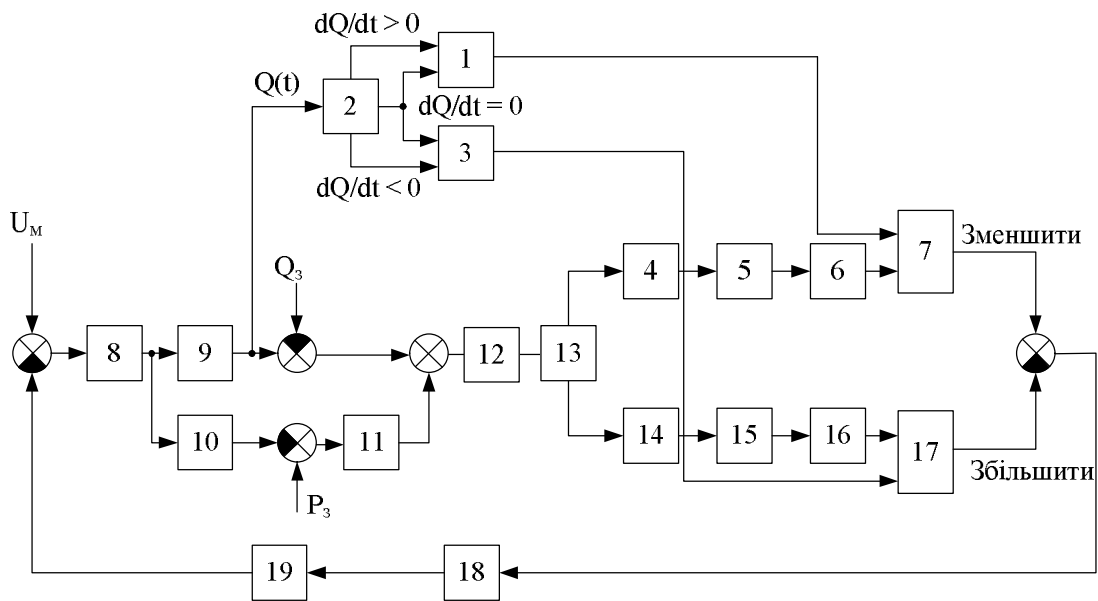


Рис. 3.1. Структурна схема тракту керування пристроєм РПН трансформатора поперечного регулювання

Запишемо передаточні функції для кожного блока.

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

Такий блок описується рівнянням виду:

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

причому $t > \tau$.

Передаточна функція такого блока має вигляд:

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

де τ – час затримки сигналу [80].

Електропривід 15 пристрою РПН має власний час перемикання контактів від 3 до 12 с в залежності від його типу. Тому передаточна функція електроприводу має вигляд:

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

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

Пристрій РПН 16 описується залежністю, яка має суттєво нелінійний характер:

$$u_{\text{н0}} = \begin{cases} u_0, & \text{якщо } x < 0, \\ -u_0, & \text{якщо } x > 0, \\ 0, & \text{якщо } x = 0, \end{cases} \quad (3.4)$$

де U_0 – напруга ступеня перемикавання.

Імпульсні елементи 6, 13 виконують амплітудо-імпульсну модуляцію і описуються передаточною функцією

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

Пороговий блок 10, який характеризує зону нечутливості системи, описується залежністю такого виду:

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

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

Опір електричної мережі 8 має активно-реактивний характер (причому реактивний опір представлений як індуктивною складовою навантаження, так ємнісною складовою лінії електропередач), що призводить до виникнення перехідних процесів при перемиканні відгалужень пристрою РПН. У відповідності до Г-подібної схеми заміщення, передаточна функція електричної мережі має вид

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

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

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

Логічні елементи I 7 та 14 мають передаточну функцію [84]:

$$W(p)_{\text{л}} = \begin{cases} y > 0, & \text{якщо } \begin{cases} x_1 > 0, \\ x_2 > 0, \\ x_3 > 0, \end{cases} \\ y \leq 0, & \text{якщо } x_1 \leq 0, \\ y \leq 0, & \text{якщо } x_2 \leq 0, \\ y \leq 0, & \text{якщо } x_3 \leq 0, \end{cases} \quad (3.8)$$

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

Передаточна функція логічного елемента "АБО" 1 та 3 має вигляд

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

Перетворювачі імпульсного сигналу в потенційний 4 і 11 представляють собою інтегратори і їх передаточні функції мають вигляд

$$W_i(p) = \frac{1}{p}. \quad (3.10)$$

Ланка вимірювання потужності 9 має передаточну функцію

$$W_{\text{п0}}(p) = \frac{k_{\text{д0}} k_{\text{іа0}} (T_{\text{д0}} p + 1)}{T_{\text{д0}} T_{\text{іа0}} p^2 + (T_{\text{д0}} + T_{\text{іа0}}) p + 1}, \quad (3.11)$$

де $k_{\text{тр}}, k_{\text{пер}}$ – коефіцієнти передачі трансформаторів та перетворювача; $T_{\text{тр}}, T_{\text{пер}}$ – постійні часу трансформаторів та перетворювача [83].

3.2. Комп'ютерне моделювання роботи системи регулювання напруги і дослідження її на стійкість

Для оцінки стійкості системи використовують різні критерії [80, 84]. Однак досліджувати стійкість системи автоматичного регулювання напруги силового трансформатора з пристроєм РПН за допомогою традиційних критеріїв стійкості неможливо, оскільки вона є суттєво нелінійною. Тому оцінку стійкості цієї системи автоматичного регулювання доцільно поєднати з оцінкою якості її перехідних процесів, які у випадку стійкої системи є затухаючими. В свою чергу перехідний процес в системі зручно оцінювати за її перехідною характеристикою, знятою для найбільших можливих стрибків сигналу збурення.

Таким чином необхідно отримати графік перехідної характеристики $h(t)$. Як відомо з [84], це функція, яка описує реакцію системи на одиничний ступінчатий вплив при нульових початкових умовах, який аналітично можна описати одиничною функцією:

$$1(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } t \geq 0, \\ 0, & \text{if } t < 0. \end{cases} \quad (3.12)$$

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

Комп'ютерне моделювання і дослідження стійкості системи, яка реалізує закон керування (2.3) проведено в [85]. Для комп'ютерного моделювання застосуємо пакет прикладних програм (ППП) MatLab 5.2 [86, 87]. Цей ППП дає можливість вирішувати широке коло математичних задач і містить в своєму складі програму Simulink [88], з допомогою якої можна легко будувати схеми моделювання досліджуваних систем і отримувати результати моделювання в зручному наочному вигляді.

Застосування моделі дозволить швидко провести пошук оптимальних параметрів налагодження регулятора на роботу з трансформаторними підстанціями різної потужності (де слід визначити межі струмової компенсації в законі регулювання), різних рівнів напруг, із змінними вимогами щодо режиму мережі за потужністю.

Припустимо, що така система регулювання встановлена на підстанції 110/10 кВ, для моделювання задаємо значення зони нечутливості регулятора на рівні $\pm 5\%$ згідно з [1] за напругою. Система складається з автоматичного регулятора, що керує положенням пристроїв РПН вольтододааткового трансформатора поперечного регулювання та силового трансформатора у відповідності з законом регулювання (2.3). Загальна модель такої системи розроблена в середовищі Matlab SimUlink в повному обсязі з поелементною деталізацією відповідно до [78]. Регулятор напруги має два входи по напрузі (мережі та навантаження), і два входи по струму (також мережі та навантаження). Оскільки струм мережі та струм навантаження визначаються значенням активного та реактивного опорів ліній електропередач, самих споживачів (якщо знехтувати струмом холостого ходу трансформаторів), то в моделі системи регулювання для введення реальних значень струмів мережі та навантаження замість входів регулятора по струму використовуються входи від блоків X та R, що задають значення відповідно реактивного та активного опорів навантаження та лінії електропередач, приведених до первинної обмотки трансформатора 110/10 кВ. Діючі та миттєві значення струмів мережі, навантаження в моделі визначаються у внутрішній структурі регулятора напруги. Модель системи регулювання представлена на рис. 3.1.

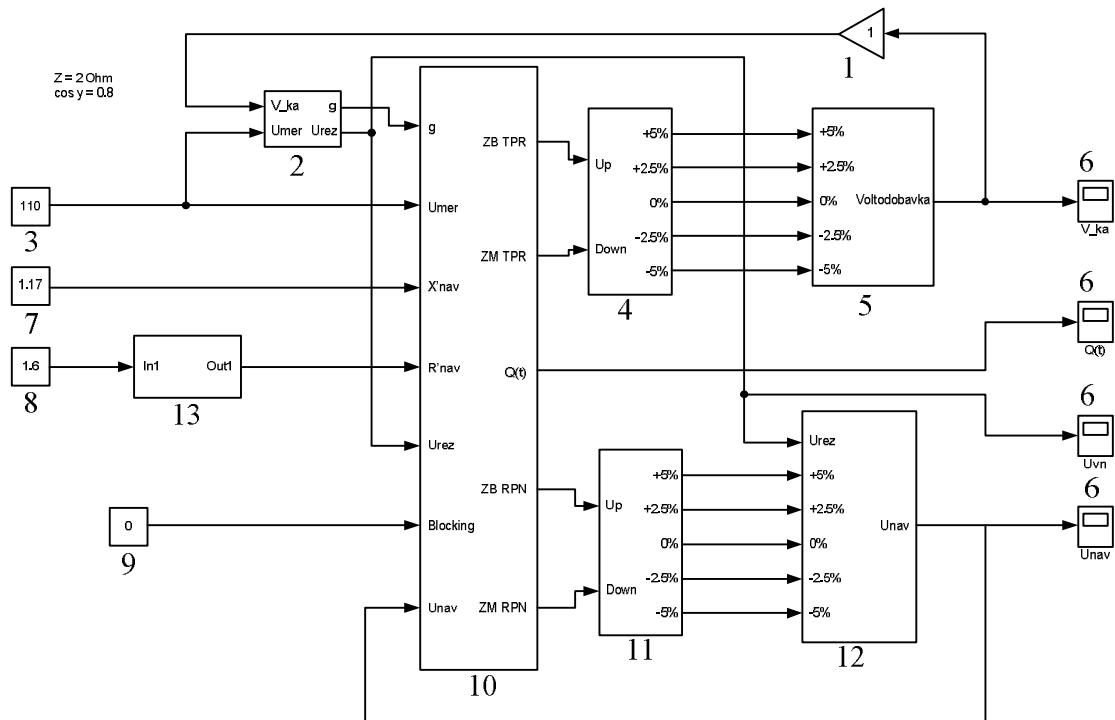


Рис. 3.1. Модель системи автоматичного керування трансформаторами з поздовжньо-поперечним регулюванням напруги

На рис. 3.1: 1 – блок введення коефіцієнта трансформації вторинного трансформатора ТПР; 2 – блок визначення результуючої напруги на первинній обмотці силового трансформатора; 3 – блок задання значення напруги системи електропостачання; 4 – модель пристрою РПН ТПР; 5 – модель ТПР; 6 – блок спостереження вихідних параметрів системи; 7 – блок задання значення приведенного реактивного опору навантаження до первинної обмотки силового трансформатора; 8 – блок задання значення приведенного активного опору навантаження до первинної обмотки силового трансформатора; 9 – блок введення сигналу блокування роботи регулятора; 10 – модель регулятора; 11 – модель пристрою РПН силового трансформатора; 12 – модель силового трансформатора; 13 – модель введення ступеневого збурення в один з параметрів системи електропостачання.

Модель регулятора напруги показана на рис. 3.2. Вихідним сигналом регулятора є імпульси на виходах логічних блоків І в тракті керування ТПР (And B та And M) та в тракті регулювання напруги на навантаженні (And MU та And BU).

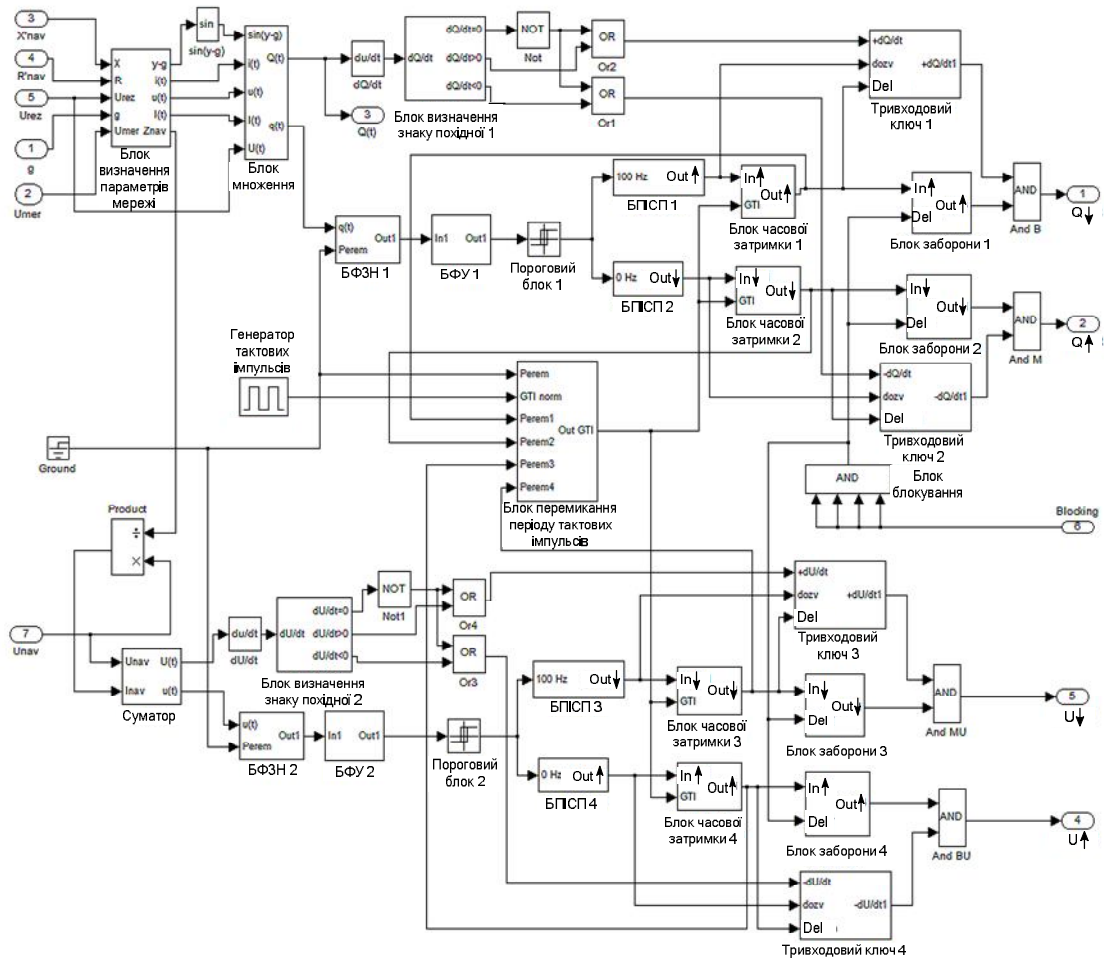


Рис. 3.2. Модель автоматичного регулятора напруги

Додатковим блоком, що входить до складу моделі регулятора, але який відсутній в фізичному регуляторі, є блок визначення параметрів мережі $I_{\text{мер}}$ (миттєвих та діючих значень струму, напруги, різниці їх фаз, повного опору), про що йшлося вище. В фізичному регуляторі [78] цей блок замінюється вимірювальними перетворювачами напруги та струму. Структура блока визначення параметрів системи електропостачання показана на рис. 3.3.

Визначення повного опору навантаження, необхідне для обчислення струму навантаження, що є одним із збурень в тракці регулювання напруги, а кут ψ , що відповідає куту φ , встановлює відповідний коефіцієнт потужності навантаження, від якого залежить величина співвідношення між перетоками активної та реактивної потужності. Обчислення цих двох необхідних змінних здійснюється за допомогою структурного блока *Phase detector / Complex resistance*, елементна будова якого показана на рис. 3.4.

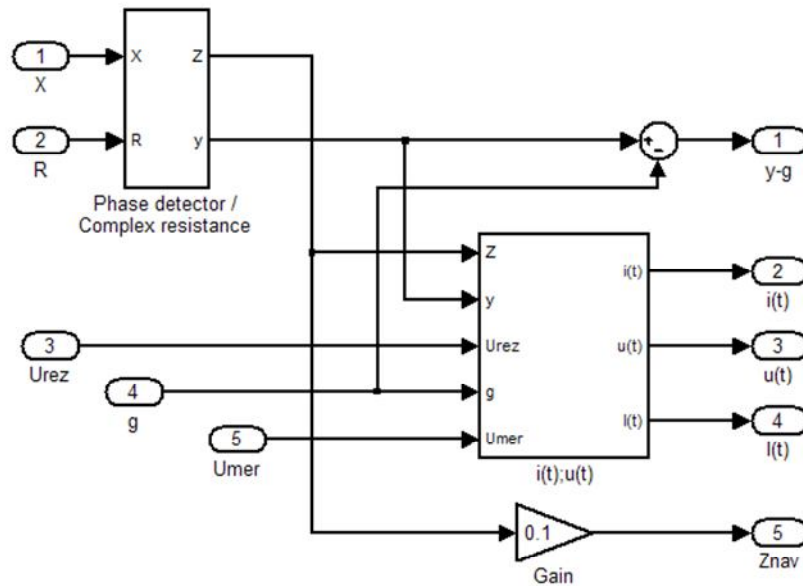


Рис. 3.3. Структура блока Imer визначення параметрів мережі

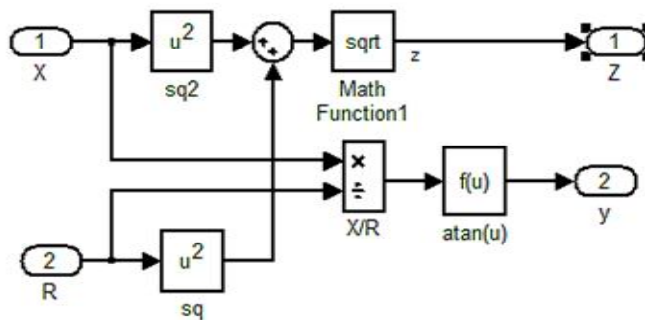


Рис. 3.4. Структура блока Phase detector / Complex resistance для визначення повного опору навантаження

Іншою важливою частиною блока визначення параметрів мережі є блок визначення миттєвих значень струму та напруги, оскільки в функціональному циклі роботи регулятора вимірюються як діючі, так і амплітудні значення напруги, струму, потужності. Внутрішня будова блока визначення миттєвих значень струму та напруги представлена на рис. 3.5.

Блок множення Block mnozh в моделі регулятора має два виходи $Q(t)$ миттєвого значення реактивної потужності та $Q(t)$ діючого значення реактивної потужності. Перший вихідний сигнал потрібен для визначення положення перетоку потужності відносно заданої зони нечутливості регулятора в тракті керування ТПР, а

другий вихідний сигнал – для визначення знаку похідної обвідної реактивної потужності. Будова блока множення показана на рис. 3.6.

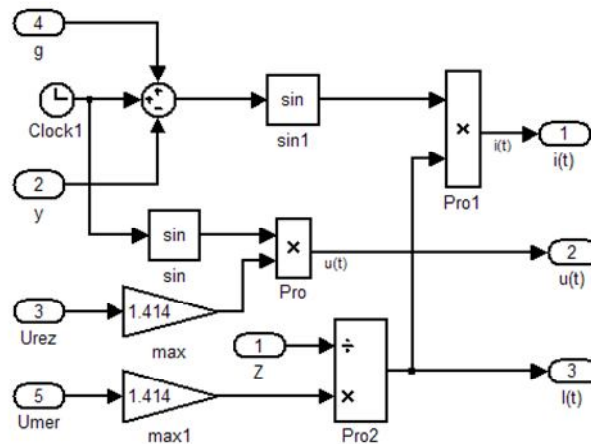


Рис. 3.5. Будова блока обчислення миттєвих значень струму та напруги $i(t)$; $U(t)$

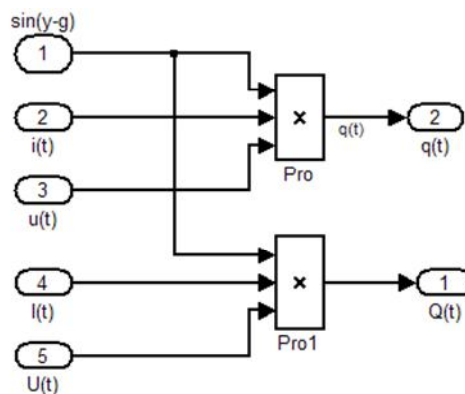


Рис. 3.6. Будова блока множення для обчислення миттєвого та діючого значень потужності на контрольованій ділянці

Блок формування зони нечутливості регулятора та її зміни під дією сигналу перемикачання (їх є два – в тракці керування ТПР та тракці керування пристроєм РПН силового трансформатора, такий блок поєднує в собі суматор вхідного сигналу з сигналом генератора сигналів трапецеїдальної форми (Trapeze impulse norm) таким чином, щоб частота сигналів генератора була в два рази меншою від частоти вхідних сигналів, а по фазі вони були зміщені таким чином, щоб амплітудні значення вхідного сигналу почергово накладалися на додатній та на від’ємний імпульс генератора сигналів трапецеїдальної форми. Амплітуда сигналів трапецеїдальної форми відповідає зоні нечутливості регулятора. При надходженні сигналу логічної 1 на вхід перемикачання Perem в цьому блоці за допомогою перемикача Switch

здійснюється перемикання вхідного сигналу суматора до генератора сигналів трапецеїдальної форми в режимі комутації (Trapece impulse comut), амплітуда сигналів якого є такою, щоб при будь-якому вхідному сигналі він знаходився в зоні нечутливості регулятора. Моделі блока формування і зміни зони нечутливості регулятора та генератора сигналів трапецеїдальної форми показані відповідно на рис. 3.7 та 3.8.

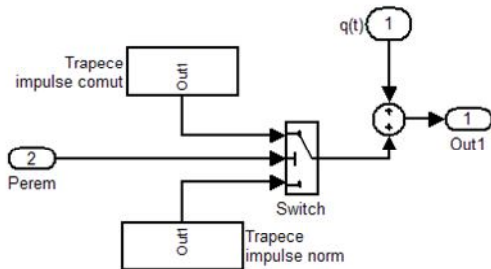


Рис. 3.7. Модель блока формування і зміни зони нечутливості регулятора

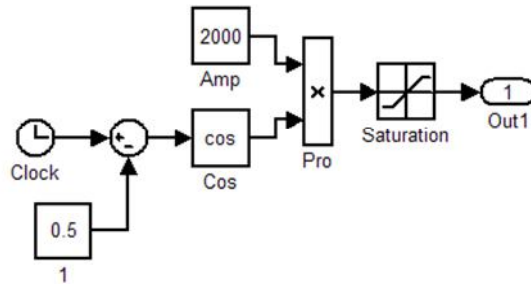


Рис. 3.8. Модель генератора сигналів трапецеїдальної форми

З виходу обох блоків формування і зміни зони нечутливості регулятора вихідний сигнал надходить на входи блоків формування і зміни уставки. Він вимірює та підсилює амплітудні значення імпульсів тільки від'ємної полярності, отримані в результаті модуляції вхідного сигналу регулятора сигналом трапецеїдальної форми. В моделі цього блока (рис. 3.9) вимірювання амплітуди імпульсів від'ємної полярності здійснюється за допомогою блока Z_{riz} , в якому рівень обмеження максимального сигналу встановлений на рівні 0, а підсилення амплітуди імпульсів та перетворення їх в імпульси позитивної полярності відбувається в блоці $Ustavka$.

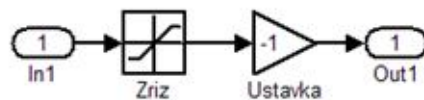


Рис. 3.9. Модель блока формування і зміни уставки регулятора

Порогові блоки трактів керування пристроями РПН ТПР та силового трансформатора в моделі регулятора реалізовано за допомогою релейних елементів $Porog\ block\ Q$ та $Porog\ block\ U$ відповідно. Точка спрацьовування цих елементів відповідає заданим значенням перетоку потужності та напруги на споживачах, а точка

відпускання така ж як і спрацьовування. Таким чином, на виході порогового блока мають місце дискретні сигнали з частотою, що рівна 0 Гц (вхідний сигнал регулятора знаходиться нижче зони нечутливості), 50 Гц (вхідний сигнал регулятора знаходиться в зоні нечутливості) та 100 Гц (вхідний сигнал регулятора знаходиться вище зони нечутливості).

Задача блоків перетворення імпульсних сигналів в потенційний – це формування вихідного сигналу логічної 1, якщо на вході має місце послідовність імпульсів з частотою 0 Гц (в ланцюгах формування команди «Збільшити») або 100 Гц (в ланцюгах формування команди «Зменшити»). В моделях блоків перетворення імпульсного сигналу в потенційний ланцюгів каналів «Збільшити» та «Зменшити» є різниця. Сам блок реалізовано за допомогою послідовного з'єднання аналогового блока *Transfer Fcn*, з коефіцієнтом підсилення 3, що згладжує послідовність імпульсів, що надходять на вхід, та релейного блока *Relay*.

На виході блока *Transfer Fcn* має місце неперервний аналоговий сигнал, якщо проходить послідовність імпульсів з частотою 100 Гц, то відповідно сигнал більший, а якщо проходить послідовність імпульсів з частотою 50 Гц, то цей сигнал має менше значення, тому точка спрацьовування релейного елемента в ланцюзі вироблення команди «Зменшити» вибирається меншою від аналогового сигналу при послідовності 100 Гц, але більшим, ніж при послідовності імпульсів на вході блока з частотою 50 Гц, точка відпускання повинна бути не більшою ніж мінімальне значення аналогового сигналу при послідовності імпульсів 100 Гц. Вихідний сигнал при спрацьованні релейного елемента 1, а при виключеному стані – 0.

В релейному елементі ланцюга вироблення команди «Збільшити» точка спрацьовування вибирається меншою від аналогового сигналу на виході елемента *Transfer Fcn* при послідовності імпульсів на його вході з частотою 50 Гц, а точка відпускання наближається до 0 (або вона повинна бути меншою точки відпускання релейного елемента в ланцюзі вироблення протилежної команди). Вихідний сигнал при спрацьованні 0, а при відключенні – 1. Модель блока перетворення імпульсного сигналу в потенційний показана на рис. 3.10.

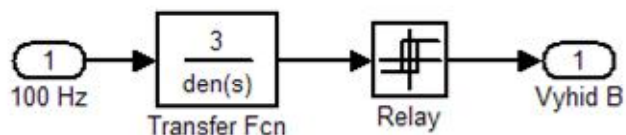


Рис. 3.10. Модель блока перетворення імпульсного сигналу в потенційний

Елемент часової затримки керується імпульсами від генератора тактових імпульсів (ГТІ) *GTInorm1*. В моделі його реалізовано як поєднання елемента часової затримки та логічного елемента І (And). Структура моделі елемента часової затримки показана на рис. 3.11.

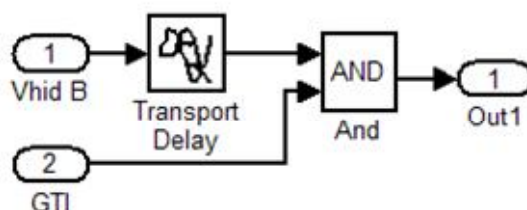


Рис. 3.11. Модель елемента часової затримки з керуванням від генератора тактових імпульсів

Далі сигнал з виходу елемента часової затримки при надходженні імпульсу з ГТІ проходить на блок заборони, що представлений в моделі регулятора як логічний елемент І з інверсним управляючим входом, що з'єднується з виходом блока заборони (рис. 3.12). Моделі блоків заборони у всіх ланцюгах регулятора мають однакову будову.

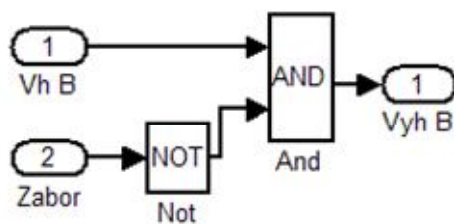


Рис. 3.12. Модель блока заборони

В фізичному регуляторі мають місце блоки визначення знаку похідної обвідної сигналів реактивної потужності та напруги на

споживачах. Будова цих блоків однакова. В моделі регулятора функцію визначення знаку похідної обвідної вхідного сигналу реалізовано за допомогою блоків Sign dQ/dt , Sign dU/dt , будову одного з яких показано на рис. 3.13. Модель блока має елемент з незначною зоною нечутливості Dead Zone, яка присутня в блоці визначення знаку похідної будь-якої конструкції. Далі сигнал похідної надходить на вхід знакового елемента Sign. З його виходу знімається сигнал, що рівний 0, якщо вхідний сигнал рівний 0 (тобто вхідний сигнал регулятора не змінюється і його похідна рівна 0), якщо вхідний сигнал регулятора наростає, то його похідна більша 0 і на виході елемента Sign буде присутнім сигнал 1, що викличе спрацювання релейного елемента $+dx/dt$ та появу сигналу логічної 1 на виході $dQ/dt > 0$ блока визначення знаку похідної. В тому разі, якщо сигнал на вході регулятора зменшується, його похідна буде від'ємною, то на виході знакового елемента Sign буде сигнал -1 , він перетворюється в сигнал додатньої полярності за допомогою блока Gain з коефіцієнтом підсилення -1 та викликає спрацювання другого релейного блока $-dx/dt$. З виходу останнього знімається сигнал логічної 1 в тому разі, коли похідна обвідної вхідного сигналу менша 0. Якщо швидкість наростання чи спадання вхідного сигналу регулятора незначна, то блок визначення знаку похідної обвідної видає сигнал $dQ/dt = 0$ за рахунок наявності зони нечутливості.

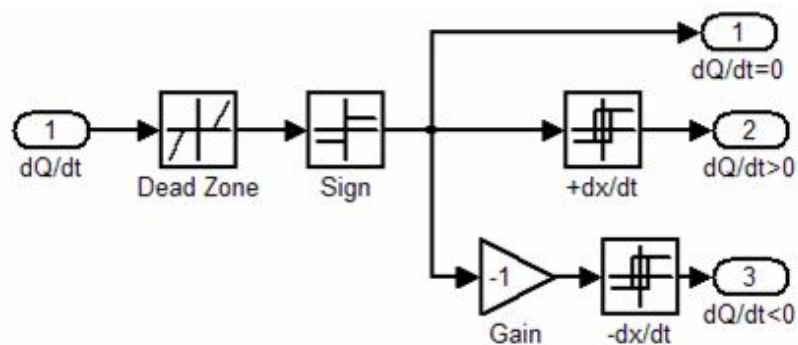


Рис. 3.13. Модель блока визначення знаку похідної обвідної Sign dQ/dt

Стійкість алгоритму роботи регулятора забезпечується сукупністю елементів з тривходовим ключем та блоком пам'яті в кожному ланцюзі вироблення команд. Цю задачу в моделі регулятора вирішено за допомогою блоків 3-th switch B Q, 3-th switch M Q в тракці керування ТПР та блоків 3-th switch B U, 3-th switch M U в тракці регулювання напруги на навантаженні. Кожен з блоків має аналогічну структуру, що має в своєму складі тривходовий логічний

елемент І, логічний елемент НІ та RS-тригер. Модель тривходового ключа з блоком пам'яті показано на рис. 3.14.

Важливим елементом регулятора є суматор в тракці регулювання напруги на споживачах, за допомогою якого враховується струм навантаження та реалізується «зустрічне» регулювання напруги. Суматор в тракці регулювання напруги, як і блок множення в тракці керування ТПР, має два виходи діючого та миттєвого значень напруги на навантаженні. Для отримання двонапівперіодного випрямлення синусоїдальної напруги, що надходить з вимірювального трансформатора напруги використовується мостова схема випрямлення, в моделі суматора використано блок Abs (рис. 3.15), що також дозволяє отримати пульсуючий вихідний сигнал з синусоїдного вхідного. Модель суматора в тракці регулювання напруги показана на рис. 3.15.

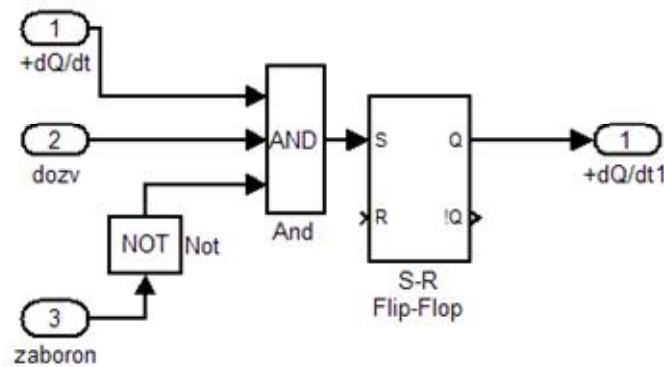


Рис. 3.14. Модель тривходового ключа з блоком пам'яті в ланцюзі команди «Збільшити» тракту керування ТПР 3-th switch В Q

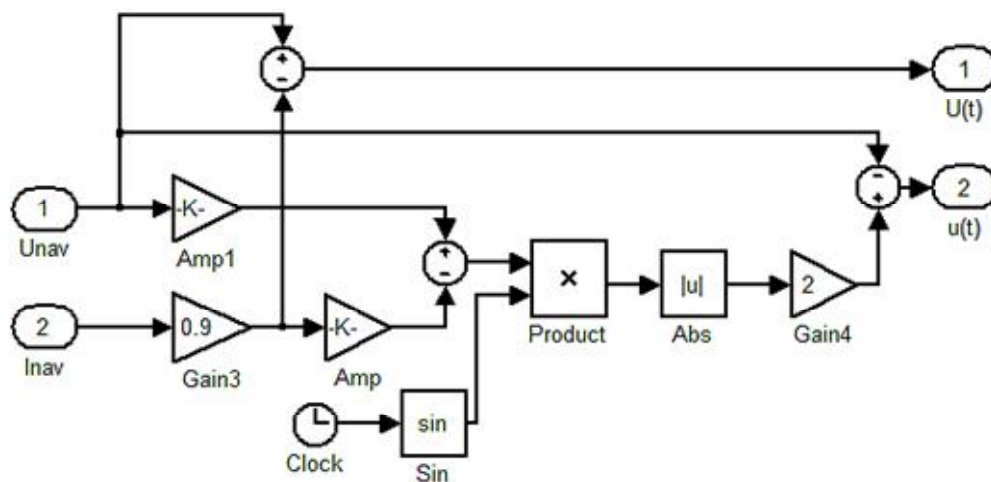


Рис. 3.15. Модель суматора в тракці регулювання напруги Sumator

Коефіцієнти підсилення в блоках Amp1 та Amp (рис. 3.15) рівні 1,414, що відповідає відношенню між амплітудним та діючим значенням синусоїдної напруги та струму.

Одним з важливих блоків регулятора, що забезпечують його діагностування та сигналізацію несправностей є блок перемикання періоду тактових імпульсів регулятора. Тобто під час самого перемикання період між тактовими імпульсами встановлюється більшим, ніж в режимі очікування на час, що необхідний для входу електроприводом пристрою РПН в режим самоутримання до завершення перемикання на одне відгалуження. В моделі цей блок (block perem period GTI) реалізовано як показано на рис. 3.16 за допомогою додаткового генератора прямокутних імпульсів з збільшеним періодом, що відповідає режиму комутації GTIcom, логічного оператора АБО, логічного оператора НІ та керованого ключа Switch.

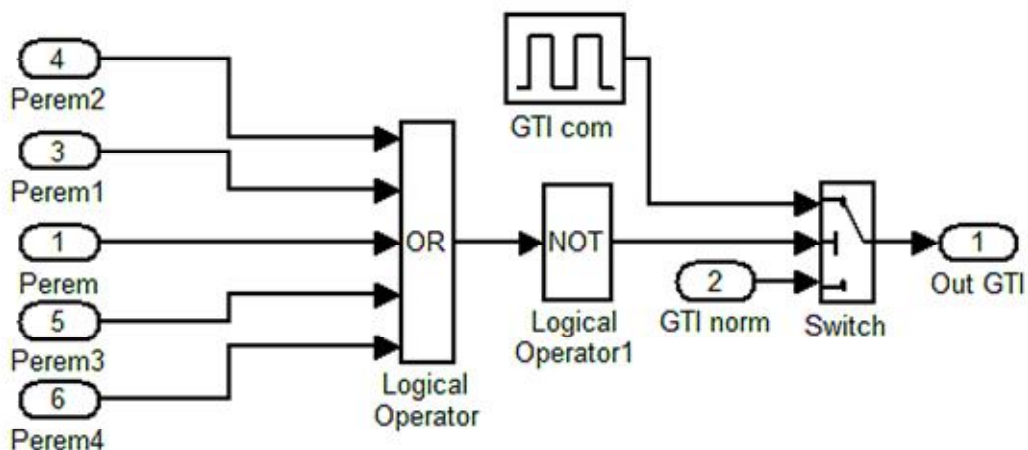


Рис. 3.16. Модель блока перемикання періоду тактових імпульсів GTI

Модель механічного пристрою РПН показана на рис. 3.17

Модель силового трансформатора (рис. 3.18), розроблена в [85], використана з врахуванням коефіцієнта трансформації 110/10 кВ, а модель вольтододадового трансформатора тотожна до силового з різницею у коефіцієнті трансформації, що визначався, виходячи зі стійкості системи регулювання напруги.

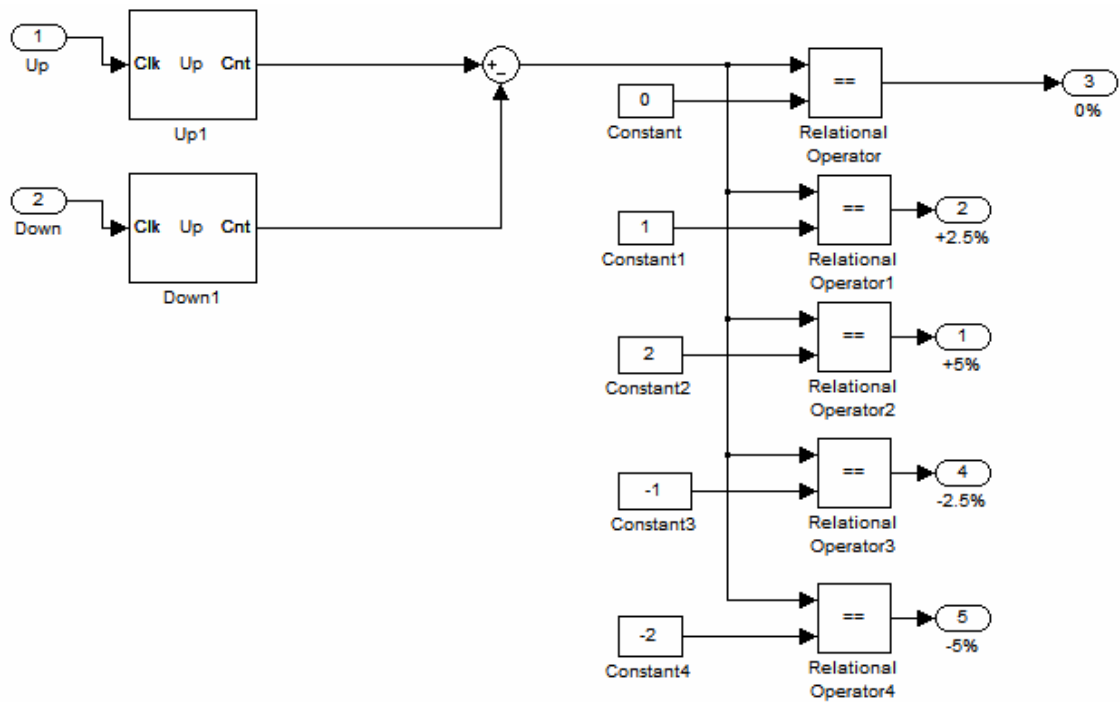


Рис. 3.17. Модель пристрою РПН силового трансформатора RPN
Power transformer

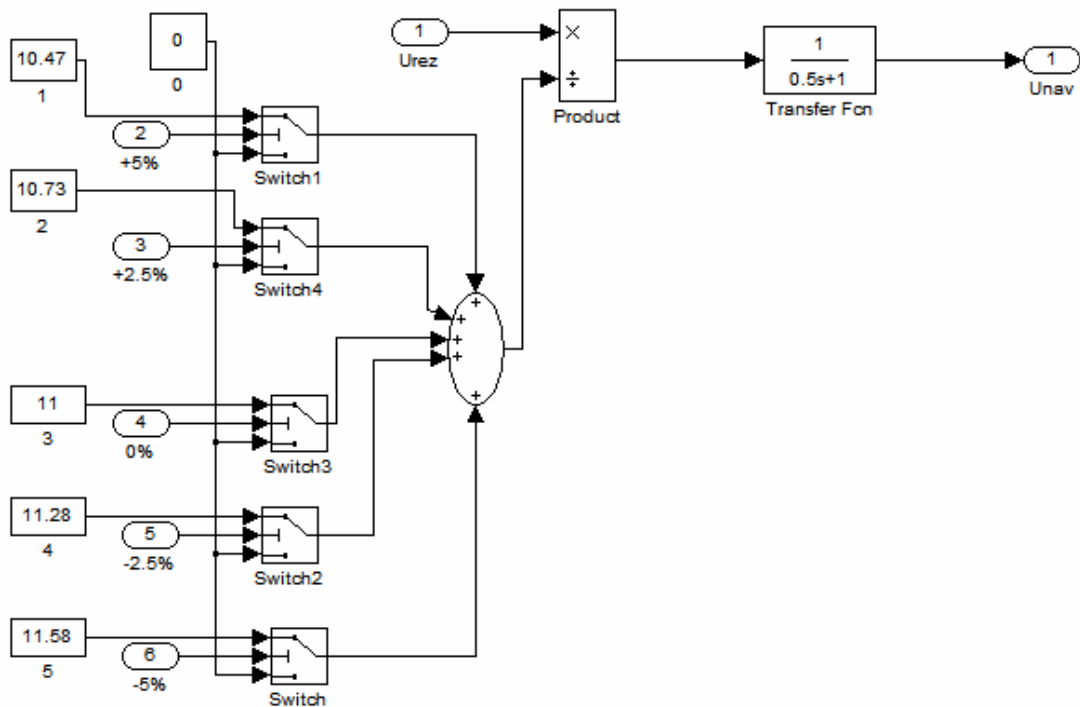


Рис. 3.18. Модель силового трансформатора зі змінним коефіцієнтом
трансформації Power transformer

Для моделювання впливу поперечного регулювання напруги на результуючу напругу, що прикладена до первинної обмотки силового трансформатора згідно з прийнятою структурою автоматичної системи регулювання введено додатковий блок $Sum U$, що показаний на рис. 3.19. Введення поперечної складової напруги (сигнал V_{ka} (вольтдобавка) на рис. 3.1), що випереджує напругу мережі на 90° ел. дозволяє отримати деякий кут зсуву між результуючою напругою на первинній обмотці силового трансформатора та напругою мережі g , який змінюється в залежності від величини поперечної вольтдобавки.

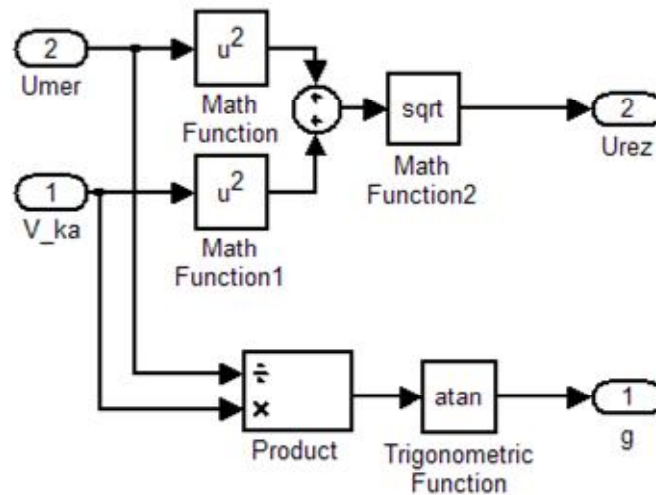


Рис. 3.19. Структура блока $Sum U$ для визначення результуючої напруги на первинній обмотці силового трансформатора

Результати моделювання у вигляді часових діаграм напруги мережі, напруги на навантаженні, реактивної потужності та вольтдобавки наведені на рис. 3.20–3.23. На діаграмах: $U_{мер}$ – напруга мережі, кВ; $U_{нав}$ – напруга на навантаженні; $U_{доб}$ – напруга на виході ТПР, кВ; Q – значення перетоку реактивної потужності на контрольованій ділянці системи електропостачання, кВАр; $U_{ВН}$ – результуюча напруга на обмотці ВН силового трансформатора, кВ.

Моделювання проводиться з вибраним способом числення *ode45 (Dormand-Prince)*, що рекомендується для моделювання складних нелінійних систем. Для коректного моделювання блоків перетворення імпульсного сигналу в потенційний в вікні властивостей пакета Simulink слід відключити автоматичне розпізнавання булевих логічних сигналів (*Boolean logic signal – off*).

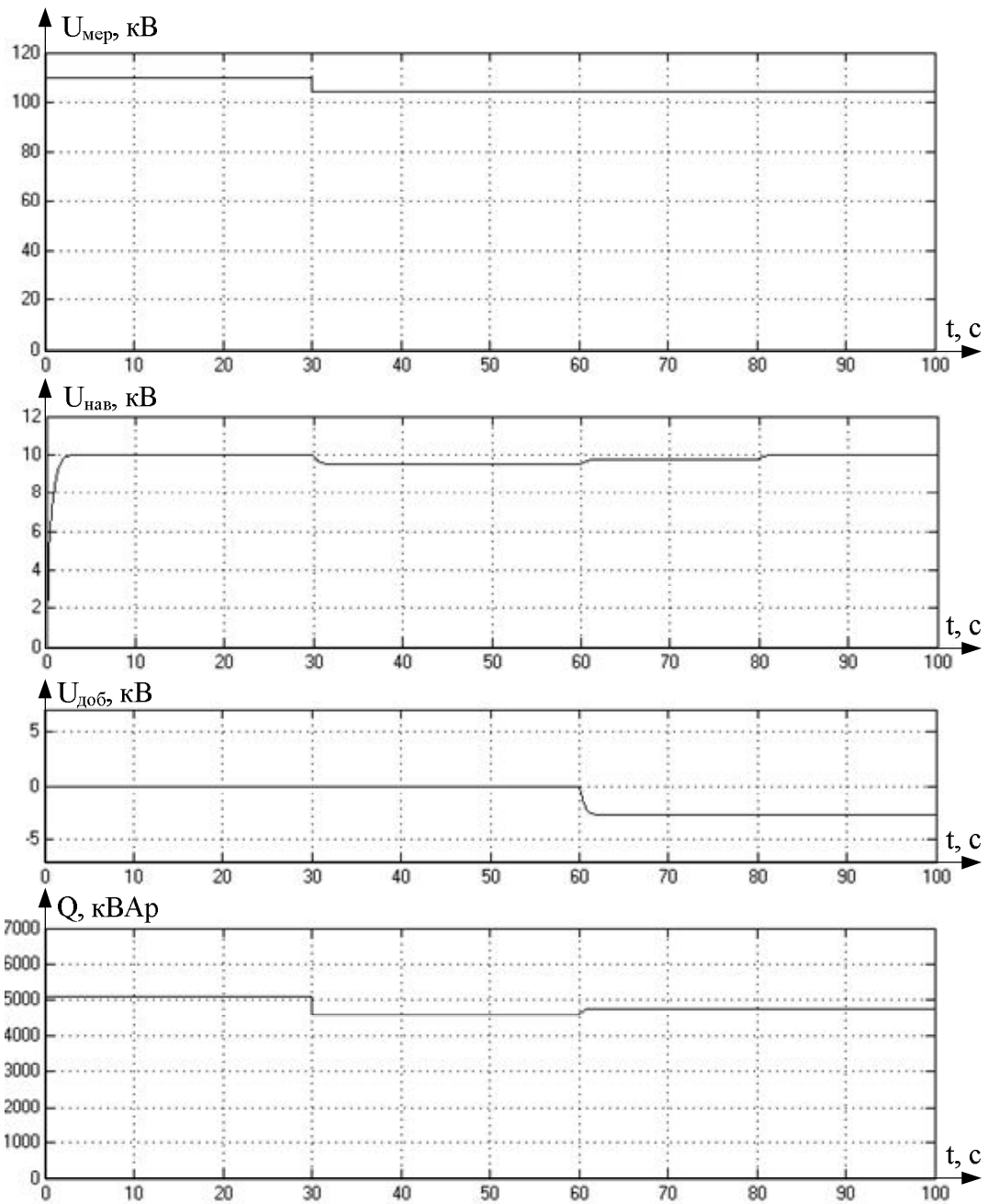


Рис. 3.20. Діаграма роботи системи регулювання при ступінчатій зміні напруги мережі від 110 до 102 кВ

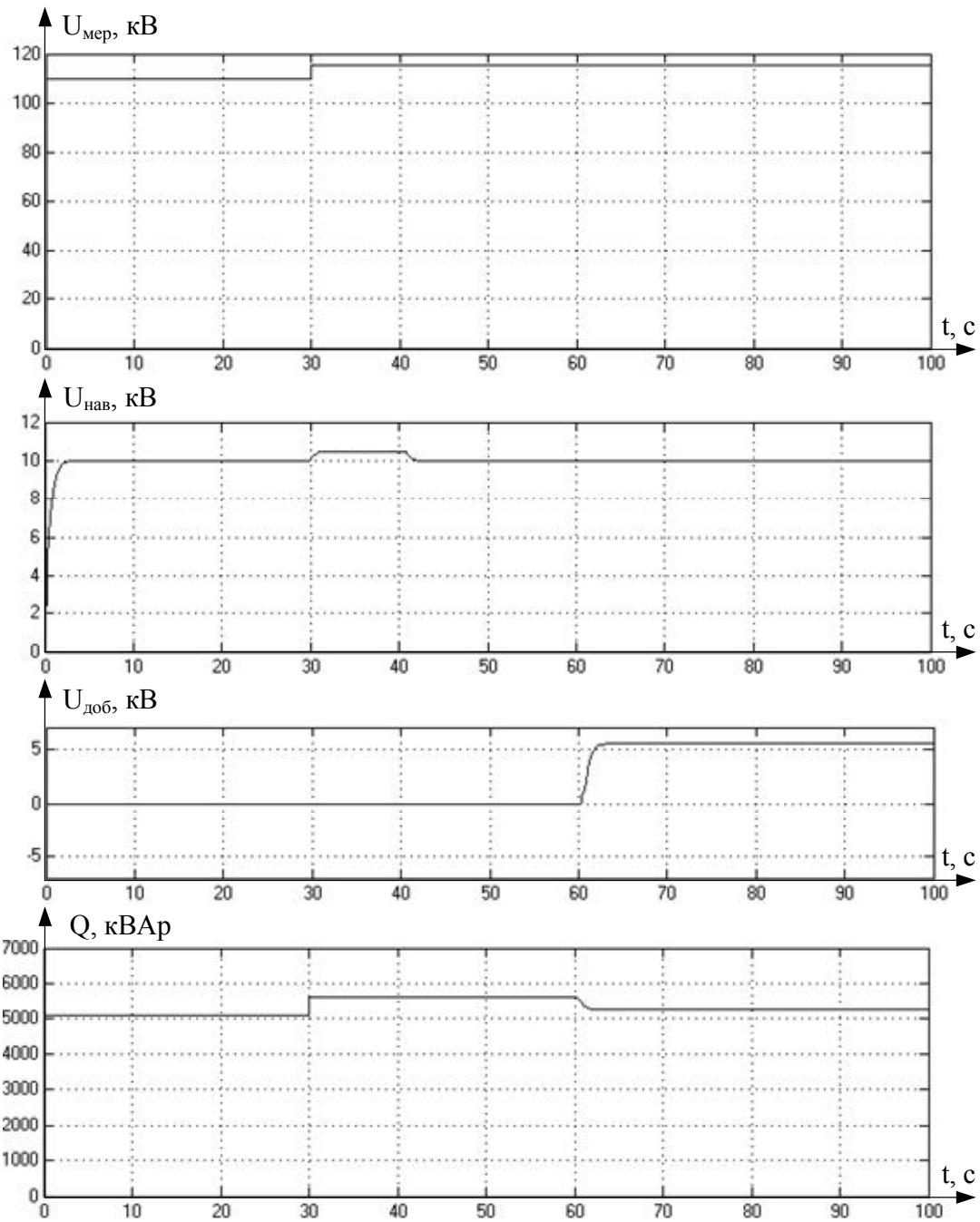


Рис. 3.21. Діаграма роботи системи регулювання при ступінчатій зміні напруги мережі від 110 до 114 кВ

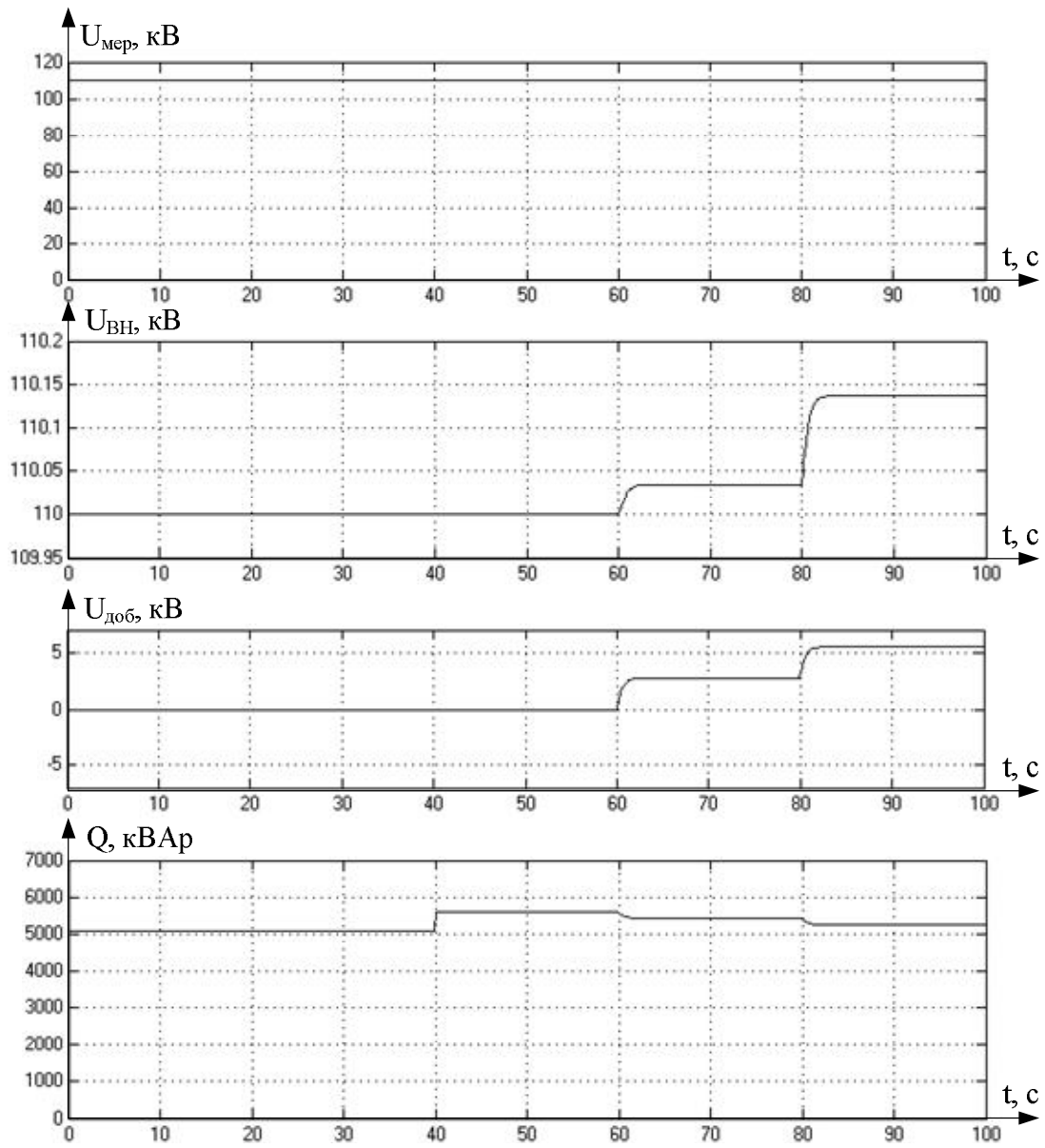


Рис. 3.22. Діаграма роботи системи регулювання при нахиді індуктивного навантаження

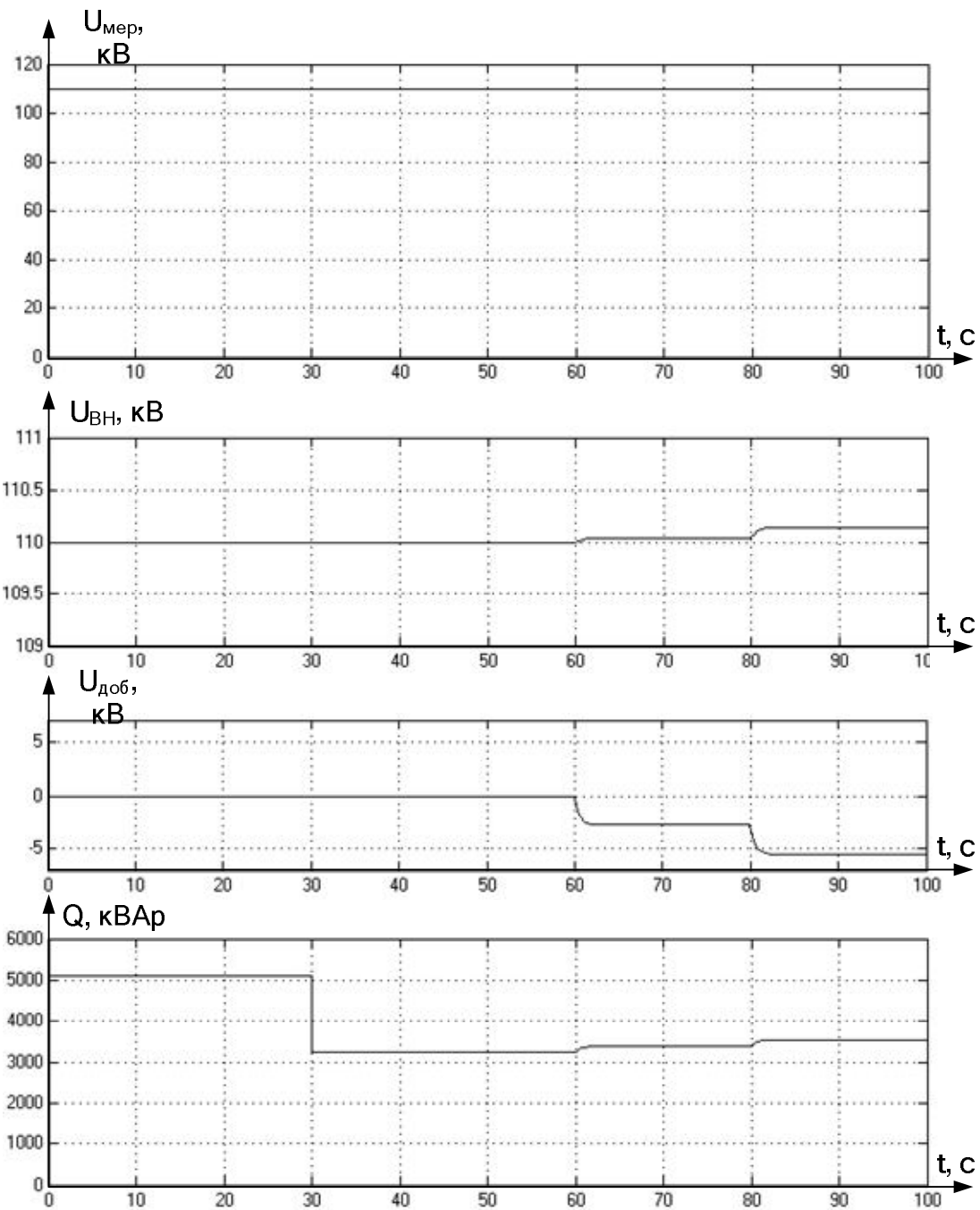


Рис. 3.23. Діаграма роботи системи регулювання при значному пониженні індуктивного навантаження

РОЗДІЛ 4

МІКРОПРОЦЕСОРНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРАМИ З ПОЗДОВЖНЬО-ПОПЕРЕЧНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ НАПРУГИ

4.1. Мікропроцесорна реалізація регулятора напруги для поздовжньо-поперечного регулювання

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

В деяких системах для ефективного керування трансформатором використовують контроль положення перемикаючого пристрою [89]. Це дає можливість контролювати відпрацювання команд перемикачів і вчасно діагностувати вихід з ладу механізму пристрою РПН.

Слід зазначити, що при застосуванні сучасної елементної бази вартість розробки і собівартість мікропроцесорного пристрою значно нижчі, ніж однакового за функціями аналогового, але ефективність системи значно вища [90].

Технічно реалізована схема підключення регулятора, що працює за законом (2.2), до зовнішніх пристроїв має вигляд, що показаний на рис. 4.1. Для вирішення поставлених задач згідно зі схемою контролер повинен мати 12 дискретних входів, 3 аналогових входи та 4 дискретні виходи. Потужний і компактний контролер Zelio SR3B261BD повністю відповідає поставленим вимогам [91].

В схемі на рис. 4.1: 1 – мікроконтролер Zelio SR3B261BD; 2 – блок управління на базі операторської панелі ХВТ РМ027, з якого задаються сигнали збільшення (Зб) або зменшення (Зм) параметра; 3 – датчики перемикачів пристроїв РПН трансформаторів; 4 – датчик струму навантаження підстанції з вихідним уніфікованим сигналом 0–10 В; 5 – датчик напруги на споживачах з вихідним уніфікованим сигналом 0–10 В; 6 – датчик потужності на контрольованій ділянці системи електропостачання з вихідним уніфікованим сигналом 4–20 мА; 7 – контактори в схемах управління електроприводами РПН.

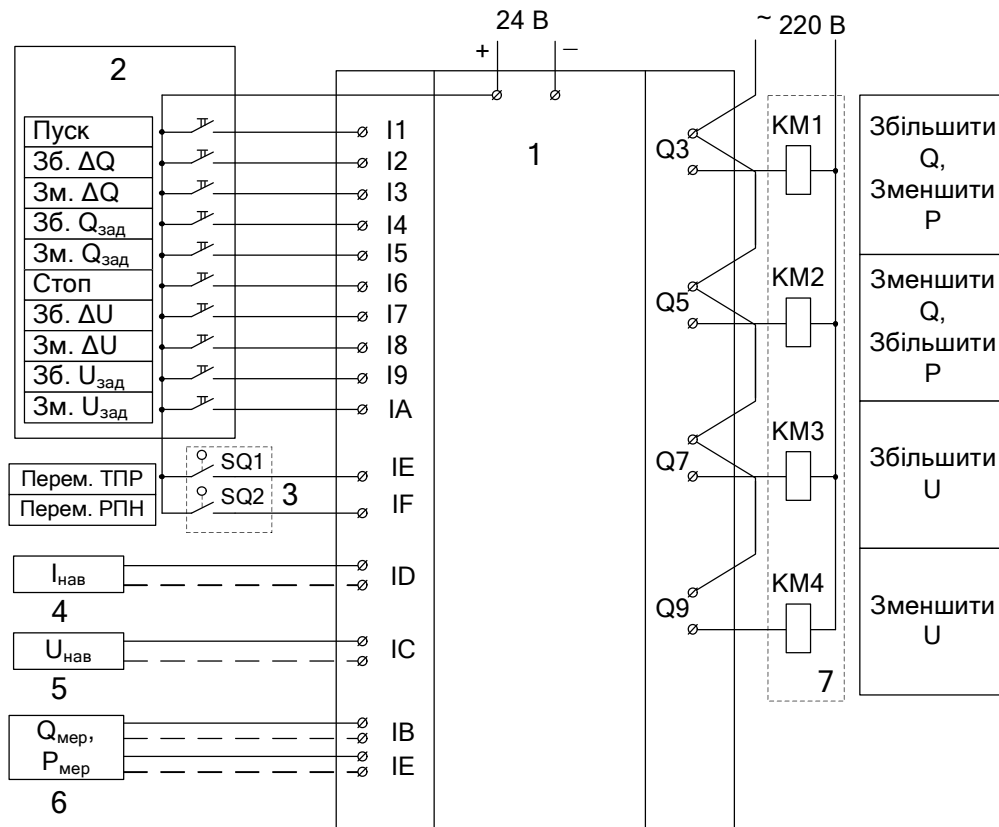


Рис. 4.1. Схема підключення мікропроцесорного регулятора з зовнішніми пристроями системи автоматичного керування трансформаторами з поздовжньо-поперечним регулюванням напруги

4.2. Програмне забезпечення мікропроцесорного регулятора для системи поздовжньо-поперечного напруги

Для функціонування контролера в якості регулятора напруги розроблено програму за допомогою мови діаграм функціональних блоків FBD [92]. Лістинг програми контролера представлено на рис. 4.2.

В програмі за допомогою блоків таймерів B63, B64, B65 та B66 задається затримка вироблення сигналу на проведення перемикання. В блоках порівняння Compare B05–B07 та B55–B58 відбувається визначення знака похідної в даний момент часу шляхом порівняння сигналів від входів ID та IB з константою 5 В, що задається блоком B06. Інформація про знак похідної на момент формування сигналу перемикання записується в тригери B70, B84 (за реактивною потужністю) та B90, B96 (за напругою на споживачах), які скидаються після проведення перемикання і надходження на входи IG та IH контролера дискретних сигналів від датчиків перемикання

електроприводів РПН. За допомогою цього сигналу проводиться також скид таймерів затримки вироблення сигналу на перемикання, що встановлює програму у вихідне положення. При цьому програма контролера встановлюється у вихідне положення незалежно від того, яким пристроєм було проведено перемикання і який саме канал регулювання спрацював, тому сигнали від датчиків перемикання поєднуються в логічному блоці АБО В50.

Функціональні блоки таймерів В72, В73, В75, В76, логічні елементи АБО В77 та НІ В78, а також RS-тригер В103 реалізують генератор тактових імпульсів, який може працювати в режимі очікування (задіяні блоки таймерів В72 та В73) та в режимі перемикання (блоки таймерів В75 та В76).

Період між тактовими імпульсами в режимі перемикання більший ніж в режимі очікування. Такий час необхідний для завершення циклу перемикання і залежить від габаритів та конструкції пристрою РПН.

За допомогою архіваторів В105, В106 та В110, В111 реалізовано диференціатори каналів вимірювання напруги та реактивної потужності. Розглянемо роботу диференціатора каналу вимірювання напруги. На архіватор В105 з переднім фронтом тактового імпульсу ГТІ записується значення напруги на навантаженні в момент часу t_1 . Із затримкою часу Δt (встановлюється таймером В107) передній фронт тактового імпульсу надходить і на вхід *latching* (запис) архіватора В106. В нього записується значення напруги на навантаженні в момент часу $t_2 = t_1 + \Delta t$. В суматорі В108 визначається різниця між двома записаними в архіваторах значеннями, знак якої і відповідає знаку похідної обвідної напруги на навантаженні. Обчислення знаку похідної обвідної реактивної потужності здійснюється аналогічно [93].

За допомогою лічильників Preset Count В36 та В44 обчислюються значення зони нечутливості регулятора за реактивною потужністю та напругою на споживачах відповідно, а за допомогою лічильників Preset Count В37 та В45 – задані значення активної та реактивної потужностей та напруги на навантаженні. В суматорах В40, В42 та В47, В48 встановлюються верхні та нижні допустимі значення регульованих параметрів, а за допомогою компараторів Compare В51 – В54 ці значення порівнюються з фактичними величинами перетоку реактивної потужності та напруги на навантаженні, що надходять відповідно з блоків В01 та В61. Останній функціональний блок є суматором, в якому обчислюється зниження напруги із врахуванням

струму навантаження, тому входи суматора B61 підключені до аналогових входів по напрузі V03 та по струму V04.

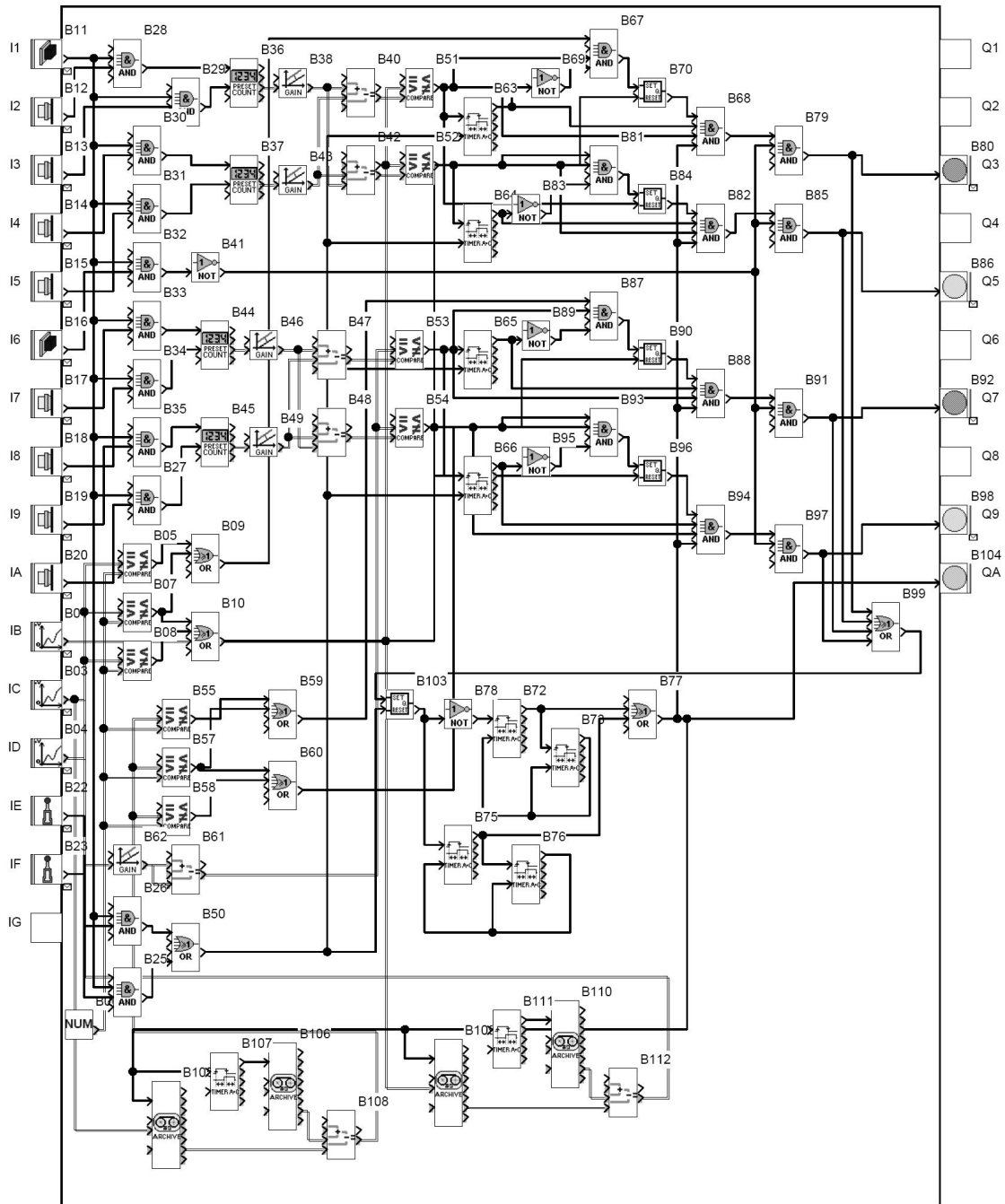


Рис. 4.2. Програма (FBD) мікропроцесорного регулятора напруги на базі контролера Zelio SR3B261BD

При виході регульованого параметра за допустимі межі повинен формуватися сигнал на відповідне перемикання пристрою РПН. Для надходження його безпосередньо на вихід контролера потрібно, щоб

відхилення параметра поза допустимі межі мало місце навіть через встановлений час затримки сигналу в таймерах В63, В64, В65 та В66 і при цьому параметр не мав тенденції до повернення в зону нечутливості (похідна регульованого параметра через час затримки рівна 0 або має знак, що збігається з напрямком виходу параметра за допустимі межі). Ця умова перевіряється логічними блоками І В68, В82, В88 та В94.

Блокування роботи пристрою відбувається при надходженні на вхід І6 дискретного сигналу від операторської панелі (див. рис. 4.1) або по відповідному біту слова керування протоколу Modbus.

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

Похибки, що характерні для вимірювальних каналів розробленого регулятора, можна розрізнити по їх джерелах виникнення. Кожен з вимірювальних перетворювачів має визначений клас точності і, відповідно, певну похибку. Функціональну схему каналів вимірювання, згідно з якою проведено оцінку похибок, зображено на рис. 4.3.

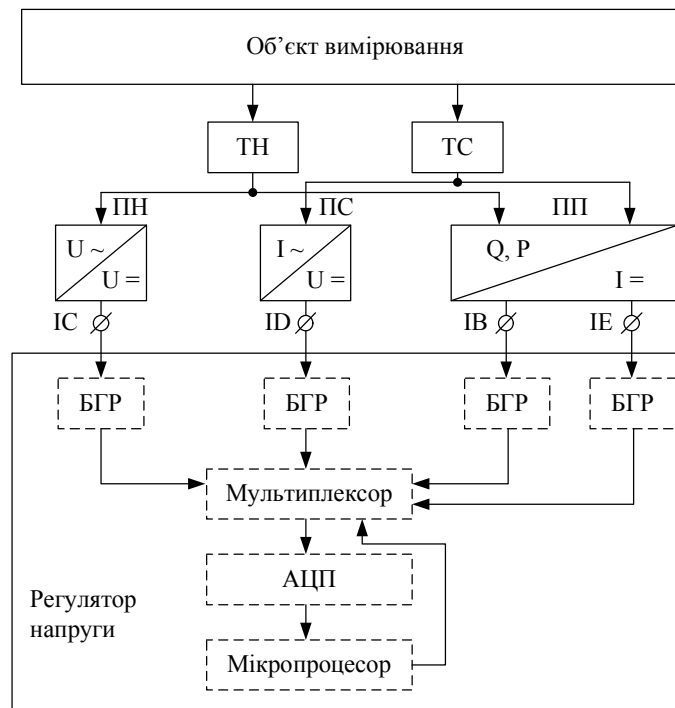


Рис. 4.3. Функціональна схема вимірювальних каналів регулятора в системі поздовжньо-поперечного регулювання напруги

На схемі: ТН – вимірювальний трансформатор напруги; ТС – вимірювальний трансформатор струму; ПН – вимірювальний перетворювач напруги; ПС – вимірювальний перетворювач струму; ПП – вимірювальний перетворювач потужності; БГР – блоки гальванічної розв’язки контролера; ІВ, ІС, ІD – аналогові входи контролера.

4.3.1. Похибки вимірювальних трансформаторів струму та напруги. У вимірювальних каналах системи регулювання напруги в умовах дефіциту реактивної потужності важливу роль відіграє точність первинних вимірювальних трансформаторів напруги та струму. Похибки цих пристроїв визначаються величиною струмів намагнічування та величиною і характером навантаження. Відповідно розрізняють похибки за напругою (для трансформаторів напруги) та струмову (для трансформаторів струму), а також кутову похибку, що характерна для обох видів вимірювальних трансформаторів [94, 95].

Похибки трансформаторів струму (струмова та кутова) обумовлені наявністю струму намагнічування та розраховуються з формул:

$$\delta_H = \frac{33.8 \cdot l_i \cdot z_2^{0.6} \cdot I_{2i}^{1.2}}{\left(\frac{I}{I_{1i}}\right)^{0.4} \cdot f^{0.6} \cdot F_{1i}^{1.6} \cdot S_i^{0.6}} \cdot \sin(\psi + \alpha) \cdot 100\%, \quad (4.1)$$

де l_m – середня довжина магнітного потоку в магнітопроводі, м; z_2 – опір вітки вторинного струму (повний опір вторинного кола і вторинної обмотки), Ом; f – частота змінного струму, Гц; S_m – дійсний переріз магнітопроводу, м²; ψ – кут втрат, рад.; α – кут зсуву фаз між вторинною ЕРС та вторинним струмом I_2 , рад.; I_{1H} , I_{2H} – номінальні струми первинної та вторинної обмоток трансформатора струму відповідно; F_{1H} – номінальна магніторушійна сила первинної обмотки, А·витків.

Кутова похибка:

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

Основний вплив на величини похибок трансформаторів струму мають їх завантаження по струму та опір вторинного кола.

Граничні значення струмової і кутової похибок трансформаторів струму для вимірювань (за ГОСТ 7746-89) наведені в табл. 4.1

Таблиця 4.1

Струмові і кутові похибки вимірювальних трансформаторів струму

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

Результати розрахунку кутової та струмової похибок трансформаторів типу ТПОЛ 600/5 класу точності 0,5, що проведені за формулами (4.1) та (4.2) показані на рис. 4.4 та 4.5. Вид апроксимуючого виразу – і критерій узгодженості розрахункової і апроксимуючої кривої представлені на рисунках відповідно.

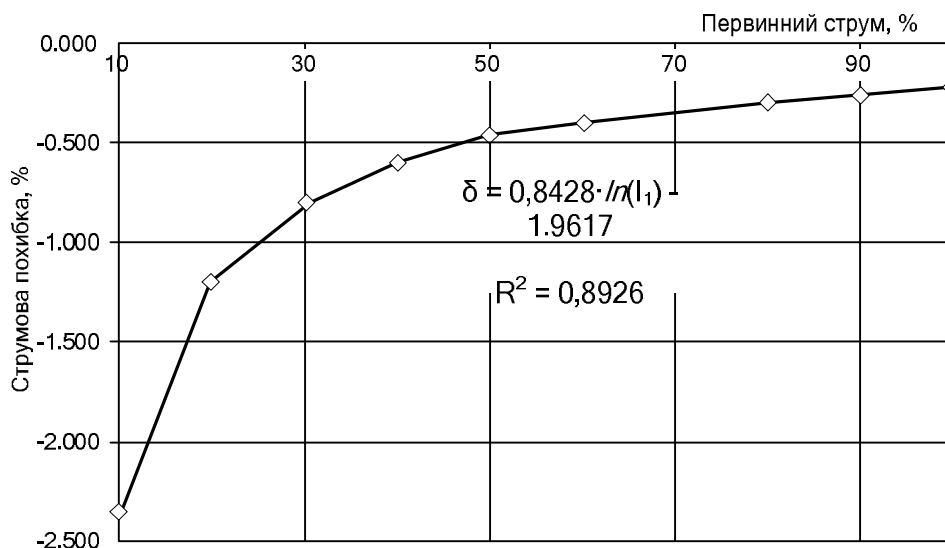


Рис. 4.4. Залежність струмової похибки трансформатора струму ТПОЛ 600/5 від первинного струму

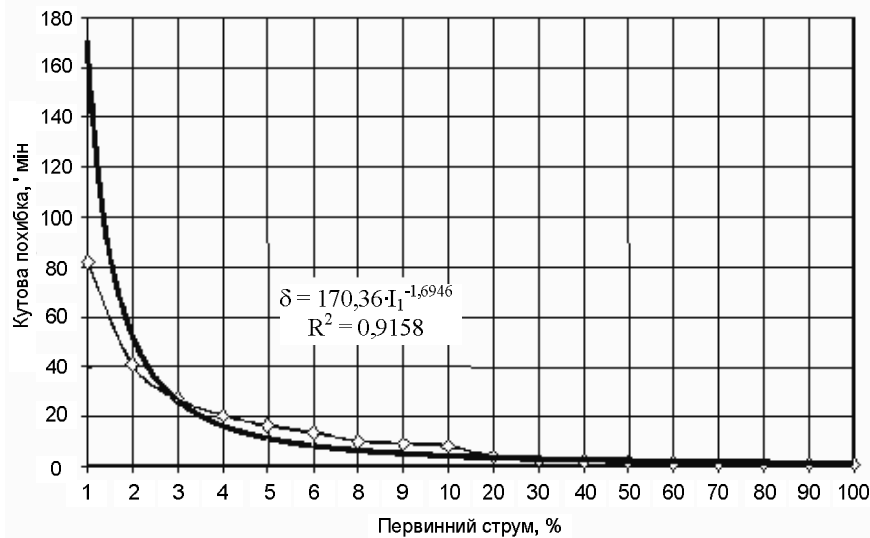


Рис. 4.5. Залежність кутової похибки трансформатора струму ТПОЛ 600/5 від первинного струму (жирна лінія – апроксимація)

Для діапазонів вимірювання (1–10 % та 10–100 %) первинного струму від номінального значення математичної моделі струмової похибки найпоширеніших трансформаторів струму наведені в табл. 4.2.

Другим джерелом похибок вимірювальних каналів є трансформатор напруги. В такому пристрої похибка визначається виразом (4.3)

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

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

Таблиця 4.2

Математичні моделі струмових похибок трансформаторів струму

Тип трансформатора струму	Струмова похибка δ_I [%] для $1 \% < I_1 \leq 10 \%$	Струмова похибка δ_I [%] для $10 \% < I_1 < 100 \%$
ТПОЛ10-600/5	δ_I [%] = $0,8428 \cdot \ln(I^*_1) - 1,9617$	δ_I [%] = $0,0841 \cdot \ln(I^*_1) - 0,3919$
ТЛШ10-2000/5	δ_I [%] = $0,7227 \cdot \ln(I^*_1) - 1,6815$	δ_I [%] = $0,0722 \cdot \ln(I^*_1) - 0,3353$
ТПШФД10-3000/5	δ_I [%] = $0,5986 \cdot \ln(I^*_1) - 1,2261$	δ_I [%] = $0,0597 \cdot \ln(I^*_1) - 0,1111$

Використовуючи векторну діаграму трансформатора напруги з достатньою точністю можливо виразити наступним чином:

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

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

де U_2 – напруга вторинної обмотки трансформатора, В; I_a' – активна складова струму холостого ходу, зведена до вторинної обмотки трансформатора, А; r_1' – зведений опір первинної обмотки трансформатора до вторинної, Ом; I_p' – зведена реактивна складова струму холостого ходу трансформатора до вторинної обмотки, А; x_1' – реактивний опір первинної обмотки трансформатора, зведений до вторинної обмотки, Ом; I_2 – струм навантаження трансформатора, А; r_2 – опір вторинної обмотки трансформатора, Ом; $\cos \varphi_2$ – коефіцієнт потужності навантаження; x – індуктивний опір трансформатора, Ом.

Кутова похибка трансформатора напруги визначається з виразу (4.6).

$$\delta' = \delta_x' + \delta_n', \quad (4.6)$$

де δ_x' – кутова похибка, обумовлена струмом холостого ходу; δ_n' – кутова похибка, обумовлена струмом навантаження.

Складові кутової похибки визначаються таким чином:

$$\delta_x' = \frac{3440 \cdot (I_\delta' - I_a')}{U_2}; \quad (4.7)$$

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

Результати розрахунку похибок трансформатора напруги показані на рис. 4.6 та 4.7 Основний вплив на похибку трансформатора напруги має величина вторинного навантаження I_2 .

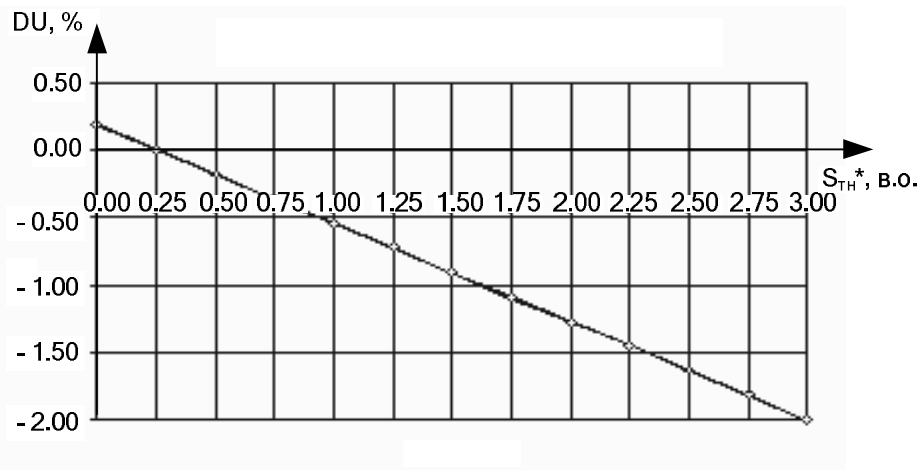


Рис. 4.6. Залежність похибки трансформатора напруги від навантаження

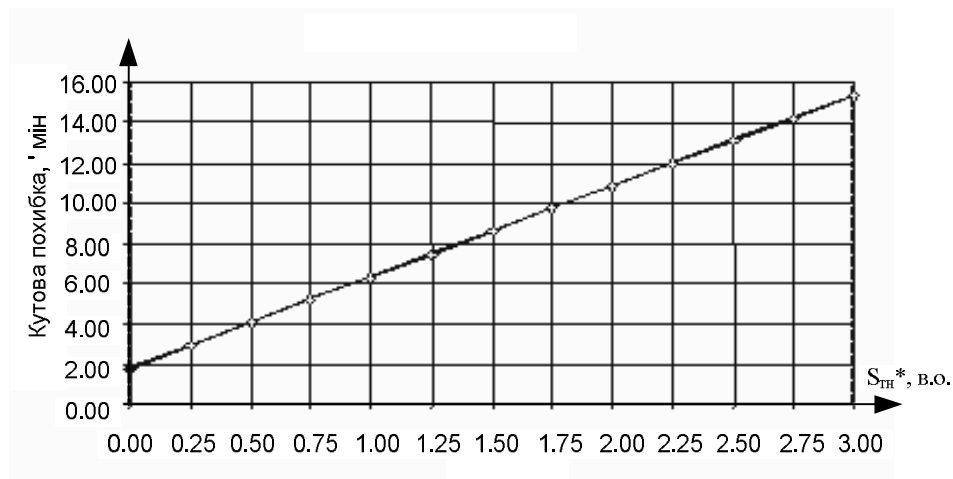


Рис. 4.7. Залежність кутової похибки трансформатора напруги від навантаження

Залежність похибки трансформатора напруги від коефіцієнта завантаження за потужністю (відношенням фактичного навантаження вторинної обмотки трансформатора напруги до номінального значення навантаження) має вигляд (4.9)

$$\delta_U[\%] = -0,73 \cdot K_3 + 0,35, \quad (4.9)$$

де K_3 – завантаження трансформатора напруги по вторинній обмотці, в.о. [96].

4.3.2. Похибки вимірювальних перетворювачів напруги, струму та потужності. Для введення даних до мікропроцесорного контролера вихідні сигнали з трансформаторів струму та напруги слід

узгодити з діапазоном вхідних сигналів контролера. В останньому аналогові входи розраховані на діапазон 0–10 В постійної напруги та 0–5 мА постійного струму. Відповідно крім похибки вимірювальних трансформаторів слід врахувати похибки, що вносяться у вимірювальні канали регулятора напруги вимірювальними перетворювачами змінної напруги, струму та потужності. Відомі перетворювачі розрізняються за принципом вимірювання частотної імпульсні та часоїмпульсні, кодуєчі (з цифровим вихідним сигналом), перетворювачі, що побудовані на операційних підсилювачах тощо [97–99].

На теперішній час побудовані промислові вимірювальні перетворювачі з нормованою похибкою вимірювальних каналів [100–103]. Тому питання оцінки точності вимірювальних перетворювачів в системі регулювання напруги вирішується підбором таких перетворювачів, що задовольняють необхідну точність вимірювання. Для цього основна похибка по кожному каналу не повинна перевищувати 0,5 % від діапазону зміни вихідного сигналу. Згідно з табл. 4.3 задовільними вимірювальними перетворювачами є триканальні вимірювальні перетворювачі напруги ТПТ-865/3 та струму ТПТ-265/3, а також перетворювач активної та реактивної потужності ЭП8530/4 [104]. При цьому навантаження на трансформатори напруги з вибраними вимірювальними перетворювачами гарантується виробником не більше $0,5 \cdot S_n$, що відповідає максимальній основній похибці $\gamma_{тн} = 0,25 \%$ (див. рис. 4.4), а основна похибка перетворювача складає $\gamma_{пч} = 0,25 \%$ відповідно. Основну похибку вимірювального трансформатора струму типу ТПШФД10-3000/5 розраховуємо згідно з аналітичним виразом, причому навантаження приймаємо 0,75 від номінального (табл. 4.2):

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

Основна похибка вимірювального перетворювача струму типу ТПТ-265/3 складає 0,128 % [102].

4.3.3. Похибки АЦП. Для вимірювальних АЦП [106, 107] встановлюється, що їх основна відносна (тобто пропорційна вимірюваному значенню) похибка повинна виражатися у відсотках значення виміряної величини, а не кінцевого значення робочого діапазону. При рівності виміряної величини кінцевому значенню робочого діапазону основна відносна похибка чисельно рівна зведеній похибці при звичайному нормуванні. Для реальних цифрових

вимірювальних каналів приладів загальна похибка вимірювання включає відносну і інструментальну (абсолютну) похибки. Інструментальна похибка не залежить від значення вимірюваного сигналу, і визначається сумарним впливом похибок і нестабільністю параметрів окремих вузлів і елементів АЦП. Сюди можна віднести похибки і нестабільність рівнів квантування, резисторів, конденсаторів і активних елементів. У деяких приладів до складу абсолютної похибки входить також похибка внаслідок дрейфу нуля підсилювача, пристроїв порівняння і формувальних пристроїв. Граничне значення абсолютної похибки визначається принципом побудови АЦП, застосованою елементною базою і не залежить від часу його експлуатації.

Таблиця 4.3

**Порівняльна характеристика вимірювальних перетворювачів
напруги, струму та реактивної потужності**

Марка перетворювача	ПНС-2-08-4	ПНС-3-03-4	ПІТ-865(265)/3	ЕП-34Д (Е855С)	ЭП8530/4
Вимірюваний параметр	напруга 1 канал	струм 1 канал	напруга (струм)	напруга (струм)	потужність
Діапазон зміни вимірюваного параметра	0-500 В 50 Гц	0-5 А 50 Гц	0-500 В, 0-5 А	0-400 В, 0-5 А	380 + 8 В 0-5 А
Діапазон зміни вихідного сигналу, В	0-10	0-10	0-10	0-20 мА	0-5 мА
Основна похибка, %	0,4	0,25	0,25	0,5	0,5
Додаткова похибка при зміні напруги та зовн. випром.	± 0,2 %	± 0,2 %	Згідно МЕК 255-4 ± 0,2 %	–	+0,25 – +1 %
Споживана потужність, ВА	6	6	0,1 (від вх. сигн.)	4,0 + 0,5 (вх. сиг.)	5
Виробник	КП МІКРОЛ Україна	КП МІКРОЛ Україна	Vertesz Electronic, Польща	Комплект-сервіс, Росія	«Енерго Сила», Білорусь

Динамічна похибка АЦП визначається як різниця між зафіксованим за допомогою АЦП значенням вимірюваної величини і її фактичним значенням у момент відліку. Ця похибка, з одного боку, визначається зміною вимірюваної величини протягом вимірювання, а з іншого – інерційністю окремих елементів АЦП, тобто його швидкодією, кінцевою тривалістю вимірювального циклу, протягом якого вимірюваний сигнал змінюється.

При аналізі джерел похибок доцільно групувати абсолютну і відносну складові так, щоб можна було виділити похибки, що усуваються в процесі установки нуля і калібрування АЦП. Це дозволить встановити мінімальними похибки вимірювальних каналів після проведення вказаних регулювань і похибку, яка може нагромадитися в приладі головним чином унаслідок зміни умов навколишнього середовища за певний час. Необхідно також враховувати вплив коливань напруги живлення або розрядку автономних джерел живлення. Напруга живлення всіх вузлів, що визначають похибку АЦП, необхідно жорстко стабілізувати і фільтрувати. Коефіцієнт стабілізації залежно від точності приладу повинен бути не нижчим 200–300 (наприклад, компенсаційні стабілізатори із застосуванням ОП [106]).

Похибка квантування обумовлена скінченною кількістю рівнів, на які розбивається діапазон вимірювання і залежить від ширини цього діапазону і розрядності АЦП. Похибка може бути описана прямокутним законом розподілу [108], що відповідає рівній густині ймовірності похибки квантування в межах $\pm h/2$, де h – крок квантування:

$$h = \frac{U_{D\max}}{2^n}, \quad (4.10)$$

де $U_{D\max}$ – максимальне значення вхідної напруги АЦП; n – кількість розрядів АЦП.

Абсолютна похибка квантування розраховується з виразу:

$$\Delta_{DU} = \frac{U_{\max}}{2^{n+1}}, \quad (4.11)$$

де U_{\max} – максимальне значення напруги, яке необхідно вимірювати.

Значення відносного середньоквадратичного відхилення цієї похибки розраховують з формули [109]

$$\sigma_{DU} = \frac{U_{\max}}{2^{n+1} \cdot \sqrt{3} \cdot U_U}, \quad (4.12)$$

де U_U – напруга на виході датчика напруги.

Закон розподілу похибки квантування при вимірюванні значення напруги описується таким виразом [108]:

$$p(\Delta_{DU}) = \frac{1}{h} = \frac{2^n}{U_{\max}}; \quad \Delta_{DU} \in \left[-\frac{U_{\max}}{2^{n+1}}, \frac{U_{\max}}{2^{n+1}} \right]. \quad (4.13)$$

Аналогічно розраховується похибка квантування АЦП при перетворенні значення струму. Абсолютна похибка квантування

$$\Delta_{DI} = \frac{I_{\max}}{2^{n+1}}, \quad (4.14)$$

де I_{\max} – максимальне значення струму, яке необхідно вимірювати.

Середньоквадратичне відхилення похибки вимірювання струму

$$\sigma_{DI} = \frac{I_{\max}}{2^{n+1} \cdot \sqrt{3} \cdot U_I}, \quad (4.15)$$

де U_I – напруга на виході датчика напруги.

Закон розподілу похибки квантування при вимірюванні струму

$$p(\Delta_{DI}) = \frac{1}{h} = \frac{2^n}{I_{\max}}; \quad \Delta_{DI} \in \left[-\frac{I_{\max}}{2^{n+1}}, \frac{I_{\max}}{2^{n+1}} \right]. \quad (4.16)$$

Максимальне діюче значення фазної напруги на навантаженні приймемо $U_{\max} = 10 \text{ кВ} + 10\% = 11 \text{ кВ}$, струму $I_{\max} = 300 \text{ А}$. При коефіцієнті потужності навантаження $\cos \varphi \approx 0,8$ таким значенням напруги та струму навантаження відповідає рівень споживаної реактивної потужності $Q_{\max} = 550 \text{ квар}$. Отже при 16-розрядному АЦП, який містить контролер класу Zelio Logic одержимо такі значення абсолютних Δ та відносних ε похибок:

$$\begin{aligned} \Delta_{DU} &= \frac{11000}{2^{17}} = 0,294 \text{ В}, & \gamma_{DU} &= \frac{0,294}{11000} \cdot 100\% \approx 0,000764 \text{ \%}, \\ \Delta_{DI} &= \frac{300}{2^{17}} = 0,0023 \text{ А}, & \gamma_{DI} &= \frac{0,023}{300} \cdot 100\% \approx 7,67 \cdot 10^{-4} \text{ \%}, \\ \Delta_{DQ} &= \frac{8,08 \cdot 10^7}{2^{17}} = 616,837 \text{ вар}, & \gamma_{DQ} &= \frac{616,837}{8,08 \cdot 10^7} \cdot 100\% \approx 0,00076 \text{ \%}. \end{aligned}$$

Отже, внутрішня похибка АЦП регулятора напруги є набагато меншою за похибки вимірювальних трансформаторів та перетворювачів, і нею можна знехтувати, якщо вона є меншою в 5 разів від найбільшої сумарної складової [110]:

$$\gamma_{\text{пч}} / \gamma_{DU} = 0,25 / 0,00076 = 328 \text{ разів.}$$

Таким чином результуюча абсолютна похибка вимірювальних каналів оцінюватиметься за похибками вимірювальних трансформаторів та перетворювачів. Проведемо розрахунок сумарної похибки каналу вимірювання напруги на вводах споживачів згідно рекомендованою методикою [110], приймаємо закон розподілу похибки трансформатора напруги трикутним (Сімпсона) [111], а закон розподілу похибки вимірювального перетворювача напруги рівномірним [112].

СКВ похибок вимірювального трансформатора та перетворювача відповідно:

$$\sigma_{\delta i} = \frac{\gamma_{\delta i}}{\sqrt{6}} = \frac{0.25}{\sqrt{6}} = 0.102 \%,$$

$$\sigma_{\gamma_{\mp}} = \frac{\gamma_{\gamma_{\mp}}}{\sqrt{3}} = \frac{0.25}{\sqrt{3}} = 0.144 \%.$$

Результуюче СКВ похибки вимірювання напруги за допомогою вимірювального трансформатора та перетворювача:

$$\sigma_{\delta \delta i} = \sqrt{\sigma_{\delta i}^2 + \sigma_{\gamma_{\mp}}^2}, \quad (4.17)$$

$$\sigma_{\delta \delta i} = \sqrt{0,102^2 + 0,144^2} = 0,177 \%.$$

Основна похибка вимірювання для визначеного СКВ з допустимою імовірністю 0,95 складатиме [110]:

$$\gamma_{\text{вим}} = 1,6 \cdot \sigma_{\text{вим}}, \quad (4.18)$$

$$\gamma_{\text{вим}} = 1,6 \cdot 0,177 = 0,283 \%.$$

Абсолютна похибка в каналі вимірювання напруги на вводах споживачів

$$\Delta_U = U_{\text{ном}} \cdot \gamma_{\text{вим}} / 100, \quad (4.19)$$

де $U_{\text{ном}}$ – номінальне значення напруги на вводах споживачів, кВ.

$$\Delta_U = 10000 \cdot 0,283 / 100 = 98,995 \text{ В} \approx 100 \text{ В}.$$

Отже, вимірне значення напруги на вводах споживачів за допомогою вимірювального трансформатора напруги та перетворювача напруги визначатиметься як $U_{\text{вим}} = 10000 \pm 100 \text{ В}$. Розрахунок похибок каналів вимірювання струму навантаження та споживаної реактивної потужності проводиться за такою ж методикою.

4.3.4. Оцінка помилок першого і другого роду при вимірюванні напруги. Вимірне регулятором значення напруги знаходитиметься в межах дійсного значення напруги та відхилення від нього [108]

$$(U_{\text{д}} - k_a \Delta_U) \leq U \leq (U_{\text{д}} + \Delta_U), \quad (4.20)$$

де U – вимірювана напруга; $U_{\text{д}}$ – дійсне значення напруги; Δ_U – допустиме відхилення від фактичного значення напруги [109]; k_a – коефіцієнт асиметрії поля допуску.

Помилка спрацьовування регулятора може бути спричинена за рахунок похибок вимірювання напруги та струму, але згідно з табл. 4.2 для струму, що складає 10 % від номінального, похибка трансформатора струму не перевищує

$$\delta_I [\%] = 0,0597 \cdot \ln(0,1) - 0,1111 = -0,13 \%$$

Оскільки вимірювання напруги і струму проводиться одночасно і незалежно, то похибка визначатиметься в тому каналі, де більша допустима похибка, а в режимі, що близький до номінального більше значення похибки має канал вимірювання напруги.

Математичне сподівання закону розподілу ймовірностей вимірюваної напруги збігається з його номінальним значенням, що встановлюється стандартним рангом напруг в мережах електропостачання [5]. Позначимо центроване значення параметра

$$T = U - U_d. \quad (4.21)$$

Тоді поле допуску визначається з формули

$$-k_a \Delta_U \leq T \leq \Delta_U. \quad (4.22)$$

Поле допуску симетричне, оскільки відхилення напруги нормується як в сторону збільшення, так і в сторону зменшення [108], тобто математичне сподівання похибки $m_{\Delta_U} = 0$. Тоді $k_a = 1$, а поле допуску напруги визначається $-\Delta \leq T \leq \Delta$.

Якщо виміряне в цей момент часу значення напруги на споживача знаходиться в межах поля допуску, то регулятор не формує команди на перемикання пристрою РПН. При виході вимірюного значення напруги за межі поля допуску регулятором напруги формуватиметься команда на проведення перемикання пристрою РПН у відповідному напрямку.

Результат вимірювання представляється сумою залежних випадкових величин вимірюваного параметра і похибки вимірювання [109]

$$U_v = U + T + \Delta_U + m(\Delta_U). \quad (4.23)$$

Виміряні значення напруги на навантаженні характеризуються гістограмою ймовірностей напруги на навантаженні, яка подана на рис. 4.8.

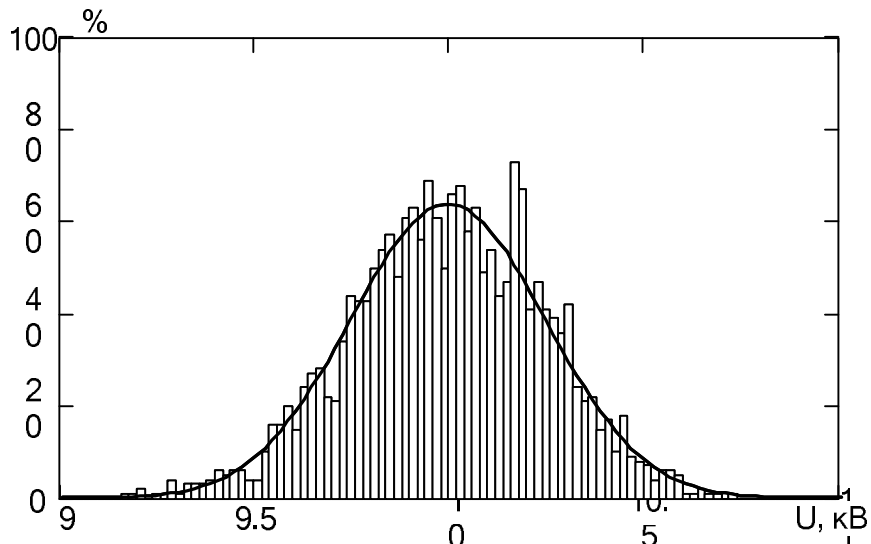


Рис. 4.8. Гістограма виміряного значення напруги в мережі 10 кВ

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

$$P(U) = \frac{1}{\sigma_U \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(U - m(U))^2}{2\sigma_U^2}\right), \quad (4.24)$$

де U – вимірне значення напруги; $m(U)$ – математичне сподівання вимірюваної напруги; σ_U – середнє квадратичне відхилення вимірюваної напруги.

Закон розподілу похибки у вимірювальному каналі напруги отримуємо шляхом згортання трикутного закону розподілу похибки трансформатора напруги та рівномірного закону розподілу похибки вимірювального перетворювача напруги. Композиція законів розподілу похибок визначається інтегралом згортання:

$$p(y) = \int_{-\infty}^{\infty} p_1(y-x) \cdot p_2(x) dx, \quad (4.25)$$

де $p(y)$ - результуючий закон розподілу (згортка), $p_1(x)$ та $p_2(x)$ - початкові закони розподілу. Композиція законів розподілу похибки обчислена емпірично згідно з рекомендаціями [110].

Графічне представлення законів розподілу напруги та похибок її вимірювання наведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Закони розподілу напруги та похибок її вимірювання

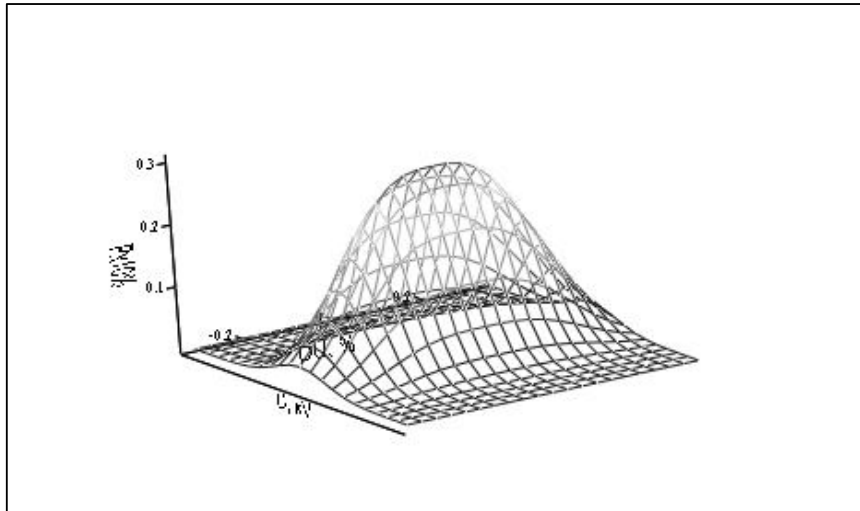
Закон розподілу вимірюваної напруги	$P_U(T) = \frac{1}{\sigma_U \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(T - M_U)^2}{2\sigma_U^2}\right)$ Нормальний (Гауса)	СКВ: $\sigma_U = 0,68$ МО: $M_U = 10$	
Закон розподілу похибки трансформатора напруги	$p_{mn}(P) = \begin{cases} 0 & \text{якщо } P < -\gamma_{mn} \\ 3P + \frac{3}{4} & \text{якщо } P \geq -\gamma_{mn} \\ -3P + \frac{3}{4} & \text{якщо } P \geq 0 \\ 0 & \text{якщо } P > \gamma_{mn} \end{cases}$ трикутний (Сімпсона)	СКВ: $\sigma_{TH} = 0,102$ МО: $M_P = 0,28\%$	
Закон розподілу похибки перетворювача	$p_{пч}(Q) = \begin{cases} 0 & \text{якщо } Q < -\gamma_{пч} \\ 0,5 & \text{якщо } -\gamma_{пч} \leq Q \leq \gamma_{пч} \\ 0 & \text{якщо } Q > \gamma_{пч} \end{cases}$ рівномірний	СКВ: $\sigma_{TH} = 0,14$ МО: $M_P = 0,25\%$	
Композиція законів розподілу похибок	$P_P(P) = \int_{-1}^{+1} p_{пч}(Q) \cdot p_{TH}(P-Q) \cdot dQ$ Інтеграл згортки законів трансформатора та перетворювача	СКВ: $\sigma_{TH} = 0,177$ МО: $M_P = 0$	

Сумісний закон розподілу напруги та похибки її вимірювання має вигляд:

$$P_U(T, P) = \frac{1}{\sigma_U \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(T - M_U)^2}{2\sigma_U^2}\right) \cdot \int_{-1}^{+1} p_{пч}(Q) \cdot \delta_{oi}(T - Q) \cdot dQ, \quad (4.26)$$

де T – діапазон зміни вимірюваного значення напруги; P – діапазон зміни похибки вимірювання напруги трансформатором; Q – діапазон зміни похибки вимірювання напруги перетворювачем; M_U – математичне сподівання вимірюваної напруги; σ_U – середнє квадратичне відхилення (СКВ) вимірюваної напруги; $\sigma_{вим}$ – СКВ похибки вимірювання напруги.

Графічне представлення сумісного закону розподілу показано на рис. 4.9.



(X, Y, Z)

Рис. 4.9. Графічне представлення сумісного закону розподілу вимірювання напруги та його похибки

Помилка першого роду (випадок, коли приймається рішення, що напруга знаходиться за межами поля допуску, але насправді вона знаходиться в заданих межах) визначається [108]

$$\alpha_U = \int_{-k_a \Delta}^{\Delta} \int_{-\infty}^{U-T_2} P(U, \Delta(U, \Delta)) dU + \int_{-k_a \Delta}^{\Delta} \int_{T_1-U}^{\infty} P(U, \Delta(U, \Delta)) dU . \quad (4.27)$$

Помилка другого роду (випадок, коли приймається рішення, що напруга знаходиться в заданих межах, але насправді вона знаходиться за допустимими межами) визначається [108]

$$\beta_U = \int_{-\infty}^{-k_a \Delta T_1-U} \int_{T_2-U}^{\Delta_U} P(U, \Delta_U) d(\Delta_U) dU + \int_{\Delta T_2-U}^{\infty T_1-U} \int P(U, \Delta(U, \Delta)) dU . \quad (4.28)$$

У формулах (4.27) та (4.28) вибрані межі інтегрування

$$T_1 = \Delta - m(\Delta_U); \quad T_2 = -k_a \Delta - m(\Delta_U). \quad (4.29)$$

Чисельне розв'язання рівнянь (4.27) та (4.28) виконано в середовищі MathCAD 7 Pro. [113]. Дані розрахунків наведені в додатку В.

Залежності помилок першого і другого роду від величини середнього квадратичного відхилення наведені на рис. 4.10, 4.11, можуть бути в подальшому використані для оцінки α і β за результатами експериментальних досліджень, отриманих в процесі метрологічної атестації каналів вимірювання напруги регуляторів. За допомогою залежностей (рис. 4.10 та 4.11) згідно з обчисленим СКВ за (4.17) визначаємо імовірності помилок першого та другого роду відповідно.

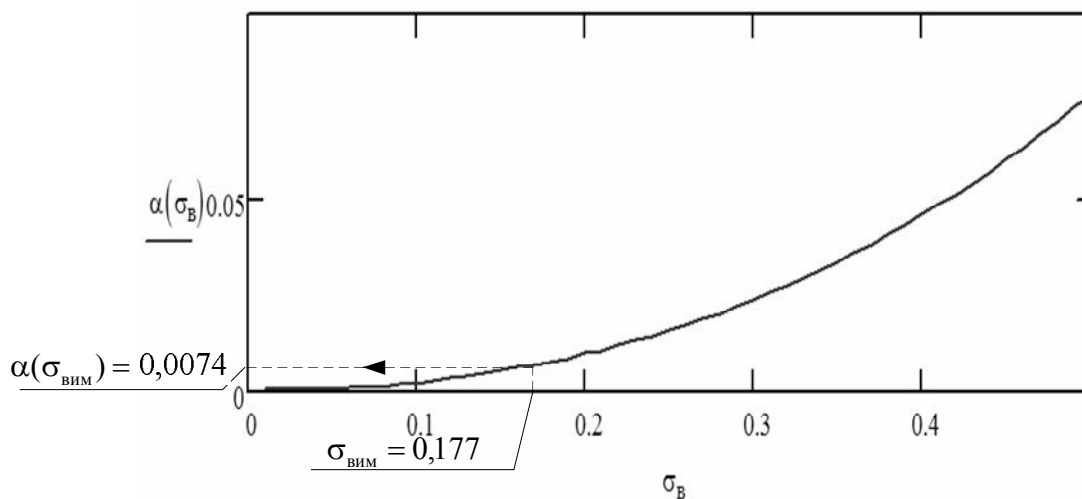


Рис. 4.10. Номограма визначення помилки першого роду

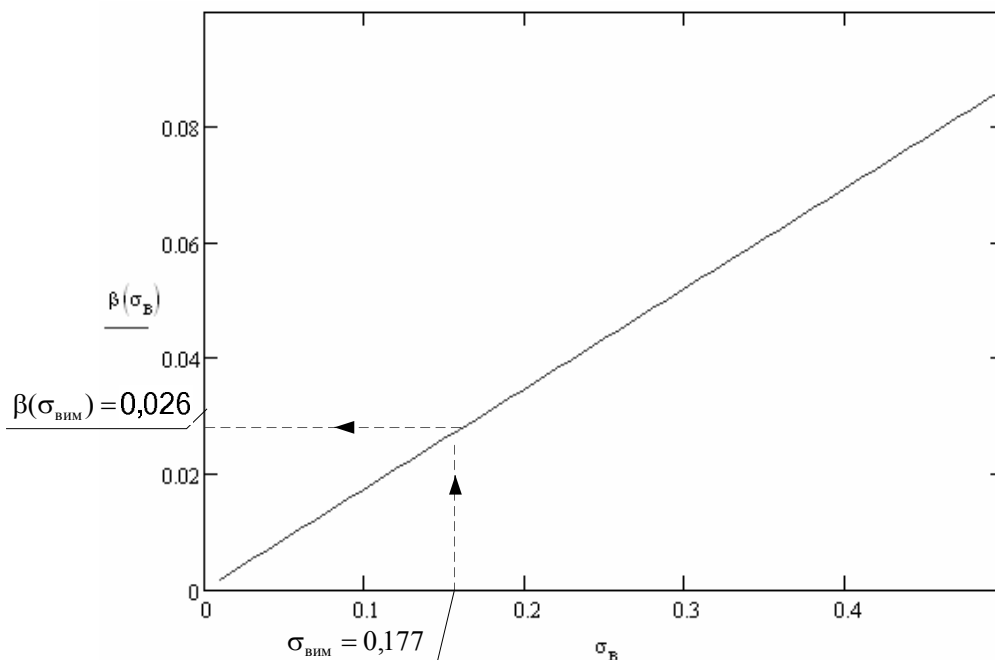


Рис. 4.11. Номограма визначення помилки другого роду

Імовірності помилок першого та другого роду для розрахункового СКВ похибки, що відповідає основній похибці згідно з паспортними даними вимірювального трансформатора та перетворювача:

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

Розрахунок імовірностей помилок детально представлений в додатку В.

ВИСНОВКИ

В монографії наведено теоретичне узагальнення та нове вирішення наукової задачі розробки системи автоматичного керування трансформаторами з поздовжньо-поперечним регулюванням напруги, що відрізняється від відомих законом регулювання, який містить напругу, активну та реактивну потужності в якості регульованих параметрів, похідні за напругою та реактивною потужністю в якості додаткових критеріїв формування регульовального впливу, та його технічною реалізацією, що дозволяє створити умови для підвищення надійності та якості електропостачання.

Проаналізовано існуючі методи і засоби поздовжнього та поздовжньо-поперечного регулювання напруги. Визначено, що вони спрямовані окремо на регулювання напруги чи перетоку потужностей через лінії електропередачі, мають обмеження в способах введення регульовального впливу на режим системи електропостачання за потужністю і тому не здатні вирішувати задачу одночасного регулювання цих параметрів.

Розроблено закон керування трансформаторним комплексом для поздовжньо-поперечного регулювання напруги з врахуванням значень активної та реактивної потужностей, з використанням якого поздовжнє регулювання напруги проводиться у функції напруги та струму на вводах споживачів, а поперечне регулювання здійснюється у функції перетоків активної та реактивної потужностей.

Вдосконалено математичну модель системи автоматичного керування трансформаторами для поздовжньо-поперечного регулювання напруги у відповідності до розробленого закону та структури регульовального пристрою з застосуванням передаточних функцій, що дозволяє провести комп'ютерне моделювання системи та оцінити її динамічні характеристики.

Отримав подальший розвиток метод синтезу систем автоматичного керування трансформаторами з регулюванням напруги під навантаженням шляхом використання математичного апарату секвенцій, що дозволяє автоматизувати процес проектування структури та алгоритму роботи відповідного мікропроцесорного засобу.

Отримав подальший розвиток метод оцінки точності синтезованого засобу за імовірністю помилок першого та другого роду з обчисленням СКВ похибок складових вимірювального каналу напруги та законів розподілу похибок цих складових.

За розробленим законом керування комплексом для поздовжньо-поперечного регулювання напруги синтезовано структурну схему регулювального пристрою системи керування з використанням промислової елементної бази.

Згідно з вдосконаленою математичною моделлю системи автоматичного керування побудовано модель автоматичного регулятора напруги у середовищі Matlab Simulink, яка дозволяє отримувати параметри налагодження регулятора.

Створено програмне забезпечення мікропроцесорного контролера у середовищі ZelioSoft для виконання функцій регулятора системи автоматичного керування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : ГОСТ 13109-97 — ГОСТ 13109-97. — [Введ. 1999—01—01]. — М. : Изд-во стандартов, 1998. — 33 с. — (Межгосударственный стандарт).
2. Карташев Илья Ильич. Управление качеством электрической энергии : монографическое издание / И. И. Карташев, В. Н. Тульс. — М. : МЭИ, 2005. — 320 с. — ISBN 5-7046-1283-0.
3. Воротницкий Валерий Эдуардович. Повышение эффективно-сти управления распределительными сетями [Электронный ресурс] / В. Э. Воротницкий. // Энергосбережение. 2005. — № 10. — Режим доступа до журн. : http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3046
4. Mogos E. F. A voltage regulation system for distributed generation / E. F. Mogos, X. Guillaud : Lab. d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille, France. — IEEE : Power Systems Conference and Exposition, 10-13 Oct. 2004. — P. 787 – 794. — ISBN 0-7803-8718-X.
5. Герасименко Алексей Алексеевич. Передача и распределение электрической энергии : учеб. пособие / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. — Ростов-на-Дону : Феникс, 2008. — 720 с. — ISBN 978-5-222-13221-0.
6. Электротехнический справочник : в 4 т. / под ред. Герасимова В. Г. .— М. : Изд-во МЭИ, 2004. — Т. 1. Общие вопросы. Электротехнические материалы . — 448 с. — ISBN 978-5-383-00082-3.
7. Положение о технической политике в распределительном электросетевом комплексе / [Приложение к Приказу ОАО «МРСК Центра и Северного Кавказа» от 14.11.2006 № 228]. — М. : ОАО «РОСЭП», 2006. — 73 с. — (Нормативні директивні правові документи).
8. Лежнюк Петро Дем'янович. Оптимальне керування потоками потужності і напругою в неоднорідних електричних мережах : монографія / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. — 188 с. — ISBN 966-641-083-4.
9. Визначення технічних значень вхідної реактивної потужності для споживачів електроенергії / Б. С. Рогальський, Л. Н. Добровольська, О. М. Нанака, В. В. Вержук // Вісник ВПІ. — 2007. — № 5. — С. 58–64.

10. Прогнозування якості функціонування пристроїв регулювання під напругою трансформаторів в умовах нечітких результатів випробовувань / Ю. О. Карпов, П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, М. І. Пиріжок // Вісник ВПІ. — 2007. — № 2. — С. 61–65.
11. Идельчик Виталий Исаакович. Электрические системы и сети / В. И. Идельчик. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 592 с. — ISBN 5-283-01012-0.
12. Лыкин Анатолий Владимирович. Электрические системы и сети : учеб. пособие для межвуз. использования по специальности 551700 / А. В. Лыкин. — Новосибирск. : Изд-во НГТУ, 2003. — 246 с. — ISBN 5-7782-0383-7.
13. Веников Валентин Андреевич. Регулирование напряжения в электроэнергетических системах / В. А. Веников, В. И. Идельчик, М. С. Лисеев. — М. : Энергоатомиздат, 1985. — 216 с.
14. Грабко Володимир Віталійович. Моделі і засоби регулювання напруги за допомогою трансформаторів з пристроями РПН : монографія / В. В. Грабко. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. — 109 с. — ISBN 966-641-115-6.
15. Testa Alfredo. Regolazione della tensione in cabine MT/BT in presenza di carichi non omotetici / Alfredo Testa, Giuseppe CUricio, Daniele Menniti // Energ. elett. — 1993. — № 10. — P. 416–422.
16. Рэнси Роберт. Трансформаторы с переключением под нагрузкой / Рэнси Р. // Мировая энергетика. — 1996. — № 4. — С. 27—33.
17. Порудоминский Виктор Владимирович. Устройства переключения трансформаторов под нагрузкой / В. В. Порудоминский.— М. : Энергия, 1974. — 288 с.
18. Пат. 44616А Україна, МПК⁷ Н 01 F 29/04, Н 01 Н 19/12. Трифазний перемикач відгалужень обмоток трансформатора під навантаженням / Вайнштейн А. Л., Ангоріна Р. А., Андросов М. Ф., Синицина Т. М.; ВАТ "Український наук.-досл. проектно-конструк. та технол. інститут трансформаторобудування". — № 2001064055; Заявл. 13.06.2001; Опубл. 15.02.2002.
19. Пат. 27824 Україна, МПК⁷ Н 01 F 29/02, Н 01 Н 9/00. Перемикач ступенів обмоток трансформатора : Пат. 27824 Україна / Дохнальд Д., Неймер Д., Альбрехт В., Клос Г., Лаутерволд Р., Лісманн-Міске Х.; Машинен фабрик рейнхаузен Гмбх.. — № 94005451; Заявл. 06.05.93; Опубл. 16.10.2000.
20. Электротехнический справочник : [в 4 т.] / под ред. Герасимова В. Г. .— М. : Изд-во МЭИ, 2004. — Т. 3. Производство,

передача и распределение электрической энергии . — 963 с. — ISBN 5-7046-0987-2.

21. Інструкція по експлуатації трансформатора поперечного регулювання (ТПР) типу ОДЦТНП-92000/150. — Вінниця : Національна енергетична компанія «Укренерго». Південно-Західна електроенергетична система, 2004 — 11 с. — (Нормативний документ НЕК «Укренерго». Інструкція)

22. Пат. 33486 С2 України, МПК⁸ Н 02 М 5/00, G 05 F 1/24. Пристрій регулювання змінної напруги / Ю. Л. Коротецький.; заявник і патентоутримувач Ю. Л. Коротецький. — № 99021133; заявл. 26.02.1999; опубл. 17.02.2003, Бюл. № 2-2003.

23. А.с. 1310948 СССР, МКИ⁵ Н 02 J 3/12. Устройство для одноступенчатого регулирования напряжения / Г. К. Вишняков, И. С. Давыдов и Л. Н. Шифрин (СССР). — № 3493189/24-07; заявл. 23.09.82; опубл. 15.05.87, Бюл. № 18.

24. А.с. 1669044 СССР, МКИ⁵ Н 02 J 3/12. Устройство для автоматического регулирования напряжения электрического узла, имеющего двигательную нагрузку / В. В. Прокопчик и В. А. Белоусов (СССР). — № 4695569/07; заявл. 15.03.89; опубл. 07.08.91, Бюл. № 29.

25. Пат. 2055440 Российская Федерация, МПК Н02J3/12. Адаптивный регулятор напряжения. / Герман Л. А., Сухов М. Ю.; заявитель и патентообладатель Герман Л. А. и Сухов М. Ю.. — № 5063912/07; Заявл. 05.10.92; Опубл. 27.02.96, Бюл. № 11/2002

26. Пат. 2006129 Российская Федерация, МПК⁵ Н 02 J 3/26. Устройство для регулирования и симметрирования напряжения в трехфазной сети с нулевым проводом / Игнайкин А. И.; заявитель и патентообладатель Вологодский политехнический институт. — № 4904205/07; заявл. 10.12.90; опубл. 15.01.94.

27. А.с. 1370699 СССР, МКИ⁴ Н 02 J 3/12. Устройство для регулирования напряжения узла нагрузки электрической сети / В. Г. Панин, Ф. Н. Рассказов, М. А. Шишков (СССР). — № 4091026/24-07; заявл. 20.05.86; опубл. 30.01.88, Бюл. № 4.

28. А.с. 1330699 СССР, МКИ⁴ Н 02 J 3/12. Устройство для автоматического регулирования напряжения узла нагрузки электрической сети / Н. Ф. Галимов, Ф. Н. Рассказов, М. А. Шишков. (СССР). — № 4018895/24-07; заявл. 11.02.86; опубл. 15.08.87, Бюл. № 30.

29. Пат. 15174 Україна, МПК⁷ G 05 F 1/30. Стабілізатор змінної напруги / Говоров П. П., Папко М. А., Гаряжа В. М.; заявник та патентоутримувач Харківська державна академія міського

господарства. — № 95041915; заявл. 25.04.95; опубл. 30.06.97, Бюл. № 3.

30. Пат. 15343 Україна, МПК⁷ G 05 F 1/30. Стабілізатор змінної напруги / Говоров П. П., Папко М. А., Гаряжа В. М.; заявник та патентоутримувач Харківська державна академія міського господарства. — № 95041913; заявл. 25.04.95; опубл. 30.06.97, Бюл. № 3.

31. Пат. 2074494 Российская Федерация, МПК⁶ H 02 M 5/257, G 05 F 1/26. Способ управления стабилизатором трехфазного синусоидального напряжения / Климаш В. С.; заявитель и патентообладатель Климаш В. С., Комсомольский-на-Амуре политехнический институт. — № 94023356/07; заявл. 17.06.94; опубл. 27.02.97, Бюл. № 32-2001.

32. Пат. 2188491 Российская Федерация, МПК⁷ H 02 J 3/12, G 05 F 1/30, H 02 M 5/45. Система автоматической компенсации отклонений напряжения трансформаторной подстанции с амплитудно-импульсным регулированием / Климаш В. С.; заявитель и патентообладатель Комсомольский-на-Амуре политехнический институт. — № 2000130843/09; заявл. 08.12.2000; опубл. 27.08.2002, Бюл. № 32-2001.

33. Пат. 2117981 Российская Федерация, МПК⁶ G 05 F 1/30, H 02 M 5/45. Устройство для стабилизации напряжения трансформаторной подстанции / Климаш В. С.; заявитель и патентообладатель Климаш В. С., Комсомольский-на-Амуре политехнический институт. — № 96107428/09; заявл. 16.04.96; опубл. 20.08.98, Бюл. № 33-2002.

34. Пат. 2158953 Российская Федерация, МПК⁷ G 05 F 1/30, H 02 J 3/18. Трансформаторно-тиристорный компенсатор отклонений напряжения и реактивной мощности / Климаш В. С. Симоненко И. Г.; заявитель и патентообладатель Комсомольский-на-Амуре политехнический институт. — № 99113149/09; заявл. 16.06.99; опубл. 10.11.2000, Бюл. № 34-2002.

35. Пат. 2025019 Российская Федерация, МПК⁵ H 02 J 3/06, H 02 J 3/12. Способ управления режимом электропередачи / Каленик В. А.; Заявитель и патентообладатель Каленик В. А. — № 5046891/07; заявл. 09.06.1992; опубл. 15.12.1994, Бюл. № 27/2000.

36. А.с. 1032522 СССР, МКИ⁵ H 02 J 3/12. Устройство для автоматического регулирования напряжения на шинах подстанции / Ю. В. Артемьев, В. М. Коршунов (СССР). — № 3377393/24-07; заявл. 07.01.82; опубл. 30.07.83, Бюл. № 28.

37. А.с. 1677773 СССР, МКИ⁵ Н 02 J 3/12. Способ регулирования напряжения в линии электропередачи / М. А. Козелькевич, А. Г. Снежко, Ю. В. Щербина (СССР). — № 4398358/07; заявл. 28.03.88; опубл. 15.09.91, Бюл. № 34.
38. А.с. 1757014 СССР, МКИ⁵ Н 02 J 3/12. Устройство для регулирования напряжения / Л. А. Герман, М. Ю. Сухов (СССР). — № 4838483/07; заявл. 12.06.90; опубл. 23.08.92, Бюл. № 31.
39. А.с. 1339743 СССР, МКИ⁴ Н 02 J 3/12. Способ регулирования напряжения в линии электропередачи / А. Б. Баламетов, Ю. И. Лысков О. С. Мамедяров (СССР). — № 3870070/24-07; заявл. 20.03.85; опубл. 23.09.87, Бюл. № 35.
40. А.с. 1312676 СССР, МКИ⁴ Н 02 J 3/12. Устройство для автоматического регулирования напряжения узла электрической сети / С. П. Гнипа и Ф. Н. Рассказов (СССР). — № 3864626/31-07; заявл. 11.03.85; опубл. 23.05.87, Бюл. № 19.
41. А.с. 1372464 СССР, МКИ⁴ Н 02 J 3/12 Н 02 М 5/257. Регулятор напряжения / В. Д. Дудышев, В. М. Нестеренко, М. М. Левинсон, О. Н. Катаев (СССР). — № 3908746/24-07; заявл. 11.06.85; опубл. 07.02.88, Бюл. № 5.
42. А.с. 1417102 СССР, МКИ⁴ Н 02 J 3/12. Способ регулирования напряжения в линии электропередачи / М. М. Зицер (СССР). — № 4177833/24-07; заявл. 09.01.87; опубл. 15.08.88, Бюл. № 30.
43. А.с. 1427479 СССР, МКИ⁴ Н 02 J 3/12. Устройство для регулирования напряжения в линии электропередачи / Е. В. Калентионок, Т. Н. Стрелова (СССР). — № 4140206/24-07; заявл. 01.09.86; опубл. 30.09.88, Бюл. № 36.
44. Пат. 2113753 Российская Федерация, МПК⁶ H02J3/12, H02J3/18, H02M5/257. Способ стабилизации и регулирования параметров электроэнергии в трехфазных электросетях и устройство для его осуществления / Туманов И. М., Алтунин Б. Ю., Блинов И. В., Корженков М. Г., Ким А. К., Шетинин О. В.; заявитель и патентообладатель Нижегородский государственный технический университет. — № 96119241/28; заявл. 25.09.96; опубл. 20.06.98, Бюл. № 30/2004.
45. Деклараційний патент 36875 А Україна, МПК⁷ G05F1/22, H02J3/12. Пристрій регулювання змінної напруги / Савченко П. І., Трунова І. М.; заявник та патентоутримувач Савченко П. І., Трунова І. М. — № 2000020925; заявл. 18.02.2000; опубл. 16.04.2001, Бюл. № 3-2001.

46. Пат. 2006127 Российская Федерация, МПК⁷ Н 02 J 3/12, Н 02 J 3/18. Устройство для регулирования напряжения и реактивной мощности / Козурман И. А.; Заявитель и патентообладатель Козурман И. А. — № 5002647/07; заявл. 16.09.91; опубл. 15.01.94, Бюл. № 28/2000.

47. А.с. 1661909 СССР, МКИ⁵ Н 02 J 3/12. Устройство для регулирования напряжения в линии электропередачи / Л. М. Анисимова, Г. А. Славин и Л. В. Шорина (СССР). — № 4440895/07; заявл. 15.04.88; опубл. 07.07.91, Бюл. № 25.

48. А.с. 1582275 СССР, МКИ⁵ Н 02 J 3/12, Н 02 J 3/18. Устройство для стабилизации напряжения в электрических системах / Я. Н. Герий, В. А. Кулинич и В. Р. Липовецкий (СССР). — № 4603740/24-07; заявл. 28.09.88; опубл. 30.07.90, Бюл. № 28.

49. А.с. 1698929 СССР, МКИ⁵ Н 02 J 3/06. Электрическая сеть / П. Ф. Гоголюк, А. А. Малиновский и Я. М. Коваль (СССР). — № 4603144/07; заявл. 09.11.88; опубл. 15.12.91, Бюл. № 46.

50. А.с. 1677774 СССР, МКИ⁵ Н 02 J 3/18. Устройство продольно-поперечного регулирования напряжения сети / К. А. Ананьев, О. В. Иванов, А. В. Гвоздев, Б. П. Коновалов, М. М. Малюшицкий, И. И. Столяров и С. В. Трухалева (СССР). — № 4729517/07; заявл. 18.08.89; опубл. 15.09.91, Бюл. № 34.

51. А.с. 1721704 СССР, МКИ⁵ Н 02 J 3/12. Устройство для автоматического регулирования режимов реактивной мощности узла нагрузки / Б. Н. Абрамович, К. А. Ананьев, Ю. В. Коновалов, В. Я. Чаронов, В. В. Гребнев, Е. М. Проскуряков, Э. А. Тамаркин. — № 4641048/07; заявл. 25.01.89; опубл. 23.03.92, Бюл. № 11.

52. Пат. 2097824 Российская Федерация, МПК⁶ G05F1/70. Регулятор реактивной мощности / Щербаков Е. Ф.; Петров В. М.; Карпов И. О.; заявитель и патентообладатель Ульяновский государственный технический университет. — № 93012694/07; заявл. 09.03.93; опубл. 27.11.97, Бюл. № 11/2002.

53. А.с. 1573502 СССР, МКИ⁵ Н 02 J 3/18. Способ регулирования статического компенсирующего устройства / Д. Л. Балыбердин, Т. А. Гущина, А. С. Зеккель, В. А. Шлайфштейн (СССР). — № 4390607/24-07; заявл. 14.01.88; опубл. 23.06.90, Бюл. № 23.

54. А.с. 1325620 СССР, МКИ⁴ Н 02 J 3/12. Устройство для управления режимом электрической подстанции / А. Д. Веселов, С. Н. Макаровский, Л. В. Росман (СССР). — № 3960035/24-07; заявл. 08.10.85; опубл. 23.07.87, Бюл. № 27.

55. А.с. 1293789 СССР, МКИ⁴ Н 02 J 3/12. Устройство для управления режимом электрической подстанции / А. Д. Веселов, С. Н. Макаровский, Л. В. Росман (СССР). — № 3960035/24-07; заявл. 17.06.85; опубл. 28.02.87, Бюл. № 8.

56. А.с. 974497 СССР, МКИ⁵ Н 02 J 3/12. Устройство для автоматического регулирования напряжения линии электропередачи / В. М. Зубко, С. М. Рожавский и М. И. Гончар (СССР). — № 2910340/24-07; заявл. 15.04.80; опубл. 15.11.82, Бюл. № 42.

57. А.с. 1415322 СССР, МКИ⁴ Н 02 J 3/12. Устройство для регулирования режимов работы трансформаторов связи / Я. Д. Баркан и В. И. Деншиков (СССР). — № 4141993; заявл. 15.09.86; опубл. 15.02.88, Бюл. № 6.

58. А.с. 1439702 СССР, МКИ⁴ Н 02 J 3/12. Способ регулирования напряжений в электрической системе / А. Й. Тамазов (СССР). — № 4153532/24-07; заявл. 01.12.86; опубл. 23.11.88, Бюл. № 43.

59. Пат. 2-41266 Япония, МКИ⁴ Н 02 J 3/12. Устройство для компенсации падения напряжения в электрической линии / К. К. Тосиба (Япония). — № 56-204767; заявл. 18.12.81; опубл. 25.06.83, Бюл. № 2-1032.

60. Пат. 1-50176 Япония, МКИ⁴ Н 02 J 3/12. Устройство для автоматического регулирования напряжения / Мицубиси Денки К. К. (Япония). — № 56-84145; заявл. 29.05.81; опубл. 07.12.82, Бюл. № 1-1255.

61. Пат. 1-50177 Япония, МКИ⁴ Н 02 J 3/12. Устройство для автоматического регулирования напряжения / Мицубиси Денки К. К.; (Япония). — № 56-84146; заявл. 29.05.81; опубл. 07.12.82, Бюл. № 7-1255.

62. Про затвердження Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії : Наказ № 19 Мінпаливенерго України від 17.01.2002, реєстр. № 93/6381 Мінюсту України від 01.02.2002 / Методика обчислення плати за перетікання реактивної енергії між електропередавальною організацією та її споживачами [Електронний ресурс]. — Режим доступу до наказу : <http://www.doe.dp.ua/load/4.htm>

63. Холмский Василий Григорьевич. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей (специальные вопросы) / В. Г. Холмский — М. : Высшая школа, 1975. — 280 с.

64. Баркан Яков Давидович. Автоматизация энергосистем / Я. Д. Баркан, Л. А. Орехов. — М. : Высшая школа, 1981. — 271 с.

65. Овчаренко Николай Ильич. Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем / Н. И. Овчаренко [под ред. А. Ф. Дьякова] — М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2000. — 504 с. ISBN 5-93196-020-1.

66. Грабко В. В. Аналіз та моделювання впливу поперечного регулювання напруги на споживання реактивної потужності в розподільчих мережах / Володимир Віталійович Грабко, Сергій Михайлович Левицький // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. — 2007. — №3/(44). — Ч.2. — С. 122—125.

67. Информационный лист. Установка на коммутационных аппаратах автоматического секционирования в сети 6–20 кВ универсальных устройств релейной защиты и автоматики / ред. В. Н. Шварцберг — Рига : ЛатНИИТИ. — 1983. — № 83-291. — Серия 44.29.37. — 3 с.

68. Мокин Борис Иванович. Автоматические регуляторы в электрических сетях / Б. И. Мокин, Ю. Ф. Выговский. — К. : Техника, 1985. — 104 с.

69. Грабко В. В. До питання підвищення якості напруги в електричних мережах / Володимир Віталійович Грабко, Ілля Юрійович Львов // Сучасні інформаційні та енергозберігаючі технології життєзабезпечення людини. — 1999. — № 6. — С. 94—96.

70. Грабко Володимир Віталійович. Синтез закону регулювання напруги в електричній мережі в умовах оптимального споживання реактивної потужності / В. В. Грабко, С. М. Левицький, М. П. Свиридов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2007. — № 2. — С. 34 — 37.

71. Захаров Валерий Николаевич. Автоматы с распределенной памятью / В. Н. Захаров. — М. : Энергия, 1975. — 136 с.

72. Захаров Валерий Николаевич. Системы управления. Задание. Проектирование. Реализация / В. Н. Захаров, А. Д. Поспелов, В. Е. Хазацкий. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Энергия, 1977. — 424 с.

73. Поспелов Дмитрий Александрович. Логические методы анализа и синтез схем / Д. А. Поспелов. — М. : Энергия. — 1974. — 368 с.

74. Шило Валерий Леонидович. Популярные цифровые микросхемы : справочник / В. Л. Шило. — М. : Радио и связь, 1987. — 352 с. — ISBN 5-229-00602-1.

75. Интегральные микросхемы : справочник / Тарабрин Б. В., Лунин Л. Ф., Смирнов Ю. Н. [и др.]; под ред. Б. В. Тарабрина. — 2-е изд. — М. : Радио и связь, 1985. — 528 с. — ISBN 978-5-94120-106-8.

76. Левицький С. М. Синтез структури регулятора напруги в системах з обмеженим споживанням реактивної потужності / С. М. Левицький // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. — 2008. — № 4 (51), Част. 2. — С. 53—56.

77. Хоровиц Пауль. Искусство схемотехники : [в 2-х томах.] / Пауль Хоровиц, Уинфилд Хилл ; пер. с англ. О. Л. Соболевой. — М. : Мир, 1998. — Т. 1. — 598 с.

78. Грабко Володимир Віталійович. Система регулювання напруги електричної мережі за умови обмеженого споживання реактивної енергії / В. В. Грабко, С. М. Левицький // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія й практика». — 2007. — С. 536—538.

79. Пат. 32171 Україна. Регулятор напруги в умовах обмеженого споживання реактивної енергії : Пат. 32171 Україна, МПК (2006) Н 02 J 3/12 / В. В. Грабко, С. М. Левицький ; заявник та патентоутримувач Вінницький національний технічний університет. — № U 2007 13798 ; Заявл.10.12.2007 ; Опубл. 12.05.2008, Бюл. № 9.

80. Востриков Анатолий Сергеевич. Теория систем автоматического регулирования : учеб. пособие для вузов / А. С. Востриков, Г. А. Французова. — М. : Высшая школа, 2006. — 365 с. — ISBN 5-06-004686-9.

81. Бугров Яков Степанович. Высшая математика : учеб. для вузов : [в 3 т.] / Я. С. Бугров, С. М. Никольский ; под ред. В. А. Садовниченко. — Изд. 7-е, стер. — М. : Дрофа, 2005. — Т. 2. — 512 с. — ISBN 5-7107-9845-2.

82. Демирчян Камо Серопович. Теоретические основы электротехники : учеб. пособие для электротехн., энерг. и приборостроит. спец. вузов : [в 3 т.] / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. — СПб. : Питер, 2004. — Т. 2. — 576 с. — ISBN 5-94723-513-7.

83. Юхимчук Сергей Васильевич. Автоматизация проектирования систем автоматического управления : учеб. пособие для студ. вузов / С. В. Юхимчук, В. Н. Лысогор, В. Ю. Марущак. — К. : УМВО, 1989. — 172 с.

84. Михайлов Виталий Степанович. Теория управления : учеб. пособие для студ. вузов / В. С. Михайлов. — К. : Выща школа, Головное изд-во, 1988. — 312 с. — ISBN 5-11-001791-3.
85. Левицкий С. М. Комп'ютерне моделювання системи регулювання напруги в умовах дефіциту реактивної потужності / С. М. Левицкий // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2007. — № 6. — С. 80—83
86. Черных Илья Викторович. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. — СПб. : Питер, 2008. — 288 с. — ISBN 5-94074-395-1.
87. Поршнеv Сергей Владимирович. MATLAB 7. Основы работы и программирования / С. В. Поршнеv. — М. : Биноm-Пресс, 2006. — 320 с. — ISBN 5-9518-0137-0.
88. Дьяконов Владимир Павлович. Matlab R2006/2007/2008. Simulink 5/6/7. Основы применения / В. П. Дьяконов. — М. : Солон-Пресс, 2008. — 800 с. — ISBN 978-5-91359-042-8.
89. Лагутин Валерий Михайлович. Контроль положения переключающих устройств трансформаторов в системе автоматического регулирования напряжения / В. М. Лагутин, П. Д. Лежнюк, И. М. Котенко // Устройства преобразования информации для контроля и управления в энергетике : Тезисы докладов 3 Республиканской научно-технической конференции. — Харьков, 1988. — С. 218—219.
90. Теџес Zlatka. Some Issues of Microprocessor-based Power System Stabilizer Implementation / Z. Теџес, V. Їesić, I. Petrović; KONČAR Electrical Engineering Institute, Zagreb, Croatia // 15th Mediterranean Conference on Control & Automation. — Athens, Greece : July 27–29; 2007. — T11-004. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу до каталогу : <http://med.ee.nd.edu/MED15-2007/papers/T11-004-371.pdf>.
91. Интеллектуальное реле Zelio Logic. Аналоговые преобразователи Zelio Analog. — Каталог продукции Schneider Electric / Telemecanique [Електронний ресурс] . — ZELIOLOGIC2CATRU . — 05/2007. — 72 с. — Режим доступу до каталогу : http://www.schneider-electric.ru/catalog.aspx?ob_no=3223&d_no=3254
92. Интеллектуальное реле Zelio Logic 2. Руководство пользователя. — Schneider Electric. — Telemecanique. — SR1MAN01RU 3500714300 — 01/2004. — 151 с.
93. Левицкий С. М. Мікропроцесорний двоканальний регулятор напруги на базі контролера Zelio Logic / С. М. Левицкий //

Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. — 2008. — № 1 (11). — С. 150—153.

94. Трансформатори напруги. Загальні технічні умови : ДСТУ ГОСТ 1983-2003. — [на заміну ГОСТ 1983-89] . — [Чинний від 01.07.2003]. — К. : Держстандарт України, 2002. — 39 с.

95. Трансформатори струму. Загальні технічні умови : ДСТУ ГОСТ 7746-2003 — ДСТУ ГОСТ 7746-2003. — [Чинний від 2003—01—07]. — К. : Держстандарт України, 2002. — 39 с. — (Національні стандарти України).

96. Влияние погрешностей трансформаторов тока и напряжения на коммерческие потери в энергосистемах. [Електронний ресурс] / А. Б. Лоскутов, Е. Б. Солнцев, И. В. Озеров. — Нижегородский региональный центр энергосбережения при НГТУ. — 1999. — № 1. — Режим доступа до журн. : http://www.nice.nnov.ru/Ru/literat/J1_99/LoskUto1.htm.

97. Пат. 2276457 Российская Федерация, МПК⁷ H 03 M1/62 . Аналого-цифровой преобразователь / Баженов В. И., Горбатенков Н. И., Федулов Н. П., Хомякова Л. В. ; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество "Раменское приборостроительное конструкторское бюро". — № 2004120732/09; заявл. 08.07.2004; опубл. 10.05.2006. Бюл. № 13/2006.

98. Пат. 2163381 Российская Федерация, МПК⁷ G 01 R19/02 . Способ измерения эффективного значения переменного напряжения (варианты) / Казаков М. К., Тарасов А. А., Хисамова Л. И.; заявитель и патентообладатель Ульяновский государственный технический университет. — № 99114873/09; заявл. 09.07.1999; опубл. 20.02.2001. Бюл. № 02/2003.

99. Pat. US7489122 United States (USA), G 01 R31/02 . Method and device for measuring voltage / Andreas Jurisch (Schwante, DE); possessor Siemens Aktiengesellschaft (Munich, DE). — № 10/573-541; declared 16.09.2004; published 07.04.2005. Bulletin № 02/2003.

100. Преобразователь переменного напряжения ПНС-2. Руководство по эксплуатации. — ПРМК.426442.010 РЭ, — Украина, г. Ивано-Франковск, 2007. — 22 с.

101. Преобразователь переменного тока ПНС-3. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. — ПРМК.421457.018 РЭ, — Украина, г. Ивано-Франковск, 2002. — 12 с.

102. Преобразователи переменного напряжения и тока ТІТ. [Електронний ресурс]. — Режим доступа до каталогу : http://www.vertesz.ru/TIT_doc.files/TIT_Rus.pDI.

103. Преобразователи переменного напряжения и тока ЕПЗ4. [Электронный ресурс]. — Режим доступа до каталогу : http://www.ksrv.ru/catalog/cheb_ep34.pDI.
104. Преобразователи измерительные активной мощности ЭП8509, реактивной мощности ЭП8520, активной и реактивной мощности ЭП8530. [Электронный ресурс]. — Режим доступа до каталогу : http://energosila.ru/catalog/section.php?SECTION_ID=166.
105. Приборы и преобразователи измерительные цифровые напряжения, тока, сопротивления. Общие технические требования и методы испытаний : ГОСТ 14014-91 — ГОСТ 14014-91. — [Введ. 1993-01-01]. — М. : Изд-во стандартов, 1992. — 14 с. — (Межгосударственный стандарт).
106. Овчаренко Николай Ильич. Аналоговые и цифровые элементы автоматических устройств энергосистем / Н. И. Овчаренко. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 319 с. — ISBN 5-283-01028-7.
107. Грушвицкий Ростислав Игоревич. Аналого-цифровые периферийные устройства микропроцессорных систем / Р. И. Грушвицкий, А. Х. Мурсаев, В. Б. Смолов. — Л. : Энергоатомиздат, 1989. — 160 с. — ISBN 5-283-04450-5.
108. Дунаев Борис Борисович. Точность измерений при контроле качества / Б. Б. Дунаев. — К. : Техніка, 1981. — 152 с.
109. Основи метрології та вимірювальної техніки : [в 2 т.] / М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник [та ін.]; за ред. Б. Стадника. — Львів. : Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2005. — Т.1 : Основи метрології. — 532 с. — ISBN 966-553-311-8.
110. Новицкий Петр Васильевич. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. — 2-е изд, перераб. и доп. — Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1991. — 304 с. — ISBN 5-283-04513-7.
111. Алиев Исмаил Ибрагимович. Электрические аппараты. Справочник / И. И. Алиев, М. Б. Абрамов. — М. : РадиоСофт, 2004. — 255 с. — ISBN 5-93037-115-6.
112. Моисеев Владимир Сергеевич. Системное проектирование преобразователей информации / В. С. Моисеев. — Л. : Машиностроение, 1982. — 255 с.
113. Дьяконов Владимир Павлович. Справочник по MathCAD PLUS 7.0 PRO / В. П. Дьяконов. — М. : СК Пресс, 1988. — 352 с. — ISBN 5-89233-018-4.

Додаток А

Дослідження моделі комплексу поздовжньо-поперечного регулювання напруги

Таблиця А.1

при реактивному коефіцієнті трансформації ТТР $k_j = 0$

Узел	U, кВ Ветвь	фаза Цель	Наимен	Pн, МВт		Qн, МВАр		Rг, МВт Iг, кА	Qг, МВАр		Uj , кВ dP, МВт	Qmin, МВАр		Qmax, МВАр	
				Pнач, МВт	Рнач, МВт	Qнач, МВАр	Qзар, МВАр		dQ, МВАр	Угол, Град					
1	115	0				0	74,72	0	70,19	0	115	0	0	0	
2	2	0		74,72	74,72	0	0,515	0	0	0	2 384	5 960	0	1,61	
2	108,52	-1,61		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	6	0		15,78	15,78	10,8	0,102	0	0	0	0,019	0,171	0,39	0,39	
	3	0		56,57	56,57	53,42	0,414	0	0	0	3 085	8 740	3,49	3,49	
	1	0		-72,33	-72,33	-64,23	0,515	0	0	0	2 384	5 960	1,61	1,61	
3	97,2	-5,09		40	40	30	0	0	0	0	0	0	0	0	
	5	0		13,53	13,53	14,93	0,12	0	0	0	0,069	1 525	2,94	2,94	
	2	0		-53,49	-53,49	-44,68	0,414	0	0	0	3 085	8 740	3,49	3,49	
4	10,64	-4,76		14	14	10	0	0	0	0	0	0	0	0	
	6	0		-15,7	-15,7	-9,53	0,997	0	0	0	0,05	1 102	2,76	2,76	
	5	0		1,71	1,71	-0,45	0,096	0	0	0	0,232	0,031	3,27	3,27	
5	9,35	-8,03		15	15	13	0	0	0	0	0	0	0	0	
	3	0		-13,46	-13,46	-13,41	1 173	0	0	0	0,069	1 525	2,94	2,94	
	4	0		-1,48	-1,48	0,48	0,096	0	0	0	0,232	0,031	3,27	3,27	
6	107,88	-2		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	4	0		15,75	15,75	10,63	0,102	0	0	0	0,05	1 102	2,76	2,76	
	2	0		-15,76	-15,76	-10,63	0,102	0	0	0	0,019	0,171	0,39	0,39	
Сумма :															
Pн=69,00, Qн=53,00, Pг=74,72, Qг+бск=70,19, Pш=0,00, Qш=-0,00, dP=5,84, dQл+тр=17,53, dQсум=17,53, dQзар=0,00															

при реактивному коефіцієнті трансформації ТПР $k_j = 0,1$

Узел	U, кВ	Фаза	Наймен	Pн, МВт		Qн, МВАр		Pг, МВт	Qг, МВАр	U , кВ	Qmin, МВАр		Qmax, МВАр
				Рнач, МВт	Qнач, МВАр	дP, МВАр	дQ, МВАр						
	Ветвь	Цепь											
1	115	0		0	0	74,83	69,8	115	0	0	0	0	0
2	108,54	-1,62		74,83	69,8	0,514	0	2 375	5 939	1,62	0	0	1,62
	6	0		16,13	9,33	0,099	0	0,018	0,162	-5,3	0	0	-5,3
	3	0		56,36	54,67	0,418	0	3 140	8 897	3,43	0	0	3,43
	1	0		-72,45	-63,86	0,514	0	2 375	5 939	1,62	0	0	1,62
3	97,03	-5,04		40	30	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0		13,29	16,14	0,124	0	0,074	1 648	2,89	0	0	2,89
	2	0		-53,22	-45,78	0,418	0	3 140	8 897	3,43	0	0	3,43
4	10,74	0,87		14	10	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0		-16,22	-8,45	0,983	0	0,048	1 071	2,82	0	0	2,82
	5	0		2,2	-1,52	0,144	0	0,523	0,07	8,81	0	0	8,81
5	9,28	-7,94		15	13	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0		-13,22	-14,49	1 220	0	0,074	1 648	2,89	0	0	2,89
	4	0		-1,68	1,59	0,144	0	0,523	0,07	8,81	0	0	8,81
6	108,52	3,69		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0		16,26	9,52	0,1	0	0,048	1 071	2,82	0	0	2,82
	2	0		-16,11	-9,16	0,099	0	0,018	0,162	-5,3	0	0	-5,3

Сумма :

$P_H=69.00, Q_H=53.00, P_G=74.83, Q_G+бск=69.80, P_ш=0.00, Q_ш=-0.00, dP=6.18, dQ_{л+гp}=17.79, dQ_{сум}=17.79, dQ_{зар}=0.00$
--

при реактивному коефіцієнті трансформації ТПР $k_j = -0,1$

Узел	U,кВ	Фаза	Наимен	Рн, МВт	Qн, МВАр	Рг, МВт	Qг, МВАр	U , кВ	Qmin, МВАр	Qmax, МВАр
	Ветвь	Цепь		Рнач, МВт	Qнач, МВАр	I, кА	Qзар, МВАр	dP, МВт	dQ, МВАр	Угол, Град.
1	115	0		0	0	74,77	70,38	115	0	0
2	108,5	-1,61		74,77	70,38	0,516	0	2 392	5 980	1,61
	6	0		0	0	0	0	0	0	0
	3	0		15,56	12	0,105	0	0,02	0,18	6,09
	1	0		56,82	52,4	0,411	0	3 045	8 626	3,54
3	97,34	-5,14		-72,38	-64,4	0,516	0	2 392	5 980	1,61
	5	0		40	30	0	0	0	0	0
	2	0		13,77	13,77	0,116	0	0,064	1 422	2,98
4	10,64	-10,4		-53,77	-43,77	0,411	0	3 045	8 626	3,54
	6	0		14	10	0	0	0	0	0
	5	0		-15,49	-10,67	1 020	0	0,052	1 153	2,7
	9,41	-8,12		1,49	0,67	0,089	0	0,198	0,026	-2,28
	3	0		15	13	0	0	0	0	0
	4	0		-13,71	-12,35	1 133	0	0,064	1 422	2,98
6	108,35	-7,7		-1,29	-0,65	0,089	0	0,198	0,026	-2,28
	4	0		0	0	0	0	0	0	0
	2	0		15,54	11,83	0,104	0	0,052	1 153	2,7
	2	0		-15,54	-11,82	0,104	0	0,02	0,18	6,09

Сумма :

Рн=69.00, Qн=53.00, Рг=74.77, Qг+бск=70.38, Рш=0.00, Qш=-0.00, dP=5.77, dQл+гр=17.39, dQсум=17.39, dQзар=0.00

Додаток Б

Моделювання впливу поперечної вольтодобавки на приріст активної та реактивної потужностей

$$\phi := \frac{-\pi}{2}, \frac{-\pi}{2} + 0.001 \cdot \frac{\pi}{2} \quad U_m := 110 \cdot 10^3 \quad z := 30$$

$$x(\phi) := z \cdot \sin(\phi) \quad r(\phi) := z \cdot \cos(\phi)$$

$$I := \frac{U_m}{\sqrt{3} \cdot z} \quad I = 2.117 \times 10^3$$

$$P_1(\phi) := \sqrt{3} \cdot U_m \cdot I \cdot \cos(\phi) \quad Q_1(\phi) := \sqrt{3} \cdot U_m \cdot I \cdot \sin(\phi)$$

$$\Delta U := 35 \cdot 10^3$$

$$U_{tr} := \sqrt{U_m^2 + \Delta U^2} \quad U_{tr} = 1.154 \times 10^5$$

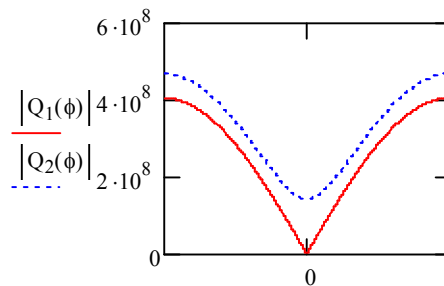
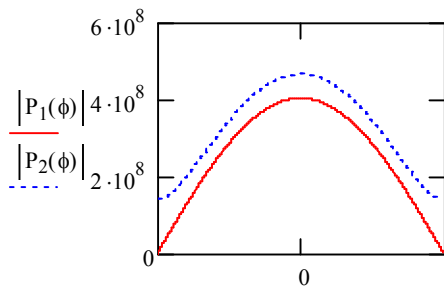
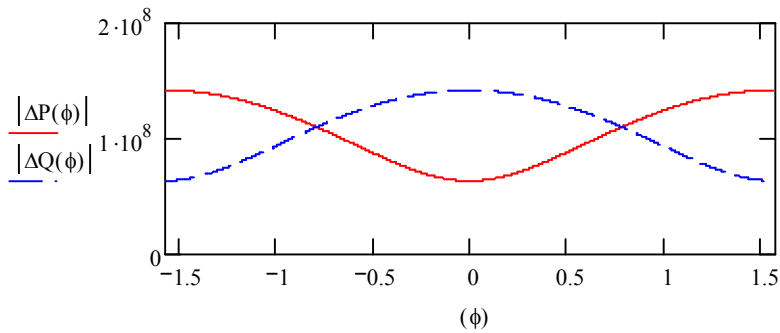
$$\theta := \arccos\left(\frac{U_{tr}}{U_m}\right) \quad \theta = 0.313i$$

$$\psi(\phi) := \phi - \theta$$

$$I_{tr} := \frac{U_{tr}}{\sqrt{3} \cdot z} \quad I_{tr} = 2.222 \times 10^3$$

$$P_2(\phi) := \sqrt{3} \cdot U_{tr} \cdot I_{tr} \cdot \cos(\psi(\phi)) \quad Q_2(\phi) := \sqrt{3} \cdot U_{tr} \cdot I_{tr} \cdot \sin(\psi(\phi))$$

$$\Delta P(\phi) := P_2(\phi) - P_1(\phi) \quad \Delta Q(\phi) := Q_2(\phi) - Q_1(\phi)$$



Додаток В

Оцінка помилок першого і другого роду регулятора напруги

Математичне сподівання контрольованого параметра

$$\mu_u := 10$$

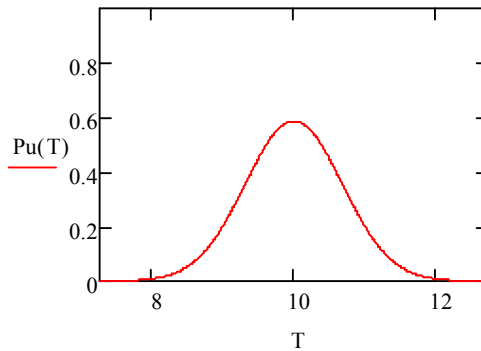
СКВ контрольованого параметра

$$\sigma_u := 0.068 \cdot \mu_u \quad \sigma_u = 0.68$$

Закон розподілу контрольованого параметра

$$T := \mu_u - 4 \cdot \sigma_u, \mu_u - 4 \cdot \sigma_u + 0.01.. \mu_u + 4 \cdot \sigma_u$$

$$P_u(T) := \frac{1}{\sigma_u \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(T - \mu_u)^2}{2 \cdot \sigma_u^2}\right]$$



Математичне сподівання похибки вимірювання контрольованого параметру

$$\mu_r := -0.48$$

Основні похибки трансформатора напруги та перетворювача

$$\gamma_{тн} := 0.25 \quad \gamma_{пч} := 0.25$$

СКВ похибок трансформатора та перетворювача

(приймаємо трикутний закон розподілу (Сімпсона) для вимірювального трансформатора напруги та рівномірний закон розподілу похибки у вимірювальному перетворювача:

$$\sigma_{тн} := \frac{\gamma_{тн}}{\sqrt{6}} \quad \sigma_{пч} := \frac{\gamma_{пч}}{\sqrt{3}}$$

$$\sigma_{вим} := \sqrt{\sigma_{тн}^2 + \sigma_{пч}^2} \quad \sigma_{вим} = 0.177 \quad \%$$

Поле допуску

$$\Delta := 1$$

Коефіцієнт асиметрії поля допуску

$$K := 1$$

Межі інтегрування

$$x1 := \Delta - Mr$$

$$x1 = 1$$

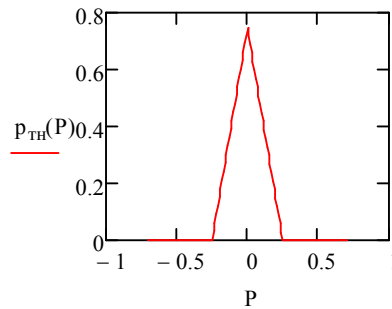
$$x2 := -K \cdot \Delta - Mr$$

$$x2 = -1$$

Закон розподілу похибки вимірювального трансформатора напруги:

$$P := -0.7, -0.69..0.7$$

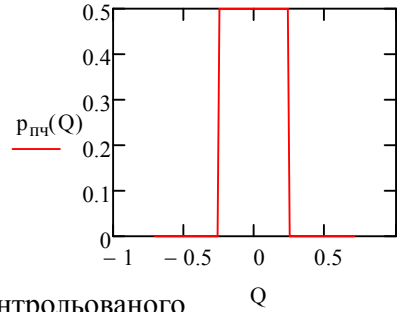
$$p_{TH}(P) := \begin{cases} 0 & \text{if } P < -\gamma_{TH} \\ 3P + \frac{3}{4} & \text{if } P \geq -\gamma_{TH} \\ -3P + \frac{3}{4} & \text{if } P \geq 0 \\ 0 & \text{if } P > \gamma_{TH} \end{cases}$$



Закон розподілу похибки вимірювального перетворювача:

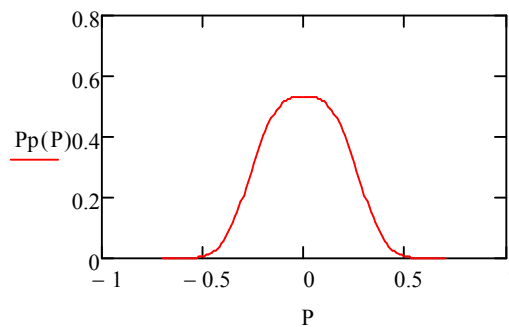
$$p_{пч}(Q) := \begin{cases} 0 & \text{if } Q < -\gamma_{пч} \\ 0.5 & \text{if } -\gamma_{пч} \leq Q \leq \gamma_{пч} \\ 0 & \text{if } Q > \gamma_{пч} \end{cases}$$

$$Q := -0.7, -0.69..0.7$$



Закон розподілу похибки вимірювання контрольованого параметра

$$Pp(P) := \int_{-1}^1 p_{пч}(Q) \cdot p_{TH}(P - Q) dQ$$



Сумісний закон розподілу: $W(T, P) := Pp(P) Pu(T)$

Межі зображення графіка: $xr := \sigma_u + 0.25$ $yr := \sigma_{\text{вим}} + 0.15$ $yr1 := -yr$ $yr2 := yr$

Кількість точок по x та у у графіку: $xr1 := 38$ $xr2 := 32$ $mesh := 90$

Програма визначення точок:

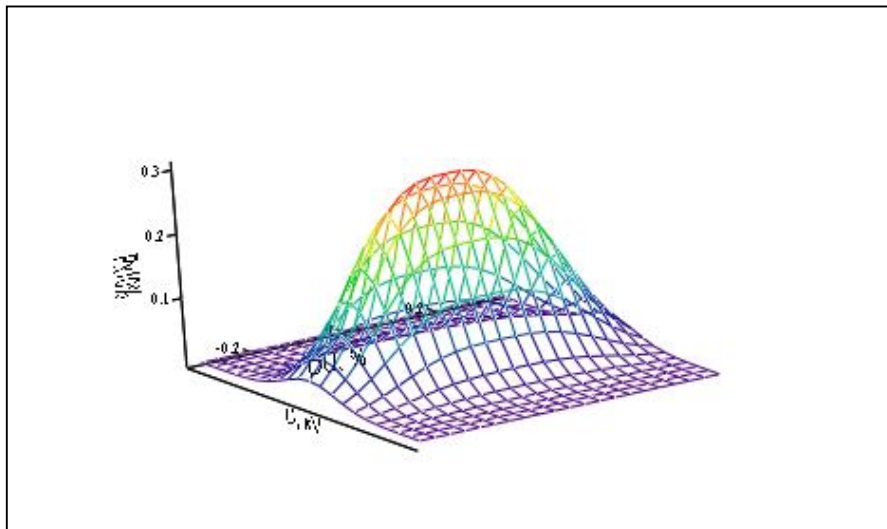
```
S(mesh, xr, yr) :=
count ← 0
for i ∈ 0.. mesh
  for j ∈ 0.. mesh
    x ← xr2 +  $\frac{|xr2 - xr1| \cdot i}{mesh}$ 
    y ← -|yr| +  $\frac{|yr2 - yr1| \cdot j}{mesh}$ 
    c<count> ←  $\begin{pmatrix} x \\ y \\ W(x, y) \end{pmatrix}$ 
    count ← count + 1
cT
```

$XYZ := S(\text{mesh}, xr, yr)$

$X := XYZ^{(0)}$

$Y := XYZ^{(1)}$

$Z := XYZ^{(2)}$



(X, Y, Z)

Помилка першого роду

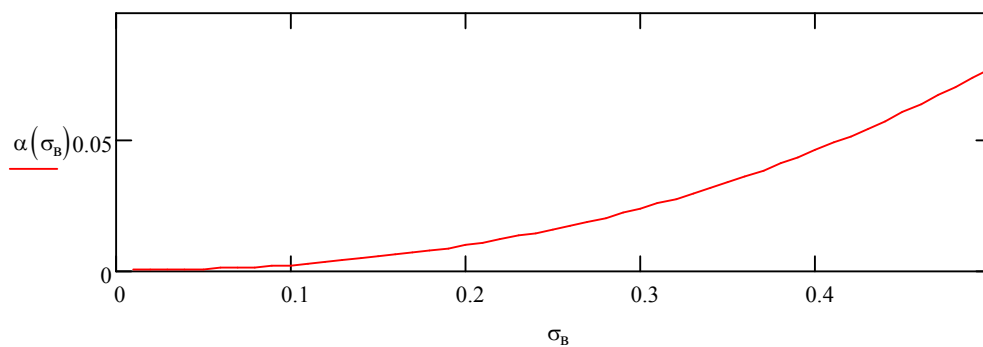
Початкове значення математичного очікування напруги в межах інтегрування:

$T := -0.5, -0.49.. 0.5$

$$\alpha(\sigma_B) := \int_{-K \cdot \Delta}^{\Delta} \int_{-\infty}^{x2-T} \frac{1}{\sigma_u \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{T^2}{2 \cdot \sigma_u^2}\right) \cdot \left(\int_{-1}^1 p_{\text{ПЧ}}(Q) \cdot p_{\text{ТН}}(P-Q) dQ\right) dP dT \dots$$

$$+ \int_{-K \cdot \Delta}^{\Delta} \int_{x1-T}^{\infty} \frac{1}{\sigma_u \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{T^2}{2 \cdot \sigma_u^2}\right) \cdot \left(\int_{-1}^1 p_{\text{ПЧ}}(Q) \cdot p_{\text{ТН}}(P-Q) dQ\right) dP dT$$

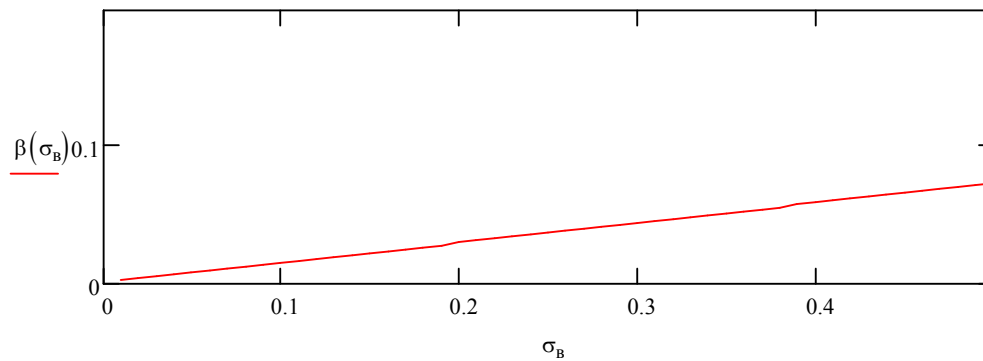
$$\sigma_B := 0, 0.01..0.5$$



Помилка другого роду

$$\text{Int4}(T, \sigma_B) := \int_{x2}^{x1} \frac{1}{\sigma_u \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{T^2}{2 \cdot \sigma_u^2}} \cdot \left(\int_{-1}^1 p_{\text{ПЧ}}(Q) \cdot p_{\text{ТН}}(P-Q) dQ\right) dP$$

$$\text{Int5}(\sigma_B) := \int_{-\infty}^{-K \cdot \Delta} \text{Int4}(T, \sigma_B) dT \quad \text{Int6}(\sigma_B) := \int_{\Delta}^{\infty} \text{Int4}(T, \sigma_B) dT \quad \beta(\sigma_B) := \text{Int5}(\sigma_B) + \text{Int6}(\sigma_B)$$



Імовірності помилок першого та другого роду для розрахункового СКВ похибки, що відповідає основній похибці згідно з паспортними даними вимірювального трансформатора та перетворювача:

$$\alpha(\sigma_{\text{вим}}) = 7.432 \cdot 10^{-3} \quad \beta(\sigma_{\text{вим}}) = 0.026$$

Наукове видання

**Грабко Володимир Віталійович
Левицький Сергій Михайлович**

**СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ
ТРАНСФОРМАТОРАМИ З ПОЗДОВЖНЬО-
ПОПЕРЕЧНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ НАПРУГИ ПІД
НАВАНТАЖЕННЯМ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено С. Левицьким

Підписано до друку 00.00.09 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк.
Наклад 100 прим. Зам №

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-81-59
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

