

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

ЛЕВОН ОЛЕНА ОЛЕКСАНДРІВНА



УДК 621.314.26

**НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ ДВОКАНАЛЬНИЙ РЕГУЛЬОВАНИЙ
КОМПЕНСАТОР НЕАКТИВНИХ СКЛАДОВИХ ПОВНОЇ
ПОТУЖНОСТІ**

Спеціальність 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків–2015

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі радіоелектроніки Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України, м. Харків

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Домнін Ігор Феліксович,
Інститут іоносфери
НАН і МОН України, директор

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Терещенко Тетяна Олександрівна,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»,
професор кафедри промислової електроніки

кандидат технічних наук, доцент
Яськів Володимир Іванович,
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя,
доцент кафедри радіотехнічних систем

Захист відбудеться «21» травня 2015 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий «15» квітня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Осичев О. В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Проблема забезпечення якості електроенергії висувається на перший план при вирішенні питань виробництва, передачі й використання електроенергії. Її важливість зростає зі зростаючим впровадженням в енергосистему нелінійних навантажень, робота яких спричиняє появу неактивних складових повної потужності. Існуючі на сьогодні міжнародні та державні стандарти жорстко обмежують вимоги до якості електроенергії та забезпечення електромагнітної сумісності мережевих перетворювачів з мережею живлення змінного струму.

На даний час запропоновані різні варіанти побудови пристроїв компенсації неактивної потужності мережі живлення, однак, вузька спеціалізація та орієнтація на конкретний вид спотворення мережі живлення вказують на доцільність комплексного підходу до вирішення задачі підвищення якості електроенергії та відповідності її стандартам. Перспективним напрямком є створення багатофункціональних пристроїв, що виконують функції компенсатора несиметрії мережі живлення, стабілізатора, активного фільтру та компенсатора реактивної потужності.

Існують розробки структур силових пристроїв, які вирішують ідею багатофункціональності. Силу схему багатофункціонального пристрою, що виконує функції компенсатора несиметрії струмів фаз мережі живлення, фільтра вищих гармонік і компенсатора реактивної потужності доцільно будувати з поділом виконуваних функцій по окремих каналах, які відрізняються за частотою комутації силових ключів, швидкодією для мінімізації втрат потужності. