

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

**Домнін Ігор Феліксович**

**УДК 621.311:621.314**

**НАПІВПРОВІДНИКОВІ КОМПЕНСАТОРИ НЕАКТИВНИХ СКЛАДОВИХ ПОВНОЇ  
ПОТУЖНОСТІ**

**Спеціальність 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії**

**Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук**

**Харків – 2008**

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі промислової та біомедичної електроніки  
Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства  
освіти і науки України, м. Харків

**Науковий консультант** доктор технічних наук, професор

**Сокол Євген Іванович,**

Національний технічний університет

«Харківський політехнічний інститут»,

проректор з науково-педагогічної роботи

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор

**Жуйков Валерій Якович,**

Національний технічний університет України «Київський

політехнічний інститут», м. Київ,

декан факультету електроніки

доктор технічних наук, професор

**Павлов Геннадій Вікторович,**

Національний університет

кораблебудування, м. Миколаїв,

завідувач кафедри комп'ютеризованих

систем управління

доктор технічних наук, професор

**Переверзєв Анатолій Васильович,**

Запорізький інститут економіки та

інформаційних технологій, м. Запоріжжя,

проректор з наукової роботи

Захист відбудеться «12» червня 2008 р. о 14<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої  
ради Д 64.050.04 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний  
інститут», за адресою:

61002, м. Харків-2, вул. Фрунзе, 21

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного  
університету «Харківський політехнічний інститут»

Автореферат розісланий «24» квітня 2008 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

Осичев О.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Завдання розробки нових ефективних підходів до керування якістю електроенергії в процесі її генерації, перетворення і споживання вирішуються на різних рівнях - від компаній, що постачають електроенергію, до конкретного споживача. Відсутність контролю за якістю електроенергії і відповідності її встановленим нормам призводить до неможливості нормального функціонування багатьох споживачів електроенергії, зокрема радіоелектронних пристроїв, обчислювальної техніки, електронної медичної апаратури. На сьогоднішній день в Україні майже відсутній контроль за якістю електроенергії та не виконуються заходи, спрямовані на підвищення якості до рівня встановлених норм. У країнах Західної Європи, США, Канаді та інших розвинених країнах, при значно кращій ситуації з якістю електроенергії, рішення цієї проблеми, проте, приділяється значна увага.

Вирішенню задач поліпшення якості електроенергії мережі живлення присвячені роботи відомих вчених Буткевича О.Ф., Волкова І.В., Денисова О.І., Долбні В.Т., Жаркіна А.Ф., Жежеленко І.В., Жемерова Г.Г., Жуйкова В.Я., Кириленка О.В., Ковальова Ф.І., Кузнецова В.Г., Липківського К.О., Півняка Г.Г., Резцова В.Ф., Розанова Ю.К., Сокола Є.І., Стахіва П.Г., Стогнія Б.С., Федія В.С., Харитонова С.О., Чиженко І.М., Шидловського А.К., Щербака Я.В., Щерби А.А., Юрченко М.М., у яких сформульовані основні принципи і підходи до рішення проблеми якості електроенергії мережі живлення. Разом з тим, як правило, проблема якості вирішувалася для конкретного джерела спотворень із застосуванням спеціалізованих пристроїв. Створення багатофункціональних фільтрокомпенсуючих пристроїв дозволяє реалізувати комплексний підхід до рішення проблеми підвищення якості електроенергії мережі живлення і відповідності її стандартам. Методи і структури силових пристроїв, що розробляються за рубежом і в Україні, принципово вирішують ідею багатофункціональності. Однак рішення всього комплексу проблем одним силовим блоком призводить до погіршення енергетичних параметрів таких пристроїв і створює додаткові складнощі при їх технічній реалізації. Перспективним напрямком є розробка силової схеми, що виконана за m-канальною структурою і розподілом функцій контролю за величиною окремих параметрів мережі живлення і їх корекцій по окремих каналах. Створення подібних силових схем спричиняє необхідність аналізу їх статичних і динамічних характеристик, розробки методів розрахунку параметрів якості

електроенергії в реальному режимі часу, розробки структур систем керування й регулювання і алгоритмів функціонування мікропроцесорних систем.

Таким чином, актуальним є завдання створення ефективних з точки зору енергетичних показників і функціональних можливостей силових схем, алгоритмів керування ними, аналіз показників якості електроенергії в мережах з багатофункціональними пристроями з використанням математичних і фізичних моделей, розробка критеріїв вибору параметрів силових схем і систем керування й регулювання, вирішенню якого присвячена дисертаційна робота.

**Зв'язок роботи з науковими програмами й планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі промислової та біомедичної електроніки НТУ «ХПІ» відповідно до програми Міністерства освіти і науки України, напрямок 04 «Екологічно чиста енергетика і ресурсозберігаючі технології». Здобувач був відповідальним виконавцем НДР МОН України: «Розробка теоретичних основ і дослідження компенсованих керування випрямлячів» (№ДР 0103U001542), «Поліпшення електромагнітної сумісності напівпровідникових перетворювачів електроенергії засобами мікропроцесорного керування» (№ДР 0198U005686), «Розробка й дослідження методів підвищення швидкодії мікропроцесорних контролерів для систем керування напівпровідниковими перетворювачами» (№ДР 0194U044250), спільного українсько-польського проекту «Розробка й дослідження активних енергетичних фільтрів для поліпшення якості електричної енергії» (№ДР 0101U005264), госпдоговірної НДР «Пряме мікропроцесорне керування випрямлячем за обчислювальним прогнозом» (АТ «Елтехком, м. Харків). Як науковий керівник здобувач очолював виконання госпдоговірної НДР «Перетворювач постійної напруги в змінну» (ХДПЗ ім. Т.Г. Шевченко, м. Харків).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка теоретичних положень створення енергоефективного перетворювача для компенсації неактивних складових повної потужності і пристроїв керування ним на основі сучасних теорій потужності, за принципом двоканальної структури силової схеми, системи керування цифрового типу, що реалізує ідеї керування за прогнозом.

Поставлена мета вимагає рішення наступних наукових завдань:

- системний аналіз джерел спотворення параметрів мережі живлення, методів і підходів кількісної і якісної оцінки якості електроенергії мережі живлення;
- розвиток теорій потужності, систематизація способів компенсації неактивних складових повної потужності і пристроїв керування компенсаторами неактивних складових повної потужності;

- розробка теоретичних положень побудови компенсатора неактивних складових повної потужності із двоканальною структурою силової схеми, критеріїв розрахунку параметрів силової схеми пристрою;
- розробка і розвиток теоретичних положень створення мікропроцесорних систем керування компенсатором неактивних складових повної потужності із двоканальною структурою силової схеми;
- розробка й практична реалізація структури системи керування й алгоритмів керування компенсатором неактивних складових повної потужності.

*Об'єктом дослідження* є напівпровідникові перетворювальні пристрої підвищення якості електричної енергії та поліпшення електромагнітної сумісності споживачів електричної енергії з мережею живлення.

*Предметом дослідження* є способи і алгоритми компенсації неактивних складових повної потужності, що споживається або генерується навантаженням у мережу живлення.

*Методи дослідження.* Всі теоретичні положення дисертації побудовані на фундаментальній теорії напівпровідникових перетворювачів електроенергії. Для аналізу електромагнітних процесів і розробки концепції мікропроцесорного керування на основі прогнозу по моделі об'єкта використаний операторно-рекуррентний метод аналізу і синтезу електричних кіл. Для аналізу гармонійного складу струму мережі живлення і його залежності від параметрів елементів силової схеми компенсатора неактивних складових повної потужності використане розкладання в ряд Фур'є. Метод узагальненого вектора і перетворення Кларка використані для аналізу неактивних складових повної потужності, що споживається навантаженням з мережі живлення. Для розрахунку й аналізу характеристик компенсатора неактивних складових повної потужності із двоканальною структурою силової схеми використані методи рішення диференціальних і алгебраїчних рівнянь. Методи математичного й фізичного моделювання використані для визначення параметрів компенсатора неактивних складових повної потужності із двоканальною структурою силової схеми.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному:

- отримало подальший розвиток теоретичне обґрунтування теорій потужності, методів і підходів кількісної і якісної оцінки якості електроенергії мережі живлення, джерел спотворення параметрів електричної енергії мережі живлення;
- вперше розроблено теоретичні положення і критерії розрахунку параметрів силової схеми компенсатора неактивних складових повної потужності із двоканальною стру-

ктурою силової схеми, які дозволяють реалізувати комплексний підхід до вирішення проблеми якості електроенергії мережі живлення;

- вперше запропоновано двоканальну структуру енергоефективного компенсатора неактивних складових повної потужності, яка споживається або генерується у мережу навантаженням, що дозволяє мінімізувати втрати потужності;

- створені нові теоретичні положення побудови мікропроцесорних систем керування компенсаторами неактивних складових повної потужності із двоканальною структурою силової схеми, які дозволяють забезпечити високі динамічні характеристики компенсатора;

- запропоновані перспективні структури систем керування компенсаторами неактивних складових повної потужності з двоканальною структурою силової схеми, що забезпечують одночасне керування низькочастотним та високочастотним каналами з використанням одного обчислювача.

**Практичне значення одержаних результатів** в галузі напівпровідникових пристроїв підвищення якості електроенергії та поліпшення електромагнітної сумісності споживачів електроенергії з мережею живлення полягає в тому, що запропоновано способи і алгоритми керування компенсатором неактивних складових повної потужності із двоканальною структурою силової схеми, що забезпечують високі динамічні показники пристрою, високу точність регулювання необхідних параметрів електроенергії живильної мережі в точці підключення компенсатора, забезпечують керування з урахуванням мінімізації окремих параметрів, що регулюються. Розроблено критерії для практичних розрахунків параметрів силової схеми компенсатора неактивних складових повної потужності із двоканальною структурою силової схеми, структури систем керування й регулювання.

Отримані результати є закінченими для використання на етапі проектування при розрахунку параметрів силової схеми компенсатора неактивних складових повної потужності, розробці структури системи керування й регулювання, створенні алгоритмів керування в реальному масштабі часу і їх програмної реалізації.

Результати роботи знайшли практичне застосування при створенні ряду конкретних пристроїв поліпшення якості електроенергії живильної мережі: аналого-цифрової системи керування компенсатором неактивних складових повної потужності з контуром регулювання коефіцієнта гармонік струму мережі в ДП НДІ ХЕМЗ (м. Харків); алгоритмів і програм керування двоканальним компенсатором неактивних складових повної потужності в АТ «Елтехком» (м. Харків); мікропроцесорної системи керування компенсатором неактивних складових повної потужності за прогнозом струму навантаження низькочас-

тотного каналу в НВП «Еос» (м. Харків). У навчальному процесі на кафедрі промислової та біомедичної електроніки НТУ «ХПІ» використовується експериментальний фільтро-компенсуючий пристрій, методики розрахунку параметрів силової схеми перетворювача, структури систем керування, критерії вибору параметрів компенсатора та алгоритми керування.

**Особистий внесок здобувача.** Всі положення, виводи і рекомендації, що викладені в дисертації, належать особисто здобувачу. Серед них: теоретичні основи побудови мікропроцесорних систем керування прогнозного типу, алгоритми й програмне забезпечення; система компенсації неактивних складових повної потужності з двоканальною структурою; критерії вибору та розрахунку параметрів високочастотного та низькочастотного каналів компенсатора; розвинені положення теорій потужності і запропоновані шляхи їх використання в системах компенсації неактивних складових повної потужності; структури систем керування пристроями перетворення електроенергії; методика розрахунку та зменшення втрат у напівпровідникових перетворювачах електроенергії; методика керування за прогнозом струму випрямлячем з активно-індуктивним навантаженням.

**Апробація результатів дисертації.** Наукові та практичні результати, отримані в дисертації, обговорювалися на: міжнародній науково-технічній конференції «Силовая електроніка і енергоефективність» (м. Алушта, 1998-2006 рр.); міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної електротехніки» (м. Київ, 2000, 2002, 2004, 2006 рр.); міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електроприводу» (м. Харків, 1994, 2003-2005 рр.); міжнародній науково-технічній конференції «Силовая електроніка у вирішенні проблем ресурсо- та енергозбереження» (м. Харків, 1993 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Комп'ютер: наука, техніка, технологія, здоров'я» (м. Харків, 1993-1995 рр.); міжнародній науково-технічній конференції «International Power Electronic & Motion Control Conference» (м. Будапешт, 1996 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Unconventional electromechanical and electrical system» (м. Щецин, 1997 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Ефективність і якість електропостачання промислових підприємств» (м. Маріуполь, 2005 р.); науковому семінарі «Силовая та біомедична електроніка» секції «Перетворення параметрів електричної енергії» Наукової Ради НАН України з комплексної проблеми «Наукові основи електроенергетики» (м. Харків, 1998-2007 рр.).

**Публікації.** Результати дисертації опубліковані в 32 наукових працях, з них: 22 статті у наукових фахових виданнях України, 1 деклараційний патент на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертація складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і 4 додатків. Повний обсяг роботи складає

299 сторінок, з них 5 ілюстрацій на 5 сторінках, 98 ілюстрацій по тексту, 1 таблиця на 1 сторінці, 6 таблиць по тексту, 4 додатки на 39 сторінках, 156 найменувань використаних літературних джерел на 17 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовані актуальність і доцільність виконаної роботи, сформульовані мета і завдання наукового дослідження, наведені дані про зв'язок роботи з науковими програмами, викладена наукова новизна, практичне значення і реалізація результатів дисертації, наведені дані про їх апробацію й публікацію.

У першому розділі розглянуті питання кількісної і якісної оцінки параметрів електроенергії живильної мережі. Міжнародні стандарти МЕК-868, МЕК 1000-3-2, МЕК 1000-3-3, МЕК 1000-4-1 і аналог країн СНД – ГОСТ 13109-97 установлюють норми якості електричної енергії і методи їх виміру. ГОСТ 13109-97 визначає показники якості електричної енергії і їх числових норм в електричних мережах систем електропостачання загального призначення змінного трифазного і однофазного струму частотою 50 Гц у точках загального приєднання (ТЗП).

Крім перерахованих стандартів на якість електричної енергії в мережах загального користування, стандартизовані вимоги до якості електричної енергії власне у вентильних перетворювачах, агрегатах безперебійного живлення, у системах електропостачання транспортних засобів: літаків, морських і річкових судів, автомобілів, електропоїздів, а також у системах електроживлення пристроїв зв'язку, обчислювальної техніки.

Міжнародні стандарти якості електроенергії (наприклад IEEE 519-1992) обмежують не тільки гармонійний склад напруги живлення, але й споживаного струму. При цьому основним фактором оцінки є інтегральний показник гармонійного складу струму  $THD \%$

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n I_i^2}}{I_1}, \quad (1)$$

де  $I_i$ ,  $I_1$  – струми  $i$ -их і першої гармонік.

Погіршення якості електроенергії відбувається в процесі її передачі та споживання в результаті впливу електричних приймачів. Численні дослідження свідчать, що в 70% ви-



падків на якість електричної енергії впливають споживачі електроенергії і тільки в 30% випадків - виробники електроенергії. Вирішуючи питання підвищення якості електроенергії варто враховувати основні причини, що впливають на значення показників якості електроенергії як з боку джерела електроенергії, так і з боку споживачів. У виразах для розрахунку показників якості електроенергії і рівня електромагнітної сумісності споживачів з мережею живлення використовуються поняття складових повної потужності. Цим проблемам присвячені роботи С.І. Vudeanu, S. Fryze, О.О. Маєвського, Я.Ю. Солодухо, В.Є. Тонкаля, Г.С. Зинов'єва. Подальший розвиток теорії потужності одержали у 80-х роках минулого сторіччя в роботах Н. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae. Основою для цього стала жорсткість вимог до електромагнітної сумісності споживачів електроенергії з живильною мережею, розвиток елементної бази силової електроніки і, як наслідок, поява нових прогресивних схемотехнічних рішень в галузі силової електроніки. До останніх відносяться активні керовані випрямлячі, силові активні фільтри, перетворювачі з одиничним коефіцієнтом потужності. Жорсткість вимог до якості електропостачання знайшла відбиття в міжнародних стандартах і створила потребу в напівпровідникових компенсаторах неактивних складових повної потужності нового типу.

При визначенні миттєвих активної й реактивної потужностей у сучасних теоріях потужності використані наступні умови: розглядаються тільки трифазні системи електропостачання; при цьому однофазна система є граничним випадком розсиметрованої багатofазної системи з нескінченно великими опорами навантаження у всіх фазах, крім однієї; миттєва активна і реактивна потужності визначаються через результуючі вектори напруги  $\vec{u}_s$  й струму  $\vec{i}_s$  в площині або в тривимірному просторі; координати просторового результуючого вектора напруги  $\vec{u}_s$  однозначно визначаються миттєвими значеннями фазних напруг системи, а координати просторового вектора струму  $\vec{i}_s$  – миттєвими значеннями фазних струмів навантаження. Миттєва активна потужність із урахуванням зазначених умов дорівнює скалярному добутку просторових векторів напруги і струмів. Миттєва реактивна потужність визначається як модуль векторного добутку просторових векторів напруги і струмів.

Миттєвий коефіцієнт потужності дорівнює

$$\lambda = \frac{P}{\sqrt{P^2 + p_{\sim}^2 + q^2}}, \quad (2)$$

де  $p_{\sim}$  - змінна складова активної потужності.

Миттєвий коефіцієнт потужності дорівнює одиниці, якщо дорівнюють нулю реактивна  $q$  й змінна складова активної  $p_{\sim}$  потужності. Ця умова може виконуватися тільки в багатозначних системах, в однофазній системі електропостачання умова нездійсненна.

У табл.1 наведені варіанти сполучення характеристик напруг живильної мережі і навантаження в трифазній системі електропостачання. Номери варіантів позначені двозначним числом, у якому перша цифра дорівнює номеру рядка, а друга - номеру стовпця в табл.1. У більшості варіантів сполучень параметрів просторові вектори  $\vec{u}_s$  й  $\vec{i}_s$  утворюють між собою деякий кут, що змінюється у часі, внаслідок чого в системі присутні як постійні, так і змінні складові активних і реактивних потужностей. Особливі осередки в табл.1 відповідають трьом випадкам: постійному збігу напрямків векторів  $\vec{u}_s$  і  $\vec{i}_s$ ; чисто реактивному навантаженню; повній симетрії напруг мережі і струмів навантаження. У першому випадку тотожно дорівнює нулю миттєва реактивна потужність - варіанти 11, 21, 31, 41; у другому - дорівнює нулю середня активна потужність - варіанти 12, 22, 32, 42, 16, 26, 36, 46; у третьому - відсутні пульсації як миттєвої активної, так і миттєвої реактивної потужності - варіанти 11, 12, 13 у табл.1. У трифазній системі із симетричними напругами мережі несиметрія навантаження призводить до пульсацій миттєвих значень активних і реактивних потужностей, а також до виникнення реактивної потужності в колі із чисто активним навантаженням і миттєвої активної потужності в колі із чисто реактивним навантаженням. У трифазній системі з несиметричними напругами мережі й симетричним навантаженням виникають пульсації активної потужності в схемі із чисто активним навантаженням, миттєва активна потужність у колі з реактивним навантаженням, а також пульсації миттєвої активної потужності і миттєвої реактивної потужності. Амплітуди змінних складових активних і реактивних потужностей пропорційні коефіцієнту несиметрії за нульовою послідовністю.

Найпоширеніші теорії потужності та їхнє співставлення докладно розглянуто в першому розділі.

