

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

ЛІТКОВЕЦЬ СЕРГІЙ ПЕТРОВИЧ

УДК 621.315.1.024:621.311.6

**ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СТАТИЧНИХ ТИРИСТОРНИХ  
КОМПЕНСАТОРІВ З ПРИМУСОВОЮ КОМУТАЦІЄЮ ТА ПОФАЗНИМ  
КЕРУВАННЯМ РЕАКТИВНОЮ ПОТУЖНІСТЮ**

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Вінниця – 2016

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Луцькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – кандидат технічних наук, доцент  
**Петухов Микола Васильович**,  
Луцький національний технічний університет,  
доцент кафедри електропостачання.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Саєнко Юрій Леонідович**,  
Приазовський державний технічний університет,  
м. Маріуполь,  
декан енергетичного факультету

кандидат технічних наук, доцент  
**Демов Олександр Дмитрович**,  
Вінницький національний технічний університет,  
доцент кафедри електротехнічних систем  
електроспоживання та енергетичного  
менеджменту.

Захист відбудеться «11» листопада 2016 р. о 10:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК 210.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий «10» жовтня 2016 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

В.В. Кулик

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У промисловому виробництві за останні роки спостерігається щораз більший ріст споживання реактивної потужності порівняно з активною та збільшується частка різко змінних навантажень, тому проблема компенсації реактивної потужності має особливу значущість. Статичні тиристорні компенсатори (СТК) як джерела реактивної потужності – це ефективний інструмент для вирішення проблем передачі та розподілу електричної енергії, пов'язаних з великими та швидкими коливаннями реактивної потужності. Для більшості джерел реактивної потужності характерною рисою є залежність питомих втрат активної потужності від режиму роботи.

Для різко змінних навантажень характерними є несиметрія споживаної потужності по фазах живлячої напруги й кидки реактивної потужності. Коливання напруги, які при цьому виникають, негативно впливають на споживачів та збільшують втрати електричної енергії. Забезпечити допустимий рівень коливань напруги та зменшити втрати електричної енергії можна шляхом швидкодіючої пофазної компенсації реактивної потужності за допомогою СТК з примусовою комутацією.

Для підвищення економічної ефективності використання СТК як джерел реактивної потужності необхідно зменшити втрати активної потужності та напруги в мережі, вирівняти рівні напруг та симетрувати їх, здійснити перерозподіл реактивного навантаження, забезпечити плавність регулювання потужності та можливість роботи з номінальною потужністю як у режимі споживання, так і у режимі генерування, забезпечити незалежність потужності від відхилень напруги від її номінального значення. Крім того, необхідно збільшити швидкодію статичного компенсатора та зменшити втрати питомої активної потужності в ньому та в електричній мережі. Це можливо реалізувати за допомогою оптимізації режимів роботи СТК з примусовою комутацією та пофазним керуванням реактивною потужністю (з незалежним регулюванням її значення та знаку в кожній фазі) і, тим самим, виконати вимоги енергопостачальних компаній, споживачів і Закону України «Про енергозбереження».

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основний зміст роботи становлять результати досліджень, які проводились відповідно до наукового напрямку кафедри «Електропостачання» Луцького національного технічного університету. Дисертаційна робота виконувалась відповідно до «Програми наукових досліджень і розробок Міністерства освіти і науки України за пріоритетними напрямками розвитку науки та техніки» у рамках фінансування держбюджетної науково-дослідної роботи «Застосування статичних тиристорних компенсаторів реактивної потужності з параметричною модуляцією індуктивності для зменшення втрат електроенергії», № державної реєстрації 0113U000336. Автор брав участь у виконанні вказаних вище робіт як виконавець.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності використання статичних тиристорних компенсаторів з примусовою комутацією в електричних мережах шляхом оптимізації режимів їх роботи та вдосконалення методів і засобів пофазного керування реактивною потужністю.

Для досягнення поставленої мети у роботі поставлені та вирішені такі основні завдання:

- дослідження енергетичних процесів у СТК реактивної потужності з примусовою комутацією та різними режимами заземлення нейтралі у разі їх живлення прямокутними напругами з метою зменшення втрат активної потужності під час регулювання реактивної потужності та збільшення швидкодії цих компенсаторів;

- удосконалення способів керування статичними тиристорними компенсаторами реактивної потужності з примусовою комутацією та різними режимами заземлення нейтралі без та за наявності вольтододавання для реалізації ефективних режимів роботи компенсаторів;

- розроблення методу багатокординатного керування статичними тиристорними компенсаторами реактивної потужності з примусовою комутацією, у рамках якого незалежне керування кутами відкриття та закриття комутуючих тиристорів здійснюється залежно від цільової функції системи, яка визначається, виходячи зі зменшення питомих втрат активної потужності під час регулювання реактивної потужності;

- розроблення систем для пофазного керування реактивною потужністю у статичних тиристорних компенсаторах з примусовою комутацією, які забезпечують оптимальні режими їх роботи.

**Об'єкт дослідження.** Режими роботи статичних тиристорних компенсаторів з примусовою комутацією та пофазним керуванням реактивною потужністю.

**Предмет дослідження.** Математичні моделі та засоби керування режимами роботи статичних тиристорних компенсаторів з примусовою комутацією та пофазним керуванням реактивною потужністю.

**Методи дослідження.** Усталені режими роботи СТК з примусовою комутацією та пофазним керуванням реактивною потужністю моделювалися і аналізувалися за допомогою законів Кірхгофа та класичного методу розв'язання диференційних рівнянь. Для визначення струмів у різних конфігураціях силових кіл СТК з примусовою комутацією, як систем зі змінними структурою та параметрами, застосовувався метод припасовування координат. Інтегральні показники енергетичного процесу СТК з примусовою комутацією визначались за допомогою інтегрального (операторного) методу. Наближення кривої переходу поверхні керування через нуль поліномом  $p$ 'ятого порядку здійснювалось методом найменших квадратів.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у тому, що:

- вперше запропоновано метод багатокординатного керування статичними тиристорними компенсаторами реактивної потужності з примусовою комутацією, що дозволяє шляхом незалежного керування кутами

відкриття та закриття комутуючих тиристорів відповідно до цільової функції системи, яка характеризує питомі втрати активної потужності, забезпечити пофазне та багатоканальне керування реактивною потужністю, необхідний діапазон її регулювання і зменшити втрати активної потужності в електричних мережах та компенсаторах;

– розроблено нові математичні моделі СТК з примусовою комутацією та пофазним керуванням реактивною потужністю без і за наявності вольтододавання, що, на відміну від відомих, базуються на використанні узагальнених математичних моделей електромагнітних процесів у силових колах компенсаторів як систем зі змінними структурою і параметрами та створюють передумови для більш адекватного аналізу енергетичних процесів у них і оптимізації режимів їх роботи;

– набув подальшого розвитку метод оптимізації параметра СТК реактивної потужності з примусовою комутацією та компенсованою нейтраллю, що проявляється у збільшенні коефіцієнта вольтододавання під час дії негативної півхвилі напруги живлення на затискачах розщепленої вторинної обмотки трансформатора та зумовлює збільшення швидкодії статичного компенсатора і зменшення втрат активної потужності в ньому та в електричній мережі;

– вдосконалено метод регулювання реактивної потужності зміною ширини імпульсу напруги живлення у разі симетричної та несиметричної комутації комутуючих тиристорів, що проявляється у регулюванні кута керування ними таким чином, щоб імпульс напруги живлення, ширину якого можна змінювати, переміщувався вправо або вліво залежно від способу комутації та дозволяє зменшити втрати активної потужності під час регулювання реактивної потужності в електричній мережі й в СТК з примусовою комутацією.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практична цінність роботи полягає в тому, що:

– запропоновано спосіб регулювання реактивної потужності в СТК з примусовою комутацією за допомогою зміни ширини імпульсу напруги живлення, який дозволяє реалізувати ефективні технології пофазного керування реактивною потужністю;

– розроблено схеми регуляторів реактивної потужності для СТК з примусовою комутацією, які дозволяють зменшити втрати активної потужності в електричних мережах та в компенсаторах, а також збільшити швидкодію компенсувальних установок;

– розроблено схеми для пофазного керування реактивною потужністю в СТК з примусовою комутацією, які дозволяють синхронізувати роботу систем з мережею, забезпечити мікропроцесорне керування у реальному часі та реалізувати необхідний алгоритм перемикання всіх елементів систем відповідно до значень їх цільових функцій;

– отримані в дисертаційній роботі результати наукових досліджень впроваджено в паливно-заправному комплексі АТ «Аеропорт Шимкент» з метою забезпечення ефективної компенсації реактивної потужності під час електропостачання паливно-заправного комплексу, стабілізації напруги в вузлах електричної мережі, збільшення швидкодії та зниження втрат

електроенергії (акт про впровадження від 14.11.2013 р.), передано у відокремлений підрозділ «Волинські магістральні електричні мережі» ДП «НЕК «Укренерго» для оптимізації режимів магістральних електричних мереж (акт про впровадження від 17.03.2016 р.) та впроваджено в навчальному процесі Луцького національного технічного університету (акт про впровадження від 07.04.2016 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові положення та результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані здобувачем одноосібно. В наукових роботах, опублікованих у співавторстві, автору дисертаційної роботи належить: в роботі [1] – спосіб регулювання реактивної потужності шириною імпульсу напруги живлення у разі несиметричного режиму для СТК з примусовою комутацією та компенсованою нейтраллю; в роботі [3] – оцінювання ефективності енергетичних процесів в асинхронних СТК реактивної потужності з примусовою комутацією; в роботі [4] – спосіб регулювання реактивної потужності шириною імпульсу напруги живлення у разі симетричного режиму для СТК з примусовою комутацією та компенсованою нейтраллю за наявності вольтододавання; в роботі [5] – схема керування СТК з примусовою комутацією та ізольованою нейтраллю; в роботі [6] – математична модель СТК з примусовою комутацією та компенсованою нейтраллю за наявності вольтододавання у разі регулювання без фазового зсуву за основною гармонікою; в роботі [7] – графічна інтерпретація принципів роботи схеми керування СТК реактивної потужності з примусовою комутацією; в роботі [9] – інтерпретація інтегральних показників енергетичного процесу СТК реактивної потужності з примусовою комутацією; в роботі [10] – інтерпретація результатів дослідження математичної моделі СТК реактивної потужності з примусовою комутацією; в роботі [11] – інтерпретація інтегральних показників енергетичного процесу СТК з примусовою комутацією та компенсованою нейтраллю за наявності вольтододавання; в роботі [12] – розроблення математичної моделі СТК реактивної потужності з примусовою комутацією під час його живлення синусоїдною напругою; в роботі [13] – інтерпретація інтегральних показників енергетичного процесу СТК реактивної потужності з примусовою комутацією та ізольованою нейтраллю; в роботі [14] – ідеї оптимізації енергетичних показників у СТК з примусовою комутацією та ізольованою нейтраллю; в роботі [15] – інтерпретація результатів дослідження математичної моделі СТК реактивної потужності з примусовою комутацією та компенсованою нейтраллю; в роботі [16] – алгоритм роботи мікропроцесорної системи СТК з примусовою комутацією та компенсованою нейтраллю під час пофазного керування реактивною потужністю; в роботі [17] – ідея покращення функціональності пристрою для регулювання реактивної потужності за рахунок асинхронної комутації фазних реакторів; в роботі [18] – ідея зменшення питомих втрат активної потужності в регуляторі реактивної потужності вибором моменту відкриття та закриття комутуючих тиристорів; в роботі [19] – ідея використання вольтододавання у статичному регуляторі реактивної потужності для зменшення питомих втрат активної потужності.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідались та обговорювались на 10 наукових конференціях та одному семінарі, зокрема: міжнародній науково-технічній конференції «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах» (Луцький НТУ, м. Луцьк, 2010 р., 2012 р., 2014 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика», на якій отримано диплом за найкращу наукову розробку для промислового підприємства (Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського, м. Кременчук, 2011 р., 2013 р., 2014 р.), міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка, м. Харків, 2011 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Енергетика. Екологія. Людина» (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, 2012 р.), міжнародному форумі-конкурсі молодих учених «Проблеми надровикористання» (Національний мінерально-сировинний університет «Гірничий», м. Санкт-Петербург, 2013 р.), міжнародній науково-практичній конференції «Технічні науки – від теорії до практики» (м. Новосибірськ, 2013 р.), всеукраїнському науковому семінарі «Моніторинг енерго- та ресурсовикористання в складних виробничих системах» (м. Луцьк, 2015 р.).

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 19 наукових праць, з них: 6 статей у фахових наукових журналах та збірниках України, що включені до наукометричних баз даних, 2 в іноземних журналах та збірниках (Російська Федерація), 7 у збірниках матеріалів міжнародних науково-технічних конференцій, 1 у збірнику тез доповідей всеукраїнського наукового семінару, отримано 3 патенти України на корисну модель.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, додатків і списку використаних джерел, загальний обсяг дисертації 198 сторінок, з яких основний зміст викладений на 138 сторінках друкованого тексту, містить 42 рисунки, 5 таблиць. Список використаних джерел складається з 111 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми дисертації, сформульовано мету, завдання, об'єкт та предмет досліджень, показано наукову новизну та практичне значення отриманих у дослідженні результатів, вказано особистий внесок здобувача, наведено дані про впровадження результатів роботи, їх апробацію та висвітлення наукових досліджень у фахових друкованих виданнях.

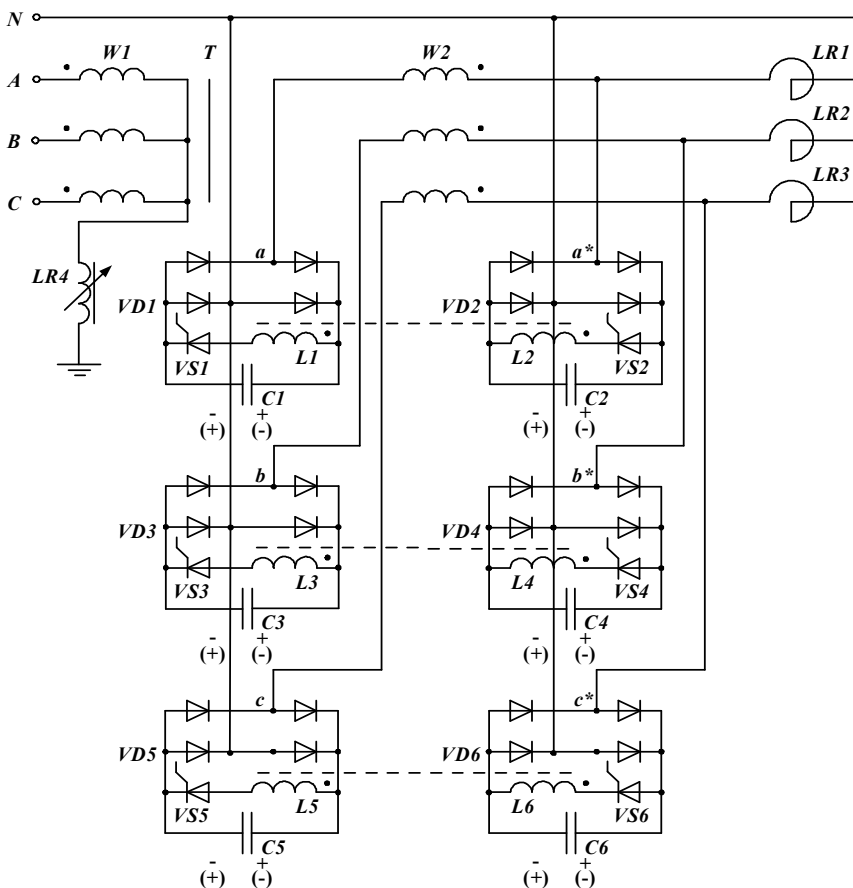
**У першому розділі** здійснено порівняльний аналіз відомих схем СТК реактивної потужності з примусовою комутацією, розглянуто наявні способи та засоби керування ними, проаналізовано особливості методів дослідження енергетичних процесів у СТК з примусовою комутацією та обґрунтовано вибір

інтегрального методу дослідження.

Під час порівняльного аналізу встановлено, що СТК з непрямою компенсацією реактивної потужності займають середню позицію за значенням втрат активної потужності між традиційними та перспективними компенсаторами з прямою компенсацією, але за швидкістю їм не поступаються. Найбільш перспективними є СТК на базі тиристорних регуляторів змінної напруги з примусовою комутацією. Однак вони мають недостатню швидкість та не можуть забезпечити пофазне керування реактивною потужністю. Тому виникає необхідність у створенні регуляторів з пофазним керуванням реактивною потужністю, належною швидкістю та малими втратами активної потужності. Аналіз способів керування СТК з примусовою комутацією свідчить про те, що регулювання реактивної потужності здійснюється переважно шляхом зміни кутів відкриття комутуючих тиристорів. Встановлено, що мало уваги приділено несиметричним режимам комутації тиристорів та ефективним способам пофазного керування реактивною потужністю в СТК з примусовою комутацією. Також потребує вдосконалення метод незалежного керування кутами відкриття та закриття комутуючих тиристорів в СТК з примусовою комутацією.

Проведений аналіз об'єкта дослідження дозволяє окреслити коло задач, які потребують вирішення, а саме, збільшення швидкості СТК з примусовою комутацією і зменшення втрат активної потужності в них та в електричних мережах під час пофазного керування реактивною потужністю.

У другому розділі вдосконалено СТК з примусовою комутацією та



компенсованою й ізольованою нейтраліми із застосуванням ефективних технологій пофазного керування реактивною потужністю та за допомогою математичного моделювання досліджено режими їх роботи.

Прототип регулятора реактивної потужності має недостатню швидкість та не може забезпечити пофазне керування реактивною потужністю. Ці

Рисунок 1 – Схема регулятора реактивної потужності

недоліки подолано в



регуляторі реактивної потужності, схема якого наведена на рис. 1. Цей регулятор забезпечує пофазне керування реактивною потужністю в навантаженні та має більш високу швидкодію за рахунок того, що квазіусталений режим роботи у кожній його фазі настає за один період напруги живлення. Зменшити питомі втрати активної потужності під час регулювання реактивної потужності та збільшити швидкодію можна також за допомогою схеми регулятора реактивної потужності, що відрізняється від попередньої тим, що силові однофазні випрямлячі  $VD1, VD2, VD3, VD4, VD5, VD6$  та комутуючі тиристри  $VS1, VS2, VS3, VS4, VS5, VS6$  підключаються до суміжних фаз вторинної обмотки трансформатора або суміжних фаз реакторів.

Під час аналізу інтегральних показників енергетичного процесу в СТК з примусовою комутацією встановлено, що у разі їх живлення синусоїдною напругою питомі втрати активної потужності не залежать від кута відкриття тиристорів  $\alpha$  та залишаються постійними. Це не дозволяє реалізувати ефективні технології керування реактивною потужністю у цих СТК. Застосування в СТК з примусовою комутацією трансформатора, який живиться прямокутною напругою, надає йому нових можливостей.

Регулювання реактивної потужності в СТК з примусовою комутацією здійснюється з фазовим зсувом та без фазового зсуву за основною гармонікою або зміною ширини імпульсу напруги живлення. Диференційні рівняння, які описують електромагнітні процеси у силовому колі СТК з примусовою комутацією для різних режимів заземлення нейтралі будуть мати вигляд:

– для компенсованої нейтралі:

$$x_{|2-n|} \frac{di_n(\theta)}{d\theta} + r_{|2-n|} i_n(\theta) = (2-n)U_m, \quad (1)$$

– для ізольованої нейтралі:

$$x_{|2-n|} \frac{di_n(\theta)}{d\theta} + r_{|2-n|} i_n(\theta) = 2(2-n)U_m,$$

де  $n = 1, 2, 3$  – номер ділянки часової діаграми;  $U_m$  – амплітуда фазної напруги;  $\theta = \omega t$  – кутова координата;  $\omega$  – кутова частота;  $r_1 = R_{2a} + R_{p1} + R_{p2} + R_{2b}$ ;  $x_1 = X_{2a} + X_{p1} + X_{p2} + X_{2b}$ ;  $r_0 = R_{p1} + R_{p2}$ ;  $x_0 = X_{p1} + X_{p2}$ .

У результаті дослідження математичної моделі СТК з примусовою комутацією та компенсованою нейтраллю за рівнянням (1) одержано інтегральні показники енергетичного процесу та показники швидкодії у відносних одиницях (рис. 2). Розрахунки здійснені для СТК, який містить силовий трифазний трансформатор ТРДН-25000/110-76У1 та фазний реактор РКОС-3900/10-У1. Під час регулювання за варіантами 1 та 3 (рис. 2,а, криві 1 та 3) СТК споживає майже однакову реактивну потужність. Збільшення кута відкриття тиристорів  $\alpha$  призводить до зменшення питомих втрат активної потужності  $\Delta P_o(\alpha)$  (рис. 2,б), які стають меншими за рівень базового варіанта  $\Delta P_{Obase}(\alpha) = \rho_1$ , що підвищує ефективність використання СТК як джерела реактивної потужності. У разі регулювання реактивної потужності шириною імпульсу напруги живлення  $\gamma$  спосіб комутації тиристорів СТК не впливає на

значення та характер залежності  $Q^*(\gamma)$  (рис. 2,г). У разі симетричної комутації тиристорів, якщо  $\gamma < 50,6^\circ$ , питомі втрати активної потужності  $\Delta P_Q(\gamma) < \Delta P_{Qbase}(\gamma)$  (рис. 2,д). Під час несиметричної комутації тиристорів  $\Delta P_Q(\gamma) < \Delta P_{Qbase}(\gamma)$  у всьому діапазоні зміни  $\gamma$ . Для оцінки швидкодії СТК доцільно використовувати не швидкість зміни реактивної потужності, яка може бути різною за знаком, а її модуль. Для всіх способів регулювання модуль швидкості зміни реактивної потужності  $mod dQ^*(\alpha)/d\alpha = f(\alpha)$  задовольняє орієнтовним значенням швидкодії компенсуючих пристроїв (рис. 2,в, заштриховані лінії). Найбільшу швидкодію має СТК у разі регулювання без фазового зсуву за основною гармонікою за першим варіантом (рис. 2,в, крива 2). Із рис. 2,е видно, що під час регулювання реактивної потужності шириною імпульсу  $\gamma$  модуль швидкості зміни реактивної потужності  $mod dQ^*(\gamma)/d\gamma = f(\gamma)$  практично не залежить від  $\gamma$ , оскільки  $\rho_0 \ll 1, \rho_1 \ll 1$ .

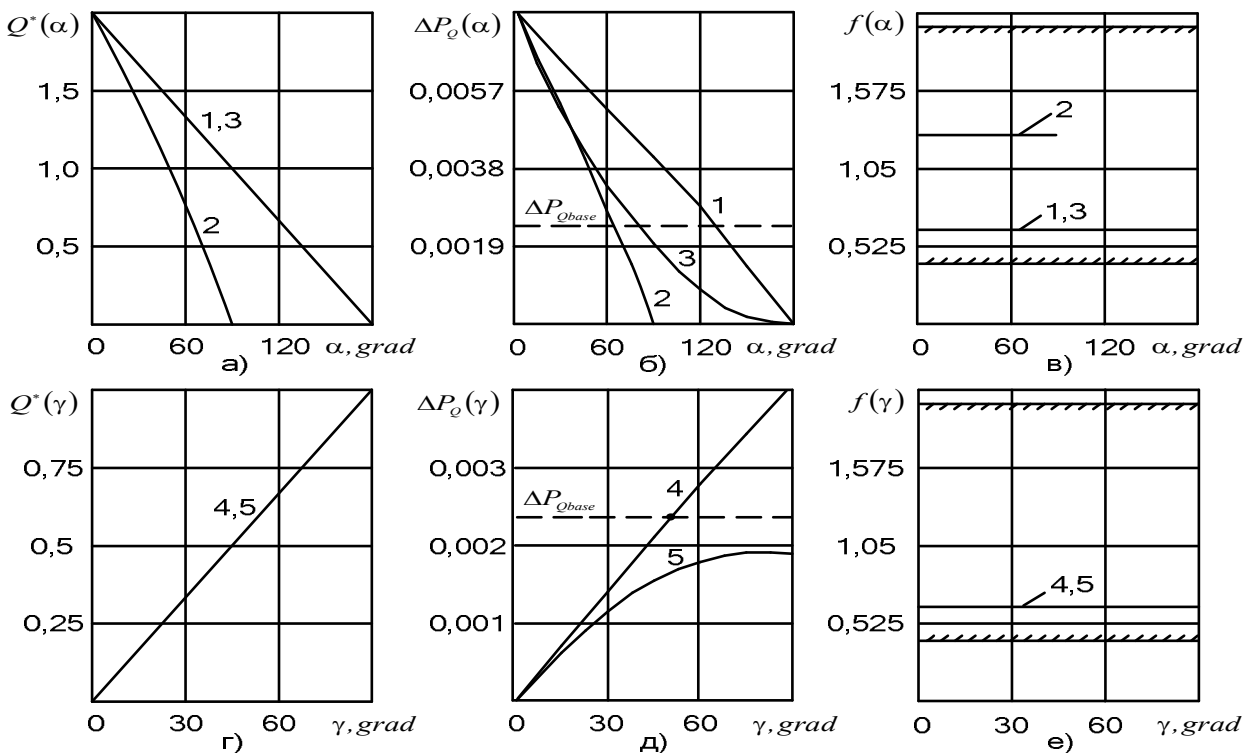


Рисунок 2 – Графіки зміни реактивної, питомих втрат активної та модуля швидкості зміни реактивної потужностей СТК з примусовою комутацією та компенсованою нейтраллю під час регулювання: 1 – з фазовим зсувом за основною гармонікою; 2, 3 – без фазового зсуву за основною гармонікою (перший та другий варіант); 4, 5 – шириною імпульсу напруги живлення

СТК з примусовою комутацією та ізольованою нейтраллю споживає в 1,5 раза менше реактивної потужності, ніж попередній, що дозволяє знизити ємність конденсаторних батарей та зменшити їх собівартість.

Узагальнені результати досліджень СТК з примусовою комутацією та різними режимами роботи нейтралі:

1. Розроблено схеми регуляторів з пофазним керуванням реактивною

потужністю для СТК з примусовою комутацією та різними режимами заземлення нейтралі, які дозволяють збільшити швидкодію статичних компенсаторів, зменшити втрати активної потужності в них та в електричних мережах.

2. Проведено аналіз інтегральних показників енергетичного процесу в СТК з примусовою комутацією під час їх живлення синусоїдною (базовий варіант) та прямокутною напругами. Встановлено, що у разі живлення СТК з примусовою комутацією синусоїдною напругою неможливо реалізувати ефективні технології керування реактивною потужністю. Доведена ефективність цих СТК під час їх живлення прямокутною напругою порівняно з базовим варіантом.

3. Запропоновано удосконалений метод регулювання реактивної потужності шляхом зміни ширини імпульсу напруги живлення, який дозволяє забезпечити зменшення втрат активної потужності в СТК з примусовою комутацією для будь-якого режиму заземлення нейтралі. Виявлено, що інтегральні показники енергетичного процесу у ньому не залежать від режиму заземлення нейтралі та кута відкриття комутуючих тиристорів. Вони є лише функціями ширини імпульсу напруги живлення. Встановлено, що у разі несиметричної комутації комутуючих тиристорів питомі втрати активної

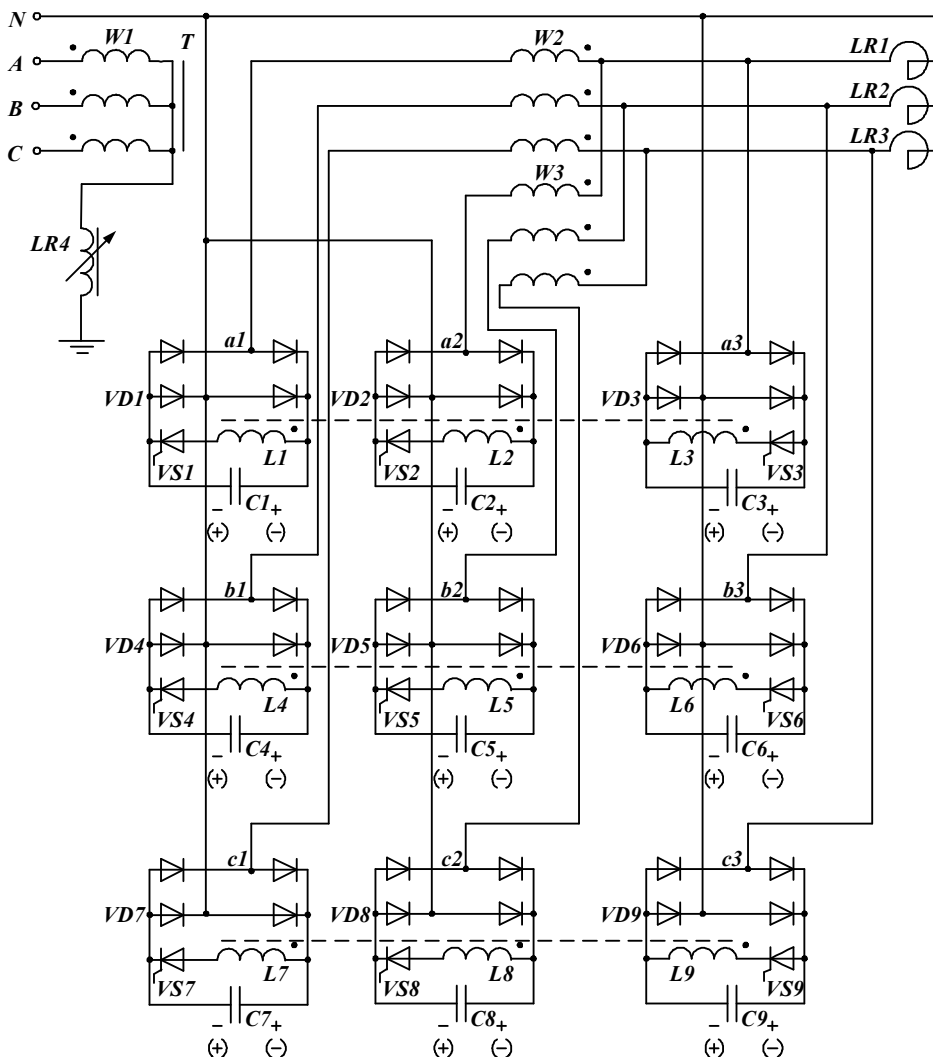


Рисунок 3 – Схема статичного регулятора реактивної потужності

потужності взагалі не перевищують однойменних втрат базового варіанта, що забезпечує необхідну економічність.

У третьому розділі розроблено математичну модель СТК з примусовою комутацією та компенсованою нейтраллю за наявності вольтододавання та проаналізовано режими його роботи. Для зменшення питомих втрат активної потужності та збільшення швидкодії необхідно, щоб під

час застосування вольтододавання реактивна потужність збільшувалась, а втрати активної потужності зменшувались. Для реалізації цього нового алгоритму запропоновано схему статичного регулятора реактивної потужності, який входить в склад СТК з примусовою комутацією (рис. 3).

У разі дії позитивної півхвилі напруги живлення амплітудою  $U_m$ , яка знімається з обмотки  $w_2$ , статичний регулятор споживає активну потужність, а коли діє негативна півхвиля амплітудою  $vU_m$ , яка знімається з обмотки  $w_3$ , він генерує активну потужність. Збільшуючи коефіцієнт вольтододавання  $v$ , можна підвищити генерацію активної потужності і зменшити втрати активної потужності. Водночас, реактивна потужність та крутість регульовальної характеристики регулятора будуть зростати. Електромагнітні процеси в СТК з примусовою комутацією та компенсованою нейтраллю за наявності вольтододавання будуть описуватись узагальненим диференціальним рівнянням першого порядку:

$$x_{|2-n|} \frac{di_n(\theta)}{d\theta} + r_{|2-n|} i_n(\theta) = (2-n)v^{\frac{n-1}{2}} U_m. \quad (2)$$

У результаті дослідження математичної моделі СТК з примусовою комутацією за рівнянням (2) одержані інтегральні показники енергетичного процесу та показники швидкодії (рис. 4 та рис. 5) для зазначеної вище конфігурації СТК.

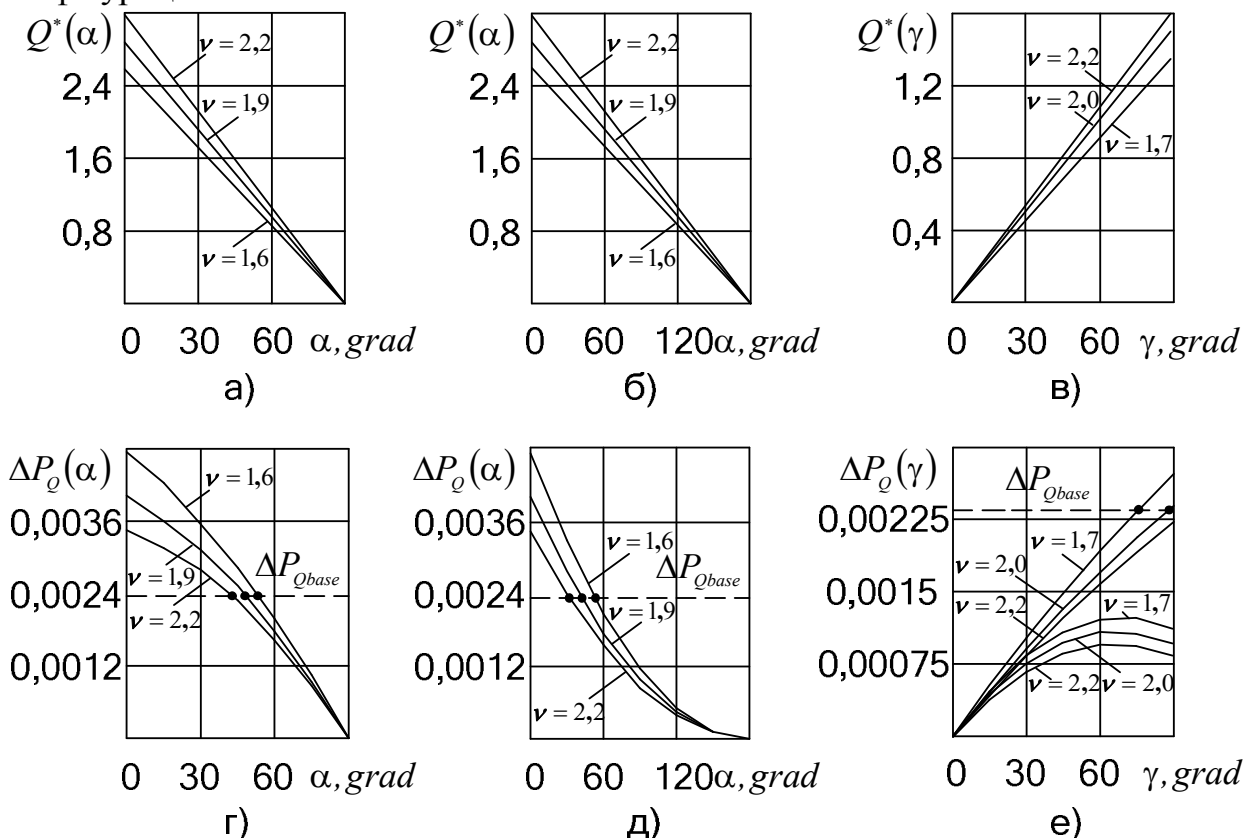


Рисунок 4 – Графіки зміни реактивної (а – в) та питомих втрат активної (г – е) потужностей СТК з примусовою комутацією і компенсованою нейтраллю та вольтододаванням під час регулювання: а, г; та б, д – без фазового зсуву за основною гармонікою (перший та другий варіанти); г, ж – шириною імпульсу напруги живлення (симетричний і несиметричний режими)

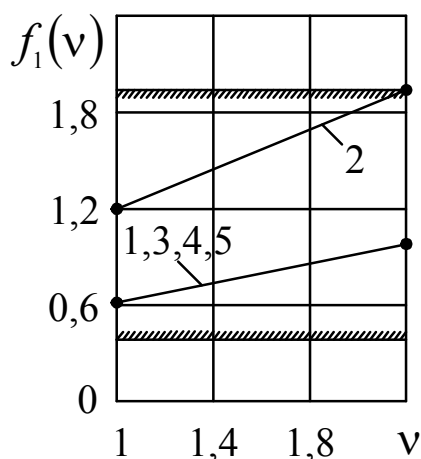


Рисунок 5 – Графік модуля швидкості зміни реактивної потужності СТК з примусовою комутацією і компенсованою нейтраллю та вольтододаванням під час регулювання: 1 – з фазовим зсувом за основною гармонікою; 2, 3 – без фазового зсуву за основною гармонікою (перший та другий варіанти); 4, 5 – шириною імпульсу напруги живлення (симетричний і несиметричний режими)

(рис. 4,в). У разі симетричної комутації тиристорів збільшення  $\gamma$  призводить до зростання питомих втрат активної потужності. Зменшити їх можна шляхом збільшення коефіцієнта вольтододавання  $\nu$ . При певному значенні коефіцієнта  $\nu$  питомі втрати активної потужності  $\Delta P_Q(\gamma) < \Delta P_{Qbase}$  (рис. 4,е, пунктирна лінія) у всьому діапазоні зміни ширини імпульсу  $\gamma$ . У разі несиметричної комутації тиристорів криві  $\Delta P_Q(\gamma)$  для різних  $\nu$  мають максимуми, які не перевищують рівень  $\Delta P_{Qbase}$  (рис. 4,е) і під час збільшення коефіцієнта  $\nu$  зменшуються.

Встановлено, що у разі збільшення коефіцієнта вольтододавання  $\nu$  швидкодія СТК з примусовою комутацією зростає (рис. 5). Найбільшу швидкодію має спосіб регулювання реактивної потужності на рис. 5 (крива 2).

Узагальнені результати досліджень СТК з примусовою комутацією та компенсованою нейтраллю за наявності вольтододавання:

1. Розроблено схему статичного регулятора з пофазним керуванням реактивною потужністю для СТК з примусовою комутацією та компенсованою нейтраллю за наявності вольтододавання, за допомогою якої можна забезпечити зростання швидкодії статичного компенсатора та зменшення втрат активної потужності в ньому та в мережі за рахунок збільшення коефіцієнта вольтододавання  $\nu$ .

2. Встановлено, що у разі живлення СТК з примусовою комутацією та компенсованою нейтраллю за наявності вольтододавання синусоїдною

Встановлено, що під час регулювання без фазового зсуву за основною гармонікою реактивна потужність СТК з примусовою комутацією та компенсованою нейтраллю за наявності вольтододавання практично є лінійною функцією кута відкриття  $\alpha$ , оскільки  $\rho_0 \ll 1, \rho_1 \ll 1$ , й у разі збільшення коефіцієнта вольтододавання  $\nu$  зростає (рис. 4,а,б). У той же час питомі втрати активної потужності  $\Delta P_Q(\alpha)$  зменшуються (рис. 4,г,д) і стають меншими від рівня базового варіанта  $\Delta P_{Qbase}$ .

Під час регулювання реактивної потужності шириною імпульсу напруги живлення  $\gamma$  інтегральні показники енергетичного процесу не залежать від кута відкриття  $\alpha$  (рис. 4,в,е). Реактивна потужність СТК з примусовою комутацією та компенсованою нейтраллю за наявності вольтододавання практично є лінійною функцією  $\gamma$  й у разі збільшення коефіцієнта вольтододавання  $\nu$  зростає

напругою питомі втрати активної потужності під час регулювання реактивної потужності не залежать від кута відкриття комутуючих тиристорів, що не дозволяє реалізувати ефективні технології керування реактивною потужністю. Доведена ефективність цього СТК у разі його живлення прямокутною напругою порівняно з базовим варіантом.

3. Показано, що СТК з примусовою комутацією та компенсованою нейтраллю дозволяє за рахунок збільшення коефіцієнта вольтододавання підвищити швидкодію компенсатора через зростання крутості його регулювальних характеристик.

4. Запропоновано метод регулювання реактивної потужності зміною ширини імпульсу напруги живлення, який забезпечує ефективне зменшення втрат активної потужності в електричній мережі та в СТК з примусовою комутацією.

У четвертому розділі розглянуто багатокоординатне керування СТК з примусовою комутацією в системах електропостачання та розроблено схеми пофазного керування реактивною потужністю в них.

Для наявних способів регулювання реактивної потужності кут відкриття другого комутуючого тиристора залежить від кута відкриття першого комутуючого тиристора. Запропоновані схеми СТК з примусовою комутацією забезпечують незалежне керування кутами відкриття та закриття комутуючих тиристорів  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ . Мета керування визначається цільовою функцією, яка залежить від цих кутів. Її можна одержати, виходячи із необхідності забезпечити зменшення питомих втрат активної потужності під час пофазного керування реактивною потужністю СТК. Таке керування можна назвати багатокоординатним, оскільки воно здійснюється незалежною зміною всіх

кутів відкриття та закриття комутуючих тиристорів. Цільові функції  $z(x, y)$  визначають деякі поверхні керування у тривимірному просторі  $(z, x, y)$ , де  $x = \alpha_1 + \alpha_2$ ,  $y = \alpha_2 + \alpha_3$ .

Поверхня керування для СТК з ізольованою нейтраллю буде зміщена вниз відносно однойменної поверхні для СТК з компенсованою нейтраллю й тому вона переходить в область негативних значень раніше. Поверхні керування  $z(x, y)$  СТК з примусовою комутацією та компенсованою нейтраллю за наявності вольтододавання у разі збільшення коефіцієнта  $v$  також зміщуються вниз і переходять в область негативних значень раніше.

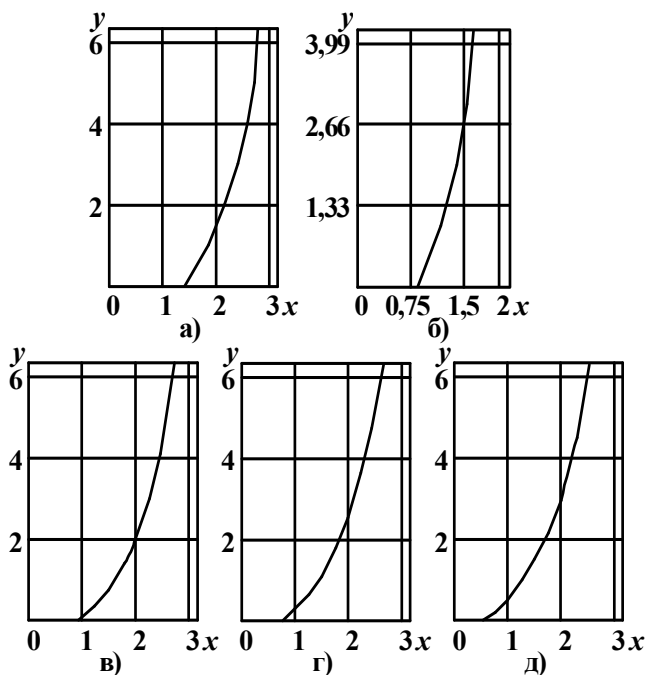


Рисунок 6 – Границі переходу поверхонь керування в область негативних значень для різних режимів заземлення нейтралі (а, б) та з вольтододаванням: в)  $v = 1,6$ ; г)  $v = 1,9$ ; д)  $v = 2,2$



Вона містить мікропроцесорну систему, до складу якої входять мікропроцесор МП, оперативний пристрій для запам'ятовування ОЗП, постійний пристрій для запам'ятовування ПЗП, термінал Т, шина адрес ША, шина даних ШД, шина команд ШК, пристрої спряження ПС1, ПС2, ПС3, ПС4, ПС5, ПС6, цифро-аналогові перетворювачі ЦАП1, ЦАП2, ЦАП3 та аналогово-цифрові перетворювачі АЦП1, АЦП2.

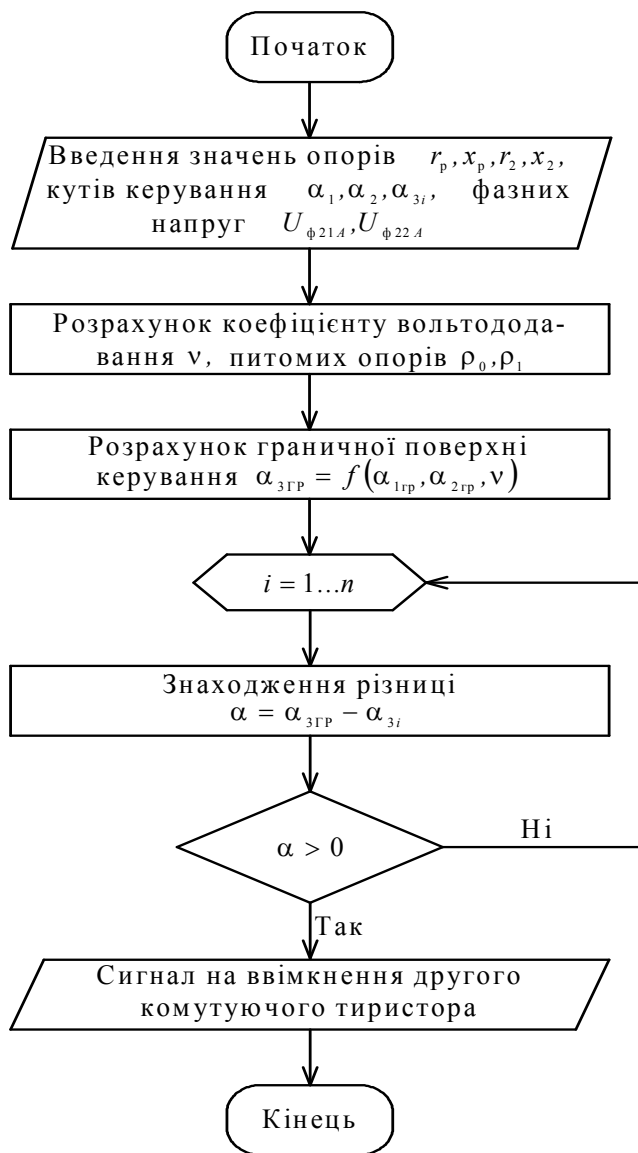


Рисунок 8 – Алгоритм роботи мікропроцесорної системи

Алгоритм роботи мікропроцесорної системи наведено на рис. 8. З термінала Т в мікропроцесорну систему вводять: значення опорів фазного реактора й вторинної обмотки трансформатора Т1  $r_p, x_p, r_2, x_2$ ; значення кутів керування комутуючими тиристорами  $\alpha_1, \alpha_2$  та дискретну сукупність кутів керування  $\alpha_{3i}$ , яка під час збільшення індексу  $i$  від 1 до  $n$  зменшується від  $\pi$  до 0; значення фазних напруг  $U_{\phi 21A}, U_{\phi 22A}$ , що встановлюють за допомогою РПН на двох розщеплених обмотках  $w_{21A}$  та  $w_{22A}$  на стороні низької напруги.

Мікропроцесорна система обчислює коефіцієнт вольтододавання  $v$ , питомі опори  $\rho_0, \rho_1$ , граничну поверхню керування  $\alpha_{3ГР} = f(\alpha_{1ГР}, \alpha_{2ГР}, v)$  та різницю  $\alpha = \alpha_{3ГР} - \alpha_{3i}$ . Якщо умова  $\alpha > 0$  не виконується, то індекс  $i$  збільшується на одиницю та знову визначається різниця  $\alpha = \alpha_{3ГР} - \alpha_{3i}$ . Цей процес триває до тих пір, поки не буде виконана умова  $\alpha > 0$ . Тоді мікропроцесорна система схеми

керування СТК з примусовою комутацією подає сигнал на відкриття другого комутуючого тиристора під час дії негативної півхвилі напруги живлення. Цей алгоритм дозволяє знизити втрати активної потужності під час регулювання реактивної потужності нижче за рівень базового варіанта. Значення коефіцієнта  $v$  можна змінювати за допомогою РПН.

Схема пристрою, що забезпечує синхронізацію та виконання необхідного алгоритму перемикання комутуючих тиристорів, містить: трансформатор напруги Т2, датчі напруги ДН1, ДН2, однофазні мостові випрямлячі VD1, VD2, VD3, генератори пилкоподібної напруги ГПН1, ГПН2, генератор прямокутної



уніполярної напруги ГПУН, нуль органи НО1, НО2, НО3, НО4, логічний елемент «АБО», тактовний D-тригер з потенціальним керуванням, ключ на базі логічного елемента «ЗАБОРОНА» та формувачі імпульсів  $\Phi 1$ ,  $\Phi 2$  та  $\Phi 3$ .

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі отримано нове вирішення актуальної науково-прикладної задачі зменшення питомих втрат активної потужності в електричній мережі та у статичному тиристорному компенсаторі (СТК) з примусовою комутацією під час керування реактивною потужністю та збільшення його швидкодії в умовах різко змінного реактивного навантаження, а також розроблення засобів керування статичними компенсаторами, що дозволяє підвищити ефективність їх застосування як джерел реактивної потужності.