Таблиця 1

**Варіанти сполучень характеристик напруг живильної мережі й навантаження в трифазній системі електропостачання**

Навантаження	Лінійне			Нелінійне змішане
	Резистивне	Реактивне	Змішане	

Напруга мережі			Симетричне			
Синусоїдальна	Симетрична	1	$p=P \quad q=0$ $\lambda=1$	$p=0 \quad q=Q$ $\lambda=0$	$p=P \quad q=Q$ $\lambda=\cos\varphi$	$p=P+p_{\sim} \quad q=Q+q_{\sim}$ $0<\lambda<1$
	Несиметрична	2	$p=P+p_{\sim}$ $q=0$ $\lambda<1$	$p=p_{\sim} \quad P=0$ $q=Q+q_{\sim}$ $\lambda=0$	$p=P+p_{\sim}$ $q=Q+q_{\sim}$ $0<\lambda<1$	$p=P+p_{\sim}$ $q=Q+q_{\sim}$ $0<\lambda<1$
Несинусоїдальна	Симетрична	3	$p=P+p_{\sim}$ $q=0$ $\lambda<1$	$p=p_{\sim} \quad P=0$ $q=Q+q_{\sim}$ $\lambda=0$	$p=P+p_{\sim}$ $q=Q+q_{\sim}$ $0<\lambda<1$	$p=P+p_{\sim}$ $q=Q+q_{\sim}$ $0<\lambda<1$
	Несиметрична	4	$p=P+p_{\sim}$ $q=0$ $\lambda<1$	$p=p_{\sim} \quad P=0$ $q=Q+q_{\sim}$ $\lambda=0$	$p=P+p_{\sim}$ $q=Q+q_{\sim}$ $0<\lambda<1$	$p=P+p_{\sim}$ $q=Q+q_{\sim}$ $0<\lambda<1$
			1	2	3	4
			Несиметричне			
Синусоїдальна	Симетрична	1	$p=P+p_{\sim}$ $q=Q+q_{\sim}$ $0<\lambda<1$	$p=p_{\sim} \quad P=0$ $q=Q+q_{\sim}$ $\lambda=0$	$p=P+p_{\sim}$ $q=Q+q_{\sim}$ $0<\lambda<1$	$p=P+p_{\sim}$ $q=Q+q_{\sim}$ $0<\lambda<1$
	Несиметрична	2	$p=P+p_{\sim}$ $q=Q+q_{\sim}$ $0<\lambda<1$	$p=p_{\sim} \quad P=0$ $q=Q+q_{\sim}$ $\lambda=0$	$p=P+p_{\sim}$ $q=Q+q_{\sim}$ $0<\lambda<1$	$p=P+p_{\sim}$ $q=Q+q_{\sim}$ $0<\lambda<1$
Несинусоїдальна	Симетрична	3	$p=P+p_{\sim}$ $q=Q+q_{\sim}$ $0<\lambda<1$	$p=p_{\sim} \quad P=0$ $q=Q+q_{\sim}$ $\lambda=0$	$p=P+p_{\sim}$ $q=Q+q_{\sim}$ $0<\lambda<1$	$p=P+p_{\sim}$ $q=Q+q_{\sim}$ $0<\lambda<1$
	Несиметрична	4	$p=P+p_{\sim}$ $q=Q+q_{\sim}$ $0<\lambda<1$	$p=p_{\sim} \quad P=0$ $q=Q+q_{\sim}$ $\lambda=0$	$p=P+p_{\sim}$ $q=Q+q_{\sim}$ $0<\lambda<1$	$p=P+p_{\sim}$ $q=Q+q_{\sim}$ $0<\lambda<1$
			5	6	7	8

У другому розділі виконано аналіз способів і пристроїв компенсації неактивних складових повної потужності. Показано доцільність використання пристроїв корекції якос-

ті або регуляторів одного або декількох показників якості електроенергії або пов'язаних з ними параметрів споживаної потужності. Компенсацію реактивних навантажень можна віднести до найбільш ефективних енергозберігаючих технологій в електричних мережах споживачів і енергосистем.

Залежно від місця підключення розрізняють такі види компенсації: загальна - на вводі підприємства або структурного підрозділу; групова - на лінії групи однотипних електроспоживачів; індивідуальна - у безпосередній близькості від електроспоживача. Для більшості джерел реактивної потужності (ДРП) характерною є залежність питомих втрат активної потужності від режиму роботи. Розглянуто головні технічні вимоги, які пред'являються до сучасних ДРП - плавність регулювання потужності, можливість роботи з номінальною потужністю в обох режимах (споживання й генерування) і плавним переходом з одного режиму в інший, малий рівень гармонік у кривій струму мережі, малі питомі втрати активної потужності. До спеціальних ДРП, крім зазначених, пред'являється ряд додаткових вимог: висока швидкодія в обох режимах, можливість пофазного регулювання (з незалежним регулюванням величини і знака потужності в кожній фазі), нечутливість до наявності вищих гармонік мережі й ін.

Виконано аналіз способів і пристроїв поліпшення гармонійного складу напруги і струму мережі живлення. Показано ефективність рішення проблеми фільтрації вищих гармонік мережі живлення з використанням активної фільтрації (компенсації) вищих гармонік струму або напруги із застосуванням додаткового джерела енергії для одержання сигналу, що компенсує, у вигляді струму або напруги. Зниження спотворень досягається шляхом подачі в електричне коло сигналу, рівного їм за значенням, але спрямованого в протифазі, тобто компенсація додатковим сигналом діючого спотворення. Наведено особливості послідовних і паралельних активних фільтрів. Послідовний використовується для фільтрації несинусоїдальної напруги, паралельний - для фільтрації несинусоїдального струму.

Розглянуто способи і пристрої компенсації несиметрії живильної мережі. Виконано аналіз джерел несиметрії напруги в електричних мережах промислових підприємств і низьковольтних розподільних мереж загального призначення. У загальному випадку несиметричне навантаження може бути як багатофазним, так і однофазним. Однак найбільш характерна однофазна несиметрія, оскільки будь-яку багатофазну можна розкласти на еквівалентне симетричне багатофазне й однофазне навантаження. Зниження несиметрії напруг доцільно навіть тоді, коли вона перебуває в припустимих межах, тому що при цьому зменшуються втрати в електричних мережах і електроспоживачах. Показано перспективність використання в якості симетруючих пристроїв - пристроїв, що створюють у системі елект-

ропостачання пульсуючу потужність, рівну за величиною й протилежну по фазі пульсуючій потужності, що обумовлена несиметричним навантаженням.

Перспективним напрямком є створення багатофункціональних пристроїв, що виконують функції компенсатора несиметрії мережі живлення, фільтра вищих гармонік і компенсатора реактивної потужності.

Виконано аналіз систем керування пристроями компенсації неактивних складових повної потужності. Ефективність роботи пристроїв компенсації неактивних складових повної потужності багато в чому визначається точністю формування керуючих впливів, що залежить від спотворення форми напруги мережі живлення і швидкодії блоків системи керування, що реалізують математичні операції.

**Третій розділ** присвячений аналізу особливостей функціонування і основних характеристик компенсатора неактивних складових повної потужності двоканальної структури, що наведена на рис.1. Низькочастотний канал представлений одно або двомостовим випрямлячем і призначений для компенсації середньої реактивної потужності мережі живлення. Оскільки міст на повністю керованих (GTO) тиристорах  $V_{G}$  може працювати як з випереджальними (негативними), так і з відстаючими (позитивними) кутами керування, міст на одноопераційних тиристорах  $V_{T}$  можна виключити зі схеми, а його функції покласти на міст на GTO тиристорах. Ціною такого спрощення є деяке зниження к.к.д. компенсатора в режимі споживання реактивної потужності з мережі. Реактивна потужність на вході компенсатора дорівнює реактивній потужності мережі в точці його підключення і має протилежний знак. Високочастотний канал виконаний на основі інвертора напруги і призначений для компенсації неактивних складових миттєвої потужності мережі живлення (фільтрації вищих гармонік мережі живлення, симетрування струмів у фазах трифазного кола, компенсації струмів нульової послідовності).

Рис.1. Структура компенсатора неактивних складових повної потужності

Описана структура силової схеми забезпечує підтримку на заданому рівні регульованих параметрів у точці підключення компенсатора до живильної мережі й у такий спосіб вирішує проблему електромагнітної сумісності одного або групи споживачів з живильною мережею. Активні втрати в силовій схемі мінімізуються завдяки, з однієї сторони, відсутності широтно-імпульсної модуляції при керуванні тиристорними мостами і, з іншої сторони, роботі інвертора напруги зі струмами, значно меншими номінальних струмів мережі живлення.

Високочастотний канал (інвертор напруги із частотами комутації вище 10 кГц) і низькочастотний канал (випрямляч із частотою комутації 50 Гц) мають один загальний еле-

мент – ємнісний накопичувач. Комутація струму в  $ВГ_G$  здійснюється під дією напруги накопичувача  $U_C$ , більшої ніж амплітуда лінійної напруги вторинної обмотки трансформатора Т1. Комутація струму у вентильному мосту на тиристорах  $ВГ_T$  відбувається під дією напруги мережі. За умови повної передачі енергії, накопиченої в індуктивності  $L$  фази, що виключається, у конденсатор, одержано залежність величини кута комутації від напруги на конденсаторі

$$\gamma_G = \frac{LI_d\omega}{U_C}. \quad (3)$$

Сімейство залежностей  $\gamma_G = f(U_C)$  наведене на рис. 2 для випадку  $L1 > L2 > L3$ .

$\gamma_G$

Рис.2. Залежність кута комутації від напруги на конденсаторі накопичувача

Амплітуда імпульсу комутаційної перенапруги залежить від кута комутації відповідно до виразу

$$U_{кн} = \frac{LI_d\omega}{\gamma_G} - E_{ам}. \quad U_C^* \quad (4)$$

Сімейство залежностей  $U_{кн} = f(\gamma_G)$  наведене на рис. 3 для випадку  $L1 > L2 > L3$ .

$U_{кн}^*$

Рис.3. Залежність амплітуди імпульсу комутаційної перенапруги від кута комутації

Миттєве значення фазного струму мережі низькочастотного каналу визначається або миттєвим значенням струму мосту на одноопераційних тиристорах, або миттєвим значенням струму мосту на повністю керованих тиристорах:

$$\begin{aligned} i_N &= i_T, \text{ при } \alpha = \alpha_T, \\ i_N &= i_G, \text{ при } \alpha = \alpha_G, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $i_T, i_G$  – відповідно миттєві значення мережних фазних струмів мостів на одноопераційних ( $ВГ_T$ ) і повністю керованих ( $ВГ_G$ ) тиристорах (див. рис. 1).

Аналітичні вирази (3), (6) і (7) дозволяють проаналізувати залежність амплітуд вищих гармонік мережевого струму від напруги на ємнісному накопичувачі:

$$I_{Gn} = \sqrt{A_{Gn}^2 + B_{Gn}^2} \quad \text{або} \quad I_{Tn} = \sqrt{A_{Tn}^2 + B_{Tn}^2}, \quad (6)$$

$$\text{де:} \quad A_{Gn} = \frac{U_a}{\sqrt{3}\omega L} \frac{\sin \frac{\pi n}{3}}{\frac{\pi n}{3}} F_{GA}(n), \quad B_{Gn} = -\frac{U_a}{\sqrt{3}\omega L} \frac{\sin \frac{\pi n}{3}}{\frac{\pi n}{3}} F_{GB}(n),$$

$$A_{Tn} = \frac{U_a}{\sqrt{3}\omega L} \frac{\sin \frac{\pi n}{3}}{\frac{\pi n}{3}} F_{TA}(n), \quad B_{Tn} = -\frac{U_a}{\sqrt{3}\omega L} \frac{\sin \frac{\pi n}{3}}{\frac{\pi n}{3}} F_{TB}(n),$$

$$F_{GA}(n) = \frac{\sin((n+1)\frac{\gamma_G}{2})}{n+1} \sin((n+1)(-\alpha + \frac{\gamma_G}{2})) - \frac{\sin((n-1)\frac{\gamma_G}{2})}{n-1} \sin((n-1)(-\alpha + \frac{\gamma_G}{2})), \quad (7)$$

$$F_{GB}(n) = \frac{\sin((n+1)\frac{\gamma_G}{2})}{n+1} \cos((n+1)(-\alpha + \frac{\gamma_G}{2})) - \frac{\sin((n-1)\frac{\gamma_G}{2})}{n-1} \cos((n-1)(-\alpha + \frac{\gamma_G}{2})),$$

$$F_{TA}(n) = \frac{\sin((n+1)\frac{\gamma_T}{2})}{n+1} \sin((n+1)(\alpha + \frac{\gamma_T}{2})) - \frac{\sin((n-1)\frac{\gamma_T}{2})}{n-1} \sin((n-1)(\alpha + \frac{\gamma_T}{2})),$$

$$F_{TB}(n) = \frac{\sin((n+1)\frac{\gamma_T}{2})}{n+1} \cos((n+1)(\alpha + \frac{\gamma_T}{2})) - \frac{\sin((n-1)\frac{\gamma_T}{2})}{n-1} \cos((n-1)(\alpha + \frac{\gamma_T}{2})).$$

Графічні залежності, що відповідають отриманим аналітичним виразам, наведені на рис. 4 для гармонік з номерами 5,7. Аналіз графічних залежностей дозволяє зробити висновок про наявність діапазону значень напруги на конденсаторі накопичувача, при якому відбувається збільшення величин окремих гармонік а, отже, і коефіцієнта гармонік мережевого струму, що необхідно враховувати при виборі величини напруги на конденсаторі накопичувача.

n=5

n=7

 $I_{Gn}$  $I_{Gn}$

Рис.4. Залежність амплітуд вищих гармонік мережевого струму від напруги на конденсаторі накопичувача

Відповідно до (5) з урахуванням (6), (7) і (3), припустимий рівень вищих гармонік струму живильної мережі визначає вимоги до номінальної напруги на конденсаторі  $C$ . Якість фільтрації визначається ступенем відповідності струму, що генерується інвертором, струму завдання. При нерівності миттєвих значень струмів завдання і інвертора в струмі мережі живлення залишаються не скомпенсованими різницевої складові  $i$ , форма яких наведена на рис.5.

Параметром, величина якого впливає на якість роботи інвертора і, отже, на гармонійний склад струму живильної мережі, є максимальна швидкість зміни струму живильної мережі. Збільшення швидкості зростання не скомпенсованої імпульсної складової струму мережі призводить до розширення гармонійного складу струму і, як наслідок, до збільшення коефіцієнта гармонік.

Рис.5. Реакція високочастотного каналу на задане значення струму

Ефективна фільтрація вищих гармонік може бути виконана за умови забезпечення необхідної швидкості зміни струму високочастотного каналу.

Контур протікання струму, що компенсує, високочастотного каналу наведений на рис. 6. Наявність у струмі мережі складових із близької до трикутної формою при роботі низькочастотного каналу компенсатора пов'язане з появою комутаційних імпульсів, амплітуда яких розраховується за допомогою рівняння (4). Електромагнітні процеси в силовій схемі високочастотного каналу описуються системою рівнянь:

$$\begin{cases} e_1(t) - e_2(t) + L_2 \frac{di_2}{dt} - L_1 \frac{di_1}{dt} - u_C = 0, \\ C \frac{du_C}{dt} = i_1. \end{cases} \quad (8)$$



Рис.6. Контур протікання струму, що компенсує, високочастотного каналу

На інтервалі безперервності структури інвертора високочастотного каналу з припущенням про сталість напруги на конденсаторі  $C$  та рівності її  $U_C$  система (8) здобуває вид

$$\frac{di_2}{dt}(L_1 + L_2) = U_C - u_N, \quad (9)$$

де  $u_N = E_{am2} \sin(\omega t + \psi)$  – миттєве значення лінійної напруги вентильних обмоток трансформатора високочастотного каналу Т2 (див. рис.1).

Напруга на конденсаторі  $C$ , яка необхідна для ефективної фільтрації гармонік, обумовлених комутаційною складовою струму мережі

$$U_C = E_{am2} + \frac{L_{T2}}{L_{T1}} \left( \frac{L_{T1} I_d \omega}{2\gamma_G} - E_{am1} \right). \quad (10)$$

Таким чином, згідно до виразу (10), величина напруги на конденсаторі  $C$  двоканального компенсатора неактивних складових повної потужності залежить від співвідношення індуктивностей силових кіл низькочастотного і високочастотного каналів і величин напруг на вторинних обмотках силових трансформаторів Т1 і Т2 (див. рис.1).

Втрати в ключах високочастотного каналу мають дві складові: статичну  $P_{st}$  і динамічну  $P_D$ . Динамічні втрати складаються із втрат на вмикання  $P_{on}$  і вимикання  $P_{off}$ . Втрати на вмикання визначаються як

$$P_{on} = Uf \left( Q_{rr} + \frac{I_c^2}{2 \frac{U_C - E_{am2}}{L_{T2}}} + I_c \sqrt{\frac{2Q_{rr}}{\frac{U_C - E_{am2}}{L_{T2}}}} \right). \quad (11)$$

Потужність статичних втрат і втрат при вимиканні силових ключів ( $P_{off}$ ) пропорційні середньому струму через транзистори.

Залежність відносної потужності динамічних втрат від відносної напруги на конденсаторі  $C$  наведена на рис.7. Величини втрат та напруг обраховані по відношенню до величини неактивної потужності, що компенсується, та напруги на вторинній обмотці трансформатора низькочастотного каналу відповідно.

$$P_D^*$$

$$U_C^*$$

Рис.7. Залежність потужності втрат від напруги на конденсаторі С

Втрати в низькочастотному каналі складаються із втрат у силових ключах (тиристорах), втрат у трансформаторі, втрат у кабелях сполучень [5]. Втрати в ключах  $P_k$  визначаються типом силових ключів. При використанні одноопераційних або GTO тиристорів втрати в ключах за час роботи компенсатора  $T = t_T + t_G$  залежать від тривалості роботи в режимах генерації  $t_G$  або споживання  $t_T$  і визначаються як

$$P_k = I_d (\Delta U_{kT} \frac{t_T}{T} + \Delta U_{kG} \frac{t_G}{T}). \quad (12)$$

Коефіцієнти  $\frac{t_G}{T}$  й  $\frac{t_T}{T}$  ураховують відносний час роботи мостів низькочастотного каналу.

Сумарні втрати активної потужності низькочастотного каналу пропорційні струму реактора  $L_d$  (див. рис. 1)  $I_d$  і, отже, пропорційні величині реактивної потужності, що компенсується

$$P_{\Sigma} = (\frac{I_d}{I_{dH}})^2 P_k + I_d^2 R_d + I_d (\Delta U_{kT} \frac{t_T}{T} + \Delta U_{kG} \frac{t_G}{T}) + 2\sqrt{6}\rho l I_d j + P_0. \quad (13)$$

Сумарні втрати у двоканальному компенсаторі неактивних складових повної потужності визначаються відповідно до виразу

$$P_{\Sigma} = (\frac{I_d}{I_{dH}})^2 P_k + I_d^2 R_d + I_d (\Delta U_{kT} \frac{t_T}{T} + \Delta U_{kG} \frac{t_G}{T}) + 2\sqrt{6}\rho l I_d j + P_0 + P_{st} + P_{on} + P_{off}. \quad (14)$$

Оцінку енергоефективності компенсатора із двоканальною структурою можна виконати як залежність потужності втрат від величини реактивної потужності, що компенсується. У наведеному вище виразі потужність втрат включає складові, що не залежать від величини компенсуємої середньої реактивної потужності і залежні від величини компенсуємої середньої реактивної потужності. Залежність величини втрат від рівня компенсуємої середньої реактивної потужності можна визначити відповідно до виразу

$$P_Q = P_{const} + (\frac{Q}{U_{d0}})^2 R_d + \frac{Q}{U_{d0}} (\Delta U_{kT} \frac{t_T}{T} + \Delta U_{kG} \frac{t_G}{T}) + 2\sqrt{6}\rho l \frac{Q}{U_{d0}} j. \quad (15)$$

Побудована відповідно до виразу (15) залежність наведена на рис.8, де величини втрат обраховані по відношенню до величини неактивної потужності, що компенсується.

Рис.8. Залежність втрат у компенсаторі від напруги на реакторі  $L_d$  низькочастотного каналу компенсатора

Для зменшення активних втрат необхідно збільшувати напругу  $U_{d0}$  на реакторі  $L_d$  низькочастотного каналу компенсатора (див. рис. 1).

**Четвертий розділ** присвячений розробці структури системи керування й алгоритмів керування компенсатором неактивних складових повної потужності. Існуючі способи керування напівпровідниковими перетворювачами можна розділити на три групи: аналогове керування, аналого-цифрове керування і цифрове керування.

Структура аналого-цифрової системи керування компенсатором наведена на рис. 9. Сигнал датчика струму мережі ДС 1-3 несе інформацію про величини миттєвих сумарних значень активної й неактивної потужності навантаження і компенсатора неактивних складових. Завдання компенсатора полягає в підтримці близького до нуля значення середньої реактивної потужності, а також у компенсації миттєвих складових неактивної потужності, зокрема компенсації вищих гармонік мережевого струму і підтримці форми мережевого струму, близької до синусоїди та компенсації несиметрії фазних струмів навантаження. Сигнали з виходу датчика напруги мережі ДН 1-3 і датчика струму мережі ДС 1-3 надходять до входів блоку цифрової обробки (БЦО), у якому здійснюється перетворення напруги й струму мережі з координат  $a, b, c$  у координати  $\alpha, \beta$ . До третього входу БЦО надходить сигнал  $P_C$ , пропорційний потужності, що поступає до накопичувача. У БЦО здійснюється розрахунок сигналів завдання миттєвих значень фазних струмів інвертора напруги

$$\begin{bmatrix} i_{Fa} \\ i_{Fb} \\ i_{Fc} \end{bmatrix} = \frac{2}{3(u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2)} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\alpha} & u_{\beta} \\ u_{\beta} & -u_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} + P_C \\ \tilde{q} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Рис.9. Структура аналого-цифрової системи керування компенсатором на основі р-q або р-q-г теорій потужності

Завдання по струмах інвертора високочастотного каналу з виходу БЦО надходять до входу компаратора  $K$  з гістерезисом, де порівнюються з фактичними значеннями фазних струмів інвертора (датчики ДС4-6).

Завдання по середній реактивній потужності на навантаженні  $Q_z$  надходить на один із входів вузла порівняння, на другий вхід якого надходить сигнал зворотного зв'язку по середній реактивній потужності  $Q$  з виходу БЦО. Різницевий сигнал через регулятор середньої реактивної потужності  $P_Q$  і регулятор струму реактора  $L_d P_I$  низькочастотного каналу компенсатора надходить на вхід системи імпульсно-фазового керування, синхронізованої з напругою мережі живлення.

В  $pqr$  координатах сигнали завдання миттєвих значень фазних струмів інвертора високочастотного каналу напруги визначаються як

$$\begin{bmatrix} i_{Fa} \\ i_{Fb} \\ i_{Fc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{u_\alpha}{u_{\alpha\beta 0}} i_p - \frac{u_\beta}{u_{\alpha\beta}} i_q - \frac{u_0 u_\alpha}{u_{\alpha\beta 0} u_{\alpha\beta}} i_r \\ \frac{u_\beta}{u_{\alpha\beta 0}} i_p + \frac{u_\alpha}{u_{\alpha\beta}} i_q - \frac{u_0 u_\beta}{u_{\alpha\beta 0} u_{\alpha\beta}} i_r \\ \frac{u_0}{u_{\alpha\beta 0}} i_p + \frac{u_{\alpha\beta}}{u_{\alpha\beta 0}} i_r \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Дослідження, спрямовані на аналіз впливу величини напруги на конденсаторі накопичувача на умови функціонування силового устаткування компенсатора і якість електроенергії мережі живлення дозволили зробити висновок про доцільність урахування зворотно - пропорційного характеру залежності залишкового рівня вищих гармонік струму мережі і відповідно комутаційних перенапруг, що виникають при роботі мосту на повністю керованих тиристорах, від напруги на конденсаторі накопичувача при побудові системи керування й регулювання. Структура аналого-цифрової системи керування компенсатором на основі  $p-q$  або  $p-q-r$  теорій потужності з додатковим контуром регулювання припустимого рівня амплітуди обраної гармоніки наведена на рис. 10. Сигнал завдання припустимої величини гармоніки  $I_{nz}$  надходить на один із входів регулятора амплітуди обраної гармоніки  $P_a$ , на другий вхід якого надходить сигнал, пропорційний амплітуді відповідної гармоніки з виходу вимірника амплітуд ВА. Вихідний сигнал регулятора  $P_a$  визначає необхідний рівень напруги на конденсаторі інвертора напруги й подається на вхід  $U_z$  вузла порівняння. Аналогічно може бути побудована й система з контуром регулювання рівня комутаційних перенапруг випрямляча. Одночасне застосування в системі керування й ре-

гулювання запропонованих контурів регулювання забезпечує підтримку на допустимому рівні величини генеруємої або споживаної середньої реактивної потужності і миттєвих значень неактивних потужностей, зокрема рівня вищих гармонік живильної мережі та величини несиметрії фазних струмів, при збереженні оптимальних умов функціонування силового устаткування компенсатора.

Рис.10. Структура аналого-цифрової системи керування компенсатором на основі p-q або p-q-r теорій потужності з додатковим контуром регулювання припустимого рівня амплітуди обраної гармоніки

Найбільш перспективним напрямком, що відповідає природі мікропроцесорного керування, є прогнозне керування. У системі, що працює за таким принципом, відсутні регулятори, що мають звичну структуру. Основну роль відіграє математична модель об'єкта, закладена в мікропроцесор, здатна прогнозувати зміни координат стану напівпровідникового перетворювача на черговому інтервалі дискретності, причому може бути застосована прогноуюча модель, що працює як у реальному масштабі часу, так і в прискореному. Мікропроцесорна система керування реалізує процеси кінцевої тривалості по всім змінним станів об'єкта за число інтервалів дискретності напівпровідникового перетворювача, що дорівнює порядку диференціального рівняння безперервної частини об'єкта, при цьому порядок структури в цілому не підвищується. У запропонованій структурі керування за прогнозом реалізовано в низькочастотному каналі, що працює з випереджальними або відстаючими кутами керування й виконує функцію компенсатора середньої реактивної потужності.

Задане значення струму реактору  $L_d \dot{i}_{зад}$  визначається на основі різниці між наявним значенням середньої реактивної потужності в точці підключення компенсатора і необхідним, тобто відповідає величині реактивної потужності  $Q$ , що підлягає компенсації

$$Q = Q_3 - Q_n, \quad (18)$$

де  $Q_3$  – задане значення реактивної потужності;  $Q_n$  - поточне середнє значення реактивної потужності в точці підключення навантаження і компенсатора до мережі, розраховане з використанням теорій потужності.

Напруга на виході мостового випрямляча на GTO тиристорах, що працюють із випереджальними кутами керування  $\alpha_0$ , відповідно до діаграми, наведеної на рис. 11, дорівнює

$$U_{d\alpha} = U_{2m} \cdot \cos\left(\omega t + \alpha_0 + \frac{5}{6}\pi\right). \quad (19)$$

Алгоритм керування із прогнозуванням у реальному масштабі часу передбачає обчислення кута  $\alpha_0$ , при якому до моменту наступної комутації з кутом керування  $\alpha_1$  струм у реакторі  $L_d$  досягає заданого значення.

Рис.11. Діаграма керування випрямлячем на GTO тиристорах з випереджальними кутами керування

Збільшення струму реактору  $L_d$  на інтервалі  $t = \frac{1}{\omega}\left(\frac{\pi}{3} + \alpha_1 - \alpha_0\right)$ , рівному тривалості поточного такту випрямляча, залежить від параметрів реактору  $L_d$ , зміни кутів керування на поточному і наступному тактах і може бути представлене у вигляді

$$\Delta i_H^* = \frac{U_{2m}}{k(L_H \cdot \omega + R_H \left(\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{2}\right))} \cos\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_0}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi}{6} - \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{2}\right) \quad (20)$$

при допущенні про рівність нулю активних опорів  $R_\phi$  і індуктивностей  $L_\phi$  фаз мережі живлення і урахуванню величини активного опору  $R_H$  та індуктивності  $L_H$  реактору низькочастотного каналу. Реалізація алгоритму прогнозуючих розрахунків вимагає доповнення

рівняння (20) рівнянням зв'язку вихідного сигналу умовного регулятора зі струмом реактору  $L_d$  випрямляча компенсатора середньої реактивної потужності.

Отримано рівняння зв'язку зміни струму реактора низькочастотного каналу із кутом керування (випереджальним або відстаючим) для випадку реалізації пропорційно-інтегрального закону регулювання струму низькочастотного каналу  $\Delta i^*_{H1}$

$$\Delta i^*_{H1} = (\cos \alpha_0 - \cos \alpha_1 + \frac{t}{T_1} (i^*_{зад} - i^*_{H0})) \frac{1}{\frac{T_2}{T_1} + \frac{t}{2T_1}}, \quad (21)$$

де:  $i^*_{H0}$  - струм у реакторі в момент відмикання тиристорів при куті  $\alpha_0$ ;  $T_1$  - постійна часу інтегрального каналу ПІ-регулятора;  $\frac{T_2}{T_1}$  - коефіцієнт передачі пропорційного каналу ПІ-регулятора.

Рівняння (21) дозволяє одержати відповідні рівняння зв'язку для реалізації пропорційного (22) і інтегрального (23) законів регулювання струму реактора низькочастотного каналу:

$$\Delta i^*_{H1} = i^*_{зад} - i^*_{H0}, \quad (22)$$

$$\Delta i^*_{H1} = i^*_{зад} - i^*_{H0} - \frac{T_1}{t} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_0). \quad (23)$$

Незалежно від застосованого умовного регулятора поточне значення кута  $\alpha_0$  визначається як момент рівності  $\Delta i_H$  та  $\Delta i_{H1}$ .

Відповідні обчислювальні вирази для випадків пропорційного, інтегрального і пропорційно-інтегрального законів регулювання будуть мати вигляд (24), (25) і (26):

$$\frac{U_{2m}}{k(L_H \cdot \omega + R_H (\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{2}))} \cdot (\sin(\alpha_1 + \frac{7}{6}\pi) - \sin(\alpha_0 + \frac{5}{6}\pi)) = i^*_{зад} - i^*_{H\alpha_0}, \quad (24)$$

$$\frac{U_{2m}}{k(L_H \omega + R_H (\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{2}))} \cdot (\sin(\alpha_1 + \frac{7}{6}\pi) - \sin(\alpha_0 + \frac{5}{6}\pi)) =$$

$$i^*_{зад} - i^*_{H\alpha_0} - \frac{T_1}{t} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_0),$$

(25)

$$\frac{U_{2m}}{k(L_H \cdot \omega + R_H(\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{2}))} \cdot (\sin(\alpha_1 + \frac{7}{6}\pi) - \sin(\alpha_0 + \frac{5}{6}\pi)) =$$

$$(\cos \alpha_0 - \cos \alpha_1 + \frac{t}{T_1}(i_{зад}^* - i_{H0}^*)) \cdot \frac{1}{\frac{T_2}{T_1} + \frac{t}{2T_1}}. \quad (26)$$

Рис.12. Структура цифрової системи керування й регулювання компенсатором неактивних складових повної потужності

Основними параметрами, по величині яких можна зробити висновок про ефективність використання запропонованої структури компенсатора для поліпшення електромагнітної сумісності споживачів електричної енергії з мережею живлення та підвищення якості електроенергії є коефіцієнт гармонік струму мережі  $THD$ , коефіцієнт потужності  $\chi$  корисного навантаження і компенсатора в точці їхнього підключення до мережі, різниця коефіцієнтів корисної дії  $\Delta\eta$  навантаження і навантаження з компенсатором, амплітуда імпульсної комутаційної перенапруги  $U_k$ , що визначені надалі показниками якості. Основний вплив на зазначені параметри робить рівень напруги на конденсаторі накопичувача  $U_c$  і ширина гістерезису компаратора системи керування  $G$ , визначені надалі варіативними параметрами, що представлені вектором  $X=(U_c, G)$ .

Рис.13. Узагальнений алгоритм керування й регулювання двоканальним компенсатором

Показники якості залежать від варіативних параметрів компенсатора, тому їх можна представити функціями варіативних параметрів системи, які визначені тільки в області



стійкості системи автоматичного керування і регулювання компенсатора. Завдання оптимізації показників якості містить кілька критеріїв оптимальності, які можна обчислити в ході моделювання електромагнітних процесів у системі живильна мережа – навантаження – компенсатор і розташувати в порядку пріоритету: коефіцієнт гармонік струму живильної мережі, коефіцієнт потужності корисного навантаження і компенсатора в точці їхнього підключення до живильної мережі, різниця коефіцієнтів корисної дії навантаження і навантаження з компенсатором, амплітуда імпульсної комутаційної перенапруги. На перші три критерія накладаються обмеження:  $THD(x) < THD_{max}$ ,  $\chi(x) > \chi_{min}$ ,  $\Delta\eta(x) > \Delta\eta_{min}$ , а четвертий необхідно мінімізувати як цільову функцію  $U_k(x) = U_{kmin}$ . Функції обмежень і цільова функція обчислюються в єдиному процесі моделювання. Цільова функція не визначена, якщо хоча б одне із цих обмежень буде порушено. Постановка завдань векторної оптимізації критеріїв якості компенсатора полягає у формуванні векторних функцій наступного загального виду:

$$F(x) = \{F_1(x), F_2(x), \dots, F_M(x)\}, \quad (27)$$

де  $x \in R^n$ ,  $n$  — число варіативних параметрів,  $M$  — розмірність векторної функції. Векторна функція (27) складається з  $M-1$  штрафних функцій і останнього критерію — цільової функції. Для ефективного застосування цієї векторної функції кожна її складова повинна бути визначена у всьому просторі варіативних параметрів, в іншому випадку її необхідно довизначити деякою функцією штрафу. Кожну проекцію цієї векторної функції необхідно мінімізувати з урахуванням пріоритету проекцій - чим вище номер проекції, тим нижче її пріоритет. Оптимізація варіативних параметрів виконана у два етапи з метою одержання високої точності рішення і зменшення часу обчислень. На рис. 14 жирною лінією показана траєкторія пошуку кращих точок на першому етапі. Проекції оптимальної точки, відзначеної ромбом, на осі  $x_1$  і  $x_2$  відповідають оптимальним значенням варіативних параметрів  $U_c$ ,  $G$ . У такий спосіб оптимальними для випадку знаходження в припустимому діапазоні коефіцієнта гармонік струму, споживаного навантаженням і компенсатором з живильної мережі, коефіцієнта потужності навантаження й компенсатора, різниці коефіцієнтів корисної дії навантаження й навантаження з компенсатором і мінімально досяжної величини комутаційної перенапруги на ключах низькочастотного каналу компенсатора буде забезпечення напруги на конденсаторі накопичувача на рівні  $2.64 * E_{am}$  і ширини гістерезису на рівні  $1.93 * 10^{-3}$ . При цьому амплітуда комутаційного імпульсу дорівнює  $0.973 * E_{am}$ , де  $E_{am}$  - амплітуда лінійної напруги на вторинній обмотці силового трансформатора низькочастотного каналу. За результатами другого етапу оптимальними для випадку знаходження в припустимому діапазоні коефіцієнта гармонік струму, що споживається

навантаженням і компенсатором з живильної мережі, коефіцієнта потужності навантаження й компенсатора, різниці коефіцієнтів корисної дії навантаження й навантаження з компенсатором і мінімально досяжної величини комутаційної перенапруги на ключах низькочастотного каналу компенсатора буде забезпечення напруги на конденсаторі накопичувача на рівні  $2.63 * E_{am}$  і ширини гістерезису на рівні  $5.06 * 10^{-3}$ . При цьому амплітуда комутаційного імпульсу дорівнює  $0.968 * E_{am}$ . Варіювання двох параметрів дає можливість виконати вимоги до перерахованих вище трьох показників якості й мінімізувати величину четвертого. Отримане на другому етапі значення ширини гістерезису в 2.5 рази більше відповідного значення першого етапу. Збільшення ширини гістерезису без погіршення показників якості дозволяє знизити вимоги до частотних властивостей силових ключів високочастотного каналу компенсатора.

Рис.14. Залежність кількості виконаних обмежень у порядку пріоритету від варіативних параметрів

**П'ятий розділ** присвячений комп'ютерному моделюванню й експериментальним дослідженням електромагнітних процесів у компенсаторі неактивних складових повної потужності і навантаженні з використанням моделей, що наведені на рис. 15 та рис. 16.

Рис.15. Модель блоку прогнозу системи цифрового керування

Рис.16. Модель компенсатора із системою цифрового керування за прогнозом

Отримані за допомогою експерименту на математичній моделі залежності амплітуди сьомої гармоніки струму мережі від напруги на конденсаторі ємнісного накопичувача підтверджують результати, отримані за допомогою аналітичних виразів (5-7), наведені на рис.4. Отримано залежності коефіцієнту гармонік струму мережі живлення ( $THD$ ) та відносного значення втрат потужності  $P_Q^*$  від співвідношення індуктивностей силових кіл високочастотного та низькочастотного каналів компенсатора  $L_{T2}/L_{T1}$ , відносного значення напруги на конденсаторі накопичувача  $U_C^*$  та коефіцієнту гармонік, що наведені на рис.17, рис. 18 та

рис.19 відповідно, підтверджують висновок, щодо доцільності зменшення індуктивності силових кіл високочастотного каналу відносно низькочастотного.

Рис.17. Залежність активних втрат у компенсаторі від співвідношення індуктивності вторинних обмоток силових трансформаторів високочастотного та низькочастотного каналів для різних рівнів середньої реактивної потужності, що компенсується. ( $Q1 < Q2 < Q3$ )

$$U_c^*$$

Рис.18. Залежність коефіцієнта гармонік струму живильної мережі із компенсатором від напруги на конденсаторі накопичувача при  $G=0.005$

Рис.19. Залежність втрат у компенсаторі від коефіцієнта гармонік струму живильної мережі для різних співвідношень індуктивності вторинних обмоток силових трансформаторів високочастотного та низькочастотного каналів при  $G=0.005$

На рис.20 наведена діаграма, що характеризує динамічні якості низькочастотного каналу компенсатора неактивних складових повної потужності в режимі дотримання заданого значення реактивної потужності в точці підключення компенсатора до мережі живлення при змінах потужності, що генерує або споживає навантаження.

Рис.20. Перехідний процес при збільшенні середньої реактивної потужності в живильній мережі

Застосування системи керування за прогнозом забезпечує високі динамічні характеристики компенсатора та високу точність дотримання заданого рівня середньої реактивної потужності при зміні заданої величини реактивної потужності в мережі живлення та при змінах реактивної потужності, що споживається або генерується навантаженням.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано науково-прикладну проблему обґрунтованого створення енергоефективного пристрою компенсації неактивних складових повної потужності і системи керування ним на основі сучасних теорій потужності, на принципі двоканальної структури силової схеми, системи керування цифрового типу, що реалізує ідеї керування за прогнозом, створені алгоритми керування двоканальним компенсатором і програми керування в реальному масштабі часу. Запропоновані в дисертації методи, структури, алгоритми, програми у сукупності складають певний внесок у розвиток теорії компенсації неактивних складових повної потужності і систем мікропроцесорного керування ними.

Зроблені наступні висновки:

1. На основі системного аналізу спотворень параметрів мережі живлення та показників якості електроенергії мережі живлення, аналізу і розвитку теорій потужності, аналізу систем компенсації неактивних складових повної потужності обґрунтована необхідність створення багатофункціональних компенсаторів неактивних складових повної потужності, показана доцільність розробки двоканального компенсатора вищих гармонік струму, реактивної потужності, несиметрії струмів навантаження.

2. Розроблено теоретичні основи побудови силової схеми високоефективного компенсатора неактивних складових повної потужності, що складається з низькочастотного і високочастотного каналів із загальним ємнісним накопичувачем, що дозволяє успішно вирішувати проблему компенсації реактивної потужності, що генерується або споживається навантаженням, фільтрації вищих гармонік струму із застосуванням додаткового джерела енергії для одержання сигналу, що компенсує, у вигляді струму, зниження несиметрії струмів і напруг мережі живлення. Розроблено методику і розрахункові співвідношення для вибору напруги на ємнісному накопичувачі, напруги на реакторі низькочастотного каналу. Збільшення напруги на реакторі низькочастотного каналу в 2 рази призводить до зниження втрат потужності в 4 рази при постійній середній реактивній потужності, що компенсується.