Проведені дослідження дозволили отримати такі результати:

1. Проведено порівняльний аналіз наявних схем статичних тиристорних компенсаторів з примусовою комутацією, проаналізовано способи і засоби керування ними та розглянуто методи дослідження енергетичних процесів у них. Встановлено, що найбільш перспективними є СТК з непрямую компенсацією реактивної потужності на базі тиристорних регуляторів змінної напруги з примусовою комутацією, які дозволяють покращити їх енергетичні показники та одержати різноманітні форми напруг на навантаженні. Однак в цих статичних компенсаторах неможливе пофазне керування реактивною потужністю, що знижує їх швидкодію і вимагає вдосконалення наявних способів та засобів управління ними.

2. Запропоновано математичні моделі, на підставі яких розроблено схеми статичних регуляторів з пофазним керуванням реактивною потужністю для СТК з примусовою комутацією та компенсованою нейтраллю без й за наявності вольтододавання, а також ізольованою нейтраллю. Досліджено режими роботи цих СТК під час їх живлення синусоїдною і прямокутною напругами. Встановлено, що у разі живлення синусоїдною напругою (базовий варіант) питомі втрати активної потужності під час регулювання реактивної потужності залишаються постійними та не залежать від кута відкриття комутуючих тиристорів. Доведено, що у разі живлення цих СТК прямокутною напругою, зміною кута відкриття комутуючих тиристорів, збільшенням коефіцієнта вольтододавання або вибором способу регулювання реактивної потужності можна зменшити питомі втрати активної потужності в електричній мережі та в статичних компенсаторах і збільшити їх швидкодію.

3. Вперше запропоновано метод багатокординатного керування СТК з примусовою комутацією, згідно з яким регулювання реактивної потужності здійснюється за рахунок незалежного керування всіма кутами відкриття та закриття комутуючих тиристорів відповідно до цільової функції системи, яка визначається за умови, що питомі втрати активної потужності під час регулювання реактивної потужності не мають перевищувати економічно доцільного рівня базового варіанта.

4. Запропоновано удосконалений метод пофазного керування реактивною потужністю в СТК з примусовою комутацією для різних режимів заземлення нейтралі, за допомогою якого зміною ширини імпульсу напруги живлення у разі застосування симетричної чи несиметричної комутації комутуючих тиристорів можна зменшити питомі втрати активної потужності під час регулювання реактивної потужності в статичних компенсаторах на (20...60)% та збільшити їх швидкодію майже на 70% порівняно з базовим варіантом.

5. На підставі методу багатокординатного керування розроблено схеми керування СТК з примусовою комутацією для різних режимів заземлення нейтралі без і за наявності вольтододавання, які дозволяють реалізувати ефективні технології пофазного керування реактивною потужністю та збільшити швидкодію статичних компенсаторів.

6. Управління мікропроцесорними системами, що входять до складу схем керування СТК з примусовою комутацією, реалізовано у вигляді алгоритмів, які дають змогу обчислити необхідні для керування параметри системи та визначити її цільову функцію виходячи із того, що питомі втрати активної потужності під час регулювання реактивної потужності не можуть перевищувати економічно доцільного рівня.

7. Роботоздатність та ефективність запропонованих у роботі методів, математичних моделей і алгоритмів підтверджено впровадженням їх результатів в паливно-заправному комплексі АТ «Аеропорт Шимкент». Практичні результати досліджень, що стосуються питань оптимізації режимів магістральних електричних мереж, передані для дослідної експлуатації у відокремлений підрозділ «Волинські магістральні електричні мережі» ДП «НЕК «Укренерго».

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Петухов М.В. Енергоощадні технології керування режимами роботи статичних тиристорних компенсаторів реактивної потужності з примусовою комутацією [Текст] / М.В. Петухов, С.П. Літковець // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2011. – Вип. 2(14). – С. 72–76. – ISSN 2072-2052 (Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus, РІНЦ, DRJI).

2. Літковець С.П. Оптимізація режимів роботи статичних тиристорних компенсаторів реактивної потужності з примусовою комутацією [Текст] / С.П. Літковець // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. – 2011. – Вип. 117. – С. 158–160. – ISBN 5-7987-0176X (РІНЦ).

3. Літковець С.П. Глобальне керування енергетичними процесами в асинхронних статичних тиристорних компенсаторах реактивної потужності з примусовою комутацією [Текст] / С.П. Літковець, М.В. Петухов // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2012. – №1(30). – С. 34–38. – ISSN 1813-5420 (РІНЦ, Наукова періодика України, Google Scholar).

4. Петухов М.В. Спосіб зниження питомих втрат активної потужності в статичних тиристорних компенсаторах реактивної потужності з примусовою

комутацією [Текст] / М.В. Петухов, С.П. Літковець // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2013. – Вип. 2(22). Ч. 2. – С. 298–302. – ISSN 2072-2052.

5. Літковець С.П. Статичний тиристорний компенсатор з примусовою комутацією та ізольованою нейтраллю та схема керування ним [Текст] / С.П. Літковець, М.В. Петухов // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – №2/8(68). – С. 28–35. – ISSN 1729-3774 (Ulrich's Periodicals Directory, DRIVER, BASE, Index Copernicus, WorldCat, РІНЦ, EBSCO, ResearchBib, DRJI, CrossRef).

6. Літковець С.П. Спосіб підвищення енергетичної ефективності статичних тиристорних компенсаторів реактивної потужності з примусовою комутацією [Текст] / С.П. Літковець, М.В. Петухов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2014. – Вип. 2(26). – С. 56–62. – ISSN 2072-2052.

7. Литковец С.П. Статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности с принудительной коммутацией и средства управления ими [Текст] / С.П. Литковец, Н.В. Петухов // Технические науки – от теории к практике: XXVII Международная научно-практическая конференция: сборник статей. – Новосибирск: Изд. «СибАК», 2013. – №10(23). Ч. II. – С. 75–86. – ISSN 2308-5991 (РІНЦ).

8. Литковец С.П. Эффективные стратегии управления статическими тиристорными компенсаторами реактивной мощности с принудительной коммутацией [Текст] / С.П. Литковец // Проблемы недропользования: Международный форум-конкурс: Сборник научных трудов. Ч. I. – СПб.: НМСУ «Горный», 2013. – С. 226–228. – ISBN 978-5-94211-645-3.

9. Петухов М.В. Енергоощадні технології керування режимами роботи статичних тиристорних компенсаторів реактивної потужності з примусовою комутацією [Текст] / М.В. Петухов, С.П. Літковець // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. XIII Міжнародна науково-технічна конференція: матеріали доповідей. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 1(1). – С. 168–169. – ISSN 2221-5190.

10. Літковець С.П. Глобальне керування енергетичними процесами в асинхронних статичних тиристорних компенсаторах реактивної потужності з примусовою комутацією [Текст] / С.П. Літковець, М.В. Петухов // Енергетика. Екологія. Людина: IV Міжнародна науково-технічна конференція: збірник наукових праць. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – С. 18–23. – ISSN 2307-7239.

11. Літковець С.П. Спосіб підвищення енергетичної ефективності статичних тиристорних компенсаторів реактивної потужності з примусовою комутацією [Текст] / С.П. Літковець, М.В. Петухов // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика: XV Міжнародна науково-технічна конференція: матеріали доповідей. – Кременчук: КрНУ, 2014. – Вип. 1(2). – С. 225–227. – ISSN 2221-5190.

12. Петухов М.В. Інтегральні показники енергетичного процесу статичного тиристорного компенсатора реактивної потужності з примусовою комутацією [Текст] / М.В. Петухов, С.П. Літковець // Підвищення рівня ефективності

енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах: III Міжнародна науково-технічна конференція: матеріали конференції. – Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2010. – С. 151–153.

13. Петухов М.В. Дослідження енергетичних процесів в статичних тиристорних компенсаторах реактивної потужності з примусовою комутацією [Текст] / М.В. Петухов, С.П. Літковець // Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах: IV Міжнародна науково-технічна конференція: матеріали конференції. – Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2012. – С. 135–137.

14. Петухов М.В. Енергоощадні режими роботи статичних тиристорних компенсаторів реактивної потужності з примусовою комутацією [Текст] / М.В. Петухов, С.П. Літковець // Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах: IV Міжнародна науково-технічна конференція: матеріали конференції. – Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2012. – С. 141–143.

15. Петухов М.В. Дослідження енергетичних процесів в статичному тиристорному компенсаторі з примусовою комутацією та глухо заземленою нейтраллю [Текст] / М.В. Петухов, С.П. Літковець // Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах: V Міжнародна науково-технічна конференція: матеріали конференції. – Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2014. – С. 169–171.