3. Розроблено теоретичні основи побудови швидкодіючої мікропроцесорної системи керування двоканальним компенсатором на основі сучасних теорій потужності, керування за прогнозом стану системи на наступному такті низькочастотним каналом і гістерезисним ке-

руванням високочастотним каналом з використанням одного обчислювача. Запропоновано систему керування компенсатором з контуром регулювання коефіцієнта гармонік струму мережі живлення.

4. Виконано оптимізацію параметрів силової схеми компенсатора і системи керування. Рекомендовано підтримання напруги на конденсаторі накопичувача на рівні 2.6 від амплітудного значення напруги на вторинній обмотці трансформатора низькочастотного каналу, гістерезису в системі керування високочастотним каналом на рівні 0.005. При зазначених параметрах амплітуда імпульсу комутаційної перенапруги не перевищує 0.97 від амплітудного значення напруги на вторинній обмотці трансформатора низькочастотного каналу, коефіцієнт гармонік струму живильної мережі не перевищує 0.08, коефіцієнт потужності навантаження з компенсатором не нижче 0.99, різниця коефіцієнтів корисної дії навантаження й навантаження з компенсатором не перевищує 0.01.

5. Результати математичного моделювання напівпровідникового компенсатора неактивних складових повної потужності в середовищі Matlab підтвердили правильність отриманих аналітичних виражень і зроблених на основі їхнього аналізу висновків і рекомендацій.

6. Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що запропоновано спосіб керування компенсатором неактивних складових повної потужності, що складається з низькочастотного і високочастотного каналів із загальним ємнісним накопичувачем, що забезпечує високі динамічні показники пристрою, високу точність регулювання необхідних параметрів електроенергії живильної мережі. Розроблено критерії для практичних розрахунків параметрів силової схеми компенсатора, практичні структури систем керування й регулювання. Розроблено алгоритми і програми керування компенсатором, що забезпечують час виконання обчислювальних процедур до 60 мкс при тривалості одного циклу роботи процесора 6.67 нс.

7. Отримані результати є закінченими для використання при розрахунку параметрів силової схеми компенсатора неактивних складових повної потужності, розробці структури мікропроцесорної системи керування й регулювання, створення алгоритмів керування в реальному масштабі часу і їхньої програмної реалізації. Результати проведених у дисертації теоретичних досліджень і практичних розробок знайшли застосування на ДП НДІ ХЕМЗ, АТ Елтехком, НВП «Еос», використовуються у навчальному процесі на кафедрі промислової та біомедичної електроніки НТУ «ХП».

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Домнин И.Ф., Фетюхина Л.В. Использование языков высокого уровня в системах экспресс-прогнозного управления полупроводниковыми преобразователями // Вопросы преобразовательной техники и частотного электропривода. – Саратов: «СПИ». – 1992. – С.4-9.

Здобувач запропонував методику створення програмного забезпечення систем керування за прогнозом.

2. Сокол Е.И., Домнин И.Ф., Фетюхина Л.В. Анализ эффективности применения арифметического умножителя в управляющих контроллерах // Технічна електродинаміка. –Київ: ІЕД НАНУ, 1993.– № 4. – С. 34-37.

Здобувач запропонував методику мінімізації часу виконання програм при побудові систем керування за прогнозом стану об'єкту.

3. Сокол Е.И., Домнин И.Ф., Шишкин М.А. Концепция микропроцессорного управления полупроводниковыми преобразователями // Технічна електродинаміка. –Київ: ІЕД НАНУ, 2000.–Тематичний вип., Ч.1. – С. 69-74.

Здобувач виконав аналіз алгоритму керування за прогнозом з метою отримання високих динамічних характеристик перетворювача.

4. Домнин И.Ф., Загrevський О.П., Шишкін М.А. Рейтингова оцінка стану інвертора струму методом нечіткої логіки // Технічна електродинаміка.– Київ: ІЕД НАНУ, 2000.– Тематичний вип., Ч.4. – С.84-87.

Здобувач запропонував виконання рейтингової оцінки стану перетворювача при реалізації системи керування за прогнозом.

5. Бoryошкин А.А., Домнин И.Ф., Жемеров Г.Г. Выбор силовой схемы двенадцатипульсного управляемого выпрямителя // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2001. – вип.15. – С.205-214.

Здобувач розробив методику розрахунку втрат потужності в силовій схемі перетворювача змінної напруги в постійну.

6. Домнин И.Ф., Загrevский О.П., Федоров Д.А. Алгоритм контроля АИТ на основе аппроксимации квадратичным полиномом // Технічна електродинаміка. –Київ: ІЕД НАНУ, 2001. –Тематичний вип., Ч.3. – С. 56-60.

Здобувач створив алгоритм аналізу в реальному масштабі часу процесів в силовій схемі перетворювача, що керується системою прогнозного типу.

7. Домнин И.Ф., Замаруев В.В., Таранов М.Н. Особенности разработки конструкции матричного преобразователя // Технічна електродинаміка. –Київ: ІЕД НАНУ, 2001.– Тематичний вип., Ч.2. – С. 33-38.

Здобувач запропонував шлях зменшення комутаційних перенапруг.

8. Домнин И.Ф., Жемеров Г.Г., Сокол Е.И. Перспективы применения полупроводниковых компенсаторов реактивной мощности в сетях электроснабжения промышленных предприятий // Технічна електродинаміка. –Київ: ІЕД НАНУ, 2002. – Тематичний вип., Ч.1. –С. 37-42.

Здобувачем запропоновано структуру компенсатора неактивних складових повної потужності.

9. Домнин И.Ф., Жемеров Г.Г., Копачовец О.И. Характеристики полупроводникового фильтрокомпенсирующего устройства в установившемся режиме // Технічна електродинаміка. –Київ: ІЕД НАНУ, 2003. – Тематичний вип., Ч.4. – С.15-20.

Здобувачем виконаний аналіз характеристик фільтрокомпенсатора та доведений його позитивний вплив на якість електроенергії мережі живлення.

10. Домнин И.Ф., Федоров Д.А. Управление силовым активным фильтром в режиме компенсации реактивной мощности // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2003. – вип.10. – С. 465-466.

Здобувачем досліджена запропонована система керування силовим активним фільтром на основі інвертора напруги, що забезпечує регулювання рівня напруги на конденсаторі інвертора.

11. Домнин И.Ф., Жемеров Г.Г., Крылов Д.С., Сокол Е.И. Современные теории мощности и их использование в преобразовательных системах силовой электроники // Технічна електродинаміка. –Київ: ІЕД НАНУ, 2004. – Тематичний вип., Ч.1. – С. 80-91.

Здобувачем виконаний порівняльний аналіз теорій потужності та досліджені особливості їх використання в системах керування перетворювачами електроенергії.

12. Домнин И.Ф. Система управления фильтрокомпенсирующим устройством // Технічна електродинаміка. –Київ: ІЕД НАНУ, 2004. – №2. – С. 25-29.

13. Домнин И.Ф., Федоров Д.А. Критерии выбора частоты коммутации ключей силового активного фильтра // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2004. – вип.43. – С. 147-150.

Здобувачем визначені критерії вибору частоти комутації ключів та зроблені висновки щодо доцільного діапазону її значень.

14. Домнин И.Ф., Вержановская М.Р., Прокопенко В.Ю. Оптимизация структуры микропроцессорной системы управления прогнозного типа // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ, 2004. – Тематичний вип., Ч.2. – С. 55-60.

Здобувачем визначені загальні вимоги до структури системи керування за прогнозом перетворювачем електроенергії.

15. Домнин И.Ф. Влияние параметров силового оборудования фильтрокомпенсирующего устройства на гармонический состав тока сети // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ, 2005. – Тематичний вип., Ч.1. – С.34-36.

16. Домнин И.Ф., Федоров Д.А. Структура нечеткого регулятора для управления силовым активным фильтром // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ, 2005. – Тематичний вип., Ч.2. – С.27-29.

Здобувачем запропонована структура регулятора інвертора напруги на основі нечіткої логіки, визначений вибір вхідних параметрів регулятора.

17. Домнин И.Ф., Жемеров Г.Г. Определения мгновенных активной и реактивной мощностей в трехфазных электрических цепях с вентильными преобразователями // Вісник Приазовського державного технічного університету. – Маріуполь: ПДТУ, 2005. – вип.15, Ч.2. – С. 70-74.

Здобувачем досліджені методи розрахунку активної та реактивної потужності та зроблені висновки щодо перспектив їх використання в системах керування напівпровідниковими компенсаторами.

18. Домнин И.Ф., Северин В.П., Бутова О.А., Копачовец О.И. Оптимальная настройка системы управления фильтрокомпенсирующим устройством // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2005. – вип.45. – С.360-364.

Здобувачем запропонована методика визначення параметрів системи керування та силової схеми з використанням методів багатокритеріальної векторної оптимізації.

19. Домнин И.Ф., Жемеров Г.Г., Ильина О.В. Активные и реактивные мощности в трехфазных четырехпроводных сетях с асимметричной нагрузкой // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ, 2005. – Тематичний вип., Ч.4. – С. 44-49.

Здобувачем досліджений вплив асиметричного навантаження на пульсації активної та реактивної потужності.

20. Сокол Е.И., Домнин И.Ф., Прокопенко В.Ю., Кияшко Б.А., Сунанто. Принцип прогнозного управления выпрямителем // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ, 2005. – Тематичний вип., Ч.3. – С.57-61.

Здобувачем запропонований спосіб визначення моментів комутації ключів перетворювача електроенергії з прогножною системою керування та створений алгоритм.



21. Домнин И.Ф. Прямое цифровое управление фильтрокомпенсирующим устройством // Технічна електродинаміка. –Київ: ІЕД НАНУ, 2006. – Тематичний вип., Ч.1. – С. 49-52.