16. Літковець С.П. Енергоощадні технології керування реактивною потужністю в статичних тиристорних компенсаторах з примусовою комутацією [Текст] / С.П. Літковець, В.С. Масечко, М.В. Петухов // Моніторинг енерго- та ресурсовикористання в складних виробничих системах: I всеукраїнський науковий семінар: матеріали доповідей. – Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2015. – С. 94–97.

17. Патент на корисну модель №69876 Україна, МПК (2006) G05F 1/70. Пристрій для регулювання реактивної потужності [Текст] // М.В. Петухов, С.П. Літковець. – u 2011 15153; Заявл. 21.12.2011; Опубл. 10.05.2012, Бюл. №9.

18. Патент на корисну модель №72838 Україна, МПК (2006.1) G05F 1/70. Регулятор реактивної потужності [Текст] // М.В. Петухов, С.П. Літковець. – u 2012 02980; Заявл. 14.03.2012; Опубл. 27.08.2012, Бюл. №16.

19. Патент на корисну модель №79407 Україна, МПК (2006.1) G05F 1/70. Статичний регулятор реактивної потужності [Текст] // М.В. Петухов, С.П. Літковець. – u 2012 10710; Заявл. 12.09.2012; Опубл. 25.04.2013, Бюл. №8.

## АНОТАЦІЇ

**Літковець С.П. Оптимізація режимів роботи статичних тиристорних компенсаторів з примусовою комутацією та пофазним керуванням реактивною потужністю. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи. – Вінницький національний технічний університет МОН України, Вінниця, 2016.

Дисертація присвячена вирішенню завдання підвищення ефективності керування та збільшення швидкодії статичних тиристорних компенсаторів (СТК) з примусовою комутацією і різними режимами заземлення нейтралі без та за наявності вольтододавання. Розроблено схеми регуляторів для пофазного керування реактивною потужністю та методи її регулювання для СТК з примусовою комутацією, які дозволяють зменшити втрати активної потужності в електричній мережі та в статичних компенсаторах і збільшити їх швидкодію. Запропоновано метод багатокординатного керування СТК з примусовою комутацією, згідно з яким регулювання реактивної потужності здійснюється залежно від цільової функції системи, яка одержана за умови, що питомі втрати активної потужності компенсатора не перевищують економічно обґрунтованого рівня. Розроблено схеми керування СТК.

Ключові слова: статичний тиристорний компенсатор, пофазне керування, регулятор реактивної потужності, швидкодія компенсатора, примусова комутація, вольтододавання, метод багатокординатного керування.

**Litkovets S.P. Optimization of modes of static thyristor compensators with forced commutation and phase-by-phase control of reactive power. – Manuscript.**

Thesis for a Candidate's Degree in Technical Science, speciality 05.09.03 – Electrotechnical Complexes and Systems. – Vinnytsia National Technical University MES of Ukraine, Vinnytsia, 2016.

This thesis focuses on solving problems of improving efficiency of control and increasing response speed of static thyristor compensators (STC) with forced commutation and various operating conditions of neutral grounding both with and without volt adding. The paper reveals the schemes of regulators for phase-by-phase control of reactive power and methods of its regulating for STC with forced commutation, which allows them to reduce losses of active power in the electric grid and in static compensators and to increase their response speed. This research offers a method of multicoordinate control of STC with forced commutation, due to which control of reactive power is performed in accordance with the target function of the system obtained under condition that the specific losses of active power of compensator do not exceed economically grounded level. The thesis represents the schemes of STC control.

Keywords: static thyristor compensator, phase-by-phase control, regulator of reactive power, compensator's response speed, forced commutation, volt adding, method of multicoordinate control.

**Литковец С.П. Оптимизация режимов работы статических тиристорных компенсаторов с принудительной коммутацией и пофазным управлением реактивной мощностью. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы. – Винницкий национальный технический университет МОН Украины, Винница, 2016.

В работе получено новое решение актуальной научно-прикладной задачи уменьшения потерь активной мощности в электрических сетях и статических тиристорных компенсаторах (СТК) с принудительной коммутацией, а также увеличения их быстродействия в условиях резкопеременной реактивной нагрузки и создание средств управления ими. Это позволяет увеличить эффективность применения статических компенсаторов в качестве источников реактивной мощности.

Объектом исследования являются режимы работы статических тиристорных компенсаторов с принудительной коммутацией и пофазным управлением реактивной мощностью. Предметом исследования являются математические модели и средства управления режимами работы СТК с принудительной коммутацией и пофазным управлением реактивной мощностью. Целью диссертационного исследования является повышение эффективности использования статических тиристорных компенсаторов с принудительной коммутацией путем оптимизации режимов их работы и разработка схем для пофазного управления реактивной мощностью в них.

Впервые разработаны математические модели СТК с принудительной коммутацией и пофазным управлением реактивной мощностью для различных режимов работы нейтрали при отсутствии и наличии вольтодобавки, которые позволяют оптимизировать режимы работы статических компенсаторов и увеличить их быстродействие.

Выполнена оценка влияния синусоидального и прямоугольного напряжения питания на интегральные показатели энергетического процесса в СТК с принудительной коммутацией, компенсированной и изолированной нейтралью. Установлено, что в случае питания СТК с принудительной коммутацией синусоидальным напряжением (базовый вариант) удельные потери активной мощности во время регулирования реактивной мощности являются постоянными и не зависят от угла открытия коммутирующих тиристоров и, поэтому, невозможно реализовать эффективные технологии пофазного управления реактивной мощностью. Подтверждена эффективность этого СТК при его питании прямоугольным напряжением по сравнению с базовым вариантом.

В исследовании усовершенствован метод регулирования реактивной мощности в СТК с принудительной коммутацией изменением ширины импульса напряжения питания, как при симметричной, так и при несимметричной коммутации коммутирующих тиристоров, обеспечивающий уменьшение потерь активной мощности во время регулирования реактивной мощности.

Усовершенствован метод оптимизации параметра СТК реактивной мощности с принудительной коммутацией и компенсированной нейтралью, который позволяет за счет увеличения коэффициента вольтодобавки увеличить быстродействие статического компенсатора и уменьшить потери активной мощности в нем и в электрической сети.

Впервые предложен метод многокоординатного управления СТК с принудительной коммутацией, с помощью которого путем независимого

управления всеми углами открытия и закрытия коммутирующих тиристоров в зависимости от целевой функции системы, можно снизить потери активной мощности в электрической сети и компенсаторе ниже уровня базового варианта, обеспечить необходимый диапазон регулирования реактивной мощности, многоканальное и независимое управление фазными реакторами.

Впервые предложены схемы управления СТК с принудительной коммутацией для разных режимов заземления нейтрали, как при отсутствии, так и при наличии вольтодобавки. Использование этих схем позволяет независимо управлять фазными реакторами каждой из фаз компенсатора, обеспечить необходимый алгоритм переключения коммутирующих тиристоров, микропроцессорное управление в реальном времени всеми элементами системы в соответствии с ее целевой функцией и, тем самым, реализовать метод многокоординатного управления.

Разработаны алгоритмы работы микропроцессорных систем, которые входят в состав схем управления СТК с принудительной коммутацией, во время регулирования реактивной мощности.

В соответствии с алгоритмом работы СТК с принудительной коммутацией, компенсированной и изолированной нейтралью, микропроцессорная система вычисляет удельные сопротивления силовой цепи, предельный угол открытия, разность между ним и заданным с терминала углом открытия. Алгоритм работы СТК с принудительной коммутацией и компенсированной нейтралью при наличии вольтодобавки отличается от предыдущего алгоритма тем, что дополнительно вычисляется коэффициент вольтодобавки. В случае положительной разности микропроцессорная система подает сигнал на включение второго коммутирующего тиристора во время действия отрицательной полуволны напряжения питания. При этом потери активной мощности во время регулирования реактивной мощности не будут превышать экономически целесообразного значения базового варианта. В противном случае заданный угол открытия будет уменьшаться до тех пор, пока указанная выше разность не будет положительной.

Ключевые слова: статический тиристорный компенсатор, пофазное управление, регулятор реактивной мощности, быстродействие компенсатора, принудительная коммутация, вольтодобавка, метод многокоординатного управления.

Підписано до друку 05.10.2016 р. Формат 29,7x42  $\frac{1}{4}$

Наклад 100 прим. Зам. № 2016-124.

Віддруковано в редакційно-видавничому відділі  
Луцького національного технічного університету.  
43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75. Тел.: 74-61-02