22. Жемеров Г.Г., Домнин И.Ф., Ильина О.В., Тугай Д.В. Энергоэффективность коррекции фазы тока и компенсации пульсаций активной и реактивной мощности в трехфазной системе электроснабжения //Технічна електродинаміка. –Київ: ІЕД НАНУ, 2007. – №1. –С 52-57.

Здобувачем досліджені шляхи підвищення коефіцієнту корисної дії систем електропостачання за рахунок використання компенсаторів змінних складових потужності.

23. Сокол Е.И., Гончаров Ю.П., Домнин И.Ф., Замаруев В.В., Кривошеев С.Ю. Метод эквивалентного сопротивления для синтеза регуляторов в полупроводниковых преобразователях с резонансными силовыми фильтрами // Технічна електродинаміка. –Київ: ІЕД НАНУ, 2007. – Тематичний вип., Ч.4. – С. 38-44.

Здобувачем виконано аналіз граничних з точки зору стійкості до автоколивань коефіцієнтів підсилення системи регулювання перетворювача.

24. Патент на корисну модель № 27549 Україна, МПК H02M 7/00.- Спосіб прямого мікропроцесорного керування випрямлячем за обчислювальними прогнозами // Є.І. Сокол, Б.О. Кіяшко, І.Ф. Домнін, Л.Є. Бахнов, Сунанто, М.О. Тимченко, О.Є Іванов (Україна).-№ и 2007 05586; Заявл. 21.05.2007; Опубл. 12.11.2007; Бюл. №18.- С.6.

Здобувачем розроблений метод визначення моментів комутації ключів перетворювача електроенергії з прогнозною системою керування та запропонований алгоритм, що реалізує метод.

25. Шипилло В.П., Сокол Е.И., Домнин И.Ф. Особенности прямого микропроцессорного управления вентиляльным преобразователем // Цифровые методы управления преобразовательными устройствами и электроприводами на их основе: Всесоюзн. научн.-техн. совещание. Запорожье, октябрь 1984 г. – Запорожье, 1984. – С. 34-36.

Здобувачем розглянуто вплив перетворювача на особливості побудови цифрової системи керування.

26. Сокол Е.И., Шипилло В.П., Домнин И.Ф., Фетюхина Л.В., Шишкин М.А. Моделирование на ЭВМ систем прогнозного управления полупроводниковыми преобразователями частоты // MicroCAD-SYSTEM: компьютер, наука, техника, технология, здоровье: Междунар. науч.-техн. конф. Харьков, 8-13 июня 1993г. – Харьков; Мишкольц, 1993. – С.86-87.

Здобувачем запропонований алгоритм керування перетворювачем електроенергії.

27. Домнин И.Ф., Шишкин М.А., Ластовка А.П. Аппаратные умножители в системах управления полупроводниковыми преобразователями // Силовая электроника в ре-

шении проблем ресурсо- и энергосбережения: Междунар. научн.-техн. конф. Алушта, октябрь 1993 г. – Харьков, 1993. – С.198-200.

Здобувачем запропоновано використання цифрових помножувачів з метою підвищення швидкодії системи керування.

28. Домнин И.Ф., Шишкин М.А., Лисачук Е.Г. Блок связи управляющего контроллера с полупроводниковыми преобразователями // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: Междунар. научн.-техн. конф. Харьков, 4–9 октября 1994 г. – Харьков, 1994. – С.170.

Здобувачем запропонована структура та алгоритм формування сигналів зворотніх зв'язків в системах прогнозного керування.

29. Сокол Е.И., Домнин И.Ф., Ластовка А.П., Шишкин М.А., Фетюхина Л.В. Диагностирование преобразователей электроэнергии с системами управления по прогнозу // MicroCAD-SYSTEM: компьютер, наука, техника, технология, здоровье: Междунар. научн.-техн. конф. Харьков, 3 -5 мая 1994 г. – Харьков, 1994. – С. 45.

Здобувачем доведена необхідність використання діагностичних процедур в системах прогнозного керування перетворювачами.

30. Фетюхина Л.В., Сокол Е.И., Домнин И.Ф. Математическое моделирование электромагнитных процессов в ШИП // MicroCAD-SYSTEM: компьютер, наука, техника, технология, здоровье: Междунар. научн.-техн. конф. Харьков, 19 – 21 апреля 1995 г. – Харьков, 1995. – С. 21.

Здобувачем виконаний розрахунок перехідних процесів.

31. Shipillo V.P., Sokol E.I., Domnin I.F. Microprocessor prognosis control of semiconductor converters of electric energy // Proceeding of the 7th International Power Electronic & Motion Control Conference. Budapest, 2 - 4 September 1996. – Budapest, 1996. – Vol.1. – P. 303-305.

Здобувачем розглянутий механізм прогнозного управління з використанням визначника Вандермонда.

32. Домнин И.Ф., Севрюков О.В., Вержановская М.Р. Локализация неисправностей силовой схемы инвертора тока // Proceeding of the 3<sup>rd</sup> International Scientific and technical conference on Unconventional electromechanical and electrical system. Alushta, 19 – 21 September 1997. – Szczecin, 1997. – Vol. 2. –P. 547-552.

Здобувачем запропоновано методику контролю та діагностики інвертора з використанням змінних стану навантаження.

**Домнін І.Ф.** Напівпровідникові компенсатори неактивних складових повної потужності.- Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії.-Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2008.

Дисертація присвячена розробці перспективної концепції побудови компенсаторів неактивних складових повної потужності з метою вирішення проблеми електромагнітної сумісності споживачів електричної енергії з мережею живлення та підвищення якості електричної енергії в точці підключення компенсатора до мережі живлення. Виконано аналіз і теоретичне обґрунтування теорій потужності, методів і підходів кількісної і якісної оцінки якості електроенергії мережі живлення, джерел спотворення параметрів мережі живлення. Розроблено теоретичні положення й критерії розрахунку параметрів силової схеми компенсатора неактивних складових повної потужності із двоканальною структурою силової схеми. Розвинені теоретичні положення створення мікропроцесорних систем керування компенсатором неактивних складових повної потужності із двоканальною структурою силової схеми. Запропонована двоканальна структура енергоефективного компенсатора неактивних складових повної потужності, що споживається або генерується у мережу навантаженням. Розроблено структури систем керування компенсатором неактивних складових повної потужності із двоканальною структурою силової схеми. Розроблено критерії для практичних розрахунків параметрів силової схеми компенсатора неактивних складових повної потужності із двоканальною структурою силової схеми, практичні структури систем керування й регулювання.

**Ключові слова:** тиристорний компенсатор, реактивна потужність, транзисторний інвертор, керований випрямляч, ємнісний накопичувач, система контролю та діагностики, якість електроенергії.

**Домнин И.Ф.** Компенсаторы неактивных составляющих полной мощности. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.12 – полупроводниковые преобразователи электроэнергии. – Национальный тех-

нический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2008.

Диссертация посвящена разработке и обоснованию перспективной концепции построения компенсатора неактивных составляющих полной мощности с целью решения проблемы улучшения электромагнитной совместимости потребителей электрической энергии с питающей сетью и повышения качества электроэнергии питающей сети в точке подключения полупроводникового компенсатора к питающей сети.

Выполнен анализ и теоретическое обоснование теорий мощности, методов и подходов количественной и качественной оценки качества электроэнергии питающей сети, источников искажения питающей сети. Рекомендовано построение многофункциональных устройств повышения качества электрической энергии с канальной структурой силовой схемы. Разработаны теоретические положения и критерии расчета параметров силовой схемы компенсатора неактивных составляющих полной мощности с двухканальной структурой силовой схемы. Высокочастотный и низкочастотный каналы имеют один общий силовой элемент – емкостной накопитель энергии. Низкочастотный канал предназначен для компенсации среднего значения реактивной мощности в точке подключения компенсатора, высокочастотный канал предназначен для компенсации мгновенных значений неактивной мощности. Двухканальная структура силовой схемы обеспечивает минимизацию потерь мощности при выполнении требований к параметрам электроэнергии. Развита теоретическая основа создания микропроцессорных систем управления компенсатором неактивных составляющих полной мощности с двухканальной структурой силовой схемы на основе теорий мгновенной мощности. Предложено использование управления по прогнозу низкочастотным каналом с целью обеспечения высоких динамических характеристик компенсатора, разработаны соответствующие расчетные соотношения. Разработаны структуры аналого-цифровых и цифровых систем управления компенсатором неактивных составляющих полной мощности с двухканальной структурой силовой схемы. Рекомендована для построения компенсатора система управления прогнозно-гистерезисного типа. На основе решения оптимизационной задачи даны рекомендации по выбору параметров силовой схемы и системы управления компенсатора. Выполнено исследование параметров компенсатора на математической модели и на макетном образце. Разработаны рекомендации для практических расчетов параметров силовой схемы и системы управления и регулирования, предложены алгоритмы управления и программы.

**Ключевые слова:** компенсатор, реактивная мощность, транзисторный инвертор, управляемый выпрямитель, емкостной накопитель, система контроля и диагностики, качество электроэнергии.

**Domnin I.F.** Compensator inactive component full power. – Manuscript.

Thesis for a doctor's degree in speciality 05.09.12 – semiconductor converter power. – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2008.

The thesis is devoted to the development of a perspective concept compensator inactive component full power. Analysis and theoretical validation of power theory, methods and approaches of quantitative and qualitative assessment of quality of power system electric energy, sources of power system distortion was performed. Abstract theorems and criteria of calculation of parameters of compensator of inactive full power constituents with two-channel loading pattern structure was elaborated. Abstract theorems of building of microprocessor-based control systems of compensator of inactive full power constituents with two-channel loading pattern structure were developed. Two-channel structure of power efficient compensator of inactive full power constituents. Structures of compensator of inactive full power constituents with two-channel loading pattern structure control systems were elaborated.

**Key words:** compensator, inactive power, inverter, rectifier, storage device, control system, quality rating.

Підписано до друку 27.03.2008 р. Формат 60х90/16.  
Папір офсетний. Друк - ризографія. Умови, друк. арк. 1,9.  
Гарнітура Тітез №ш Котап. Наклад 100 прим. Зам. № 5139

Надруковано у СПДФО Ізрайлев Є.М.  
СВІДОЦТВО № 2 480 017 0000 040432 від 21.03.2001 р.  
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 16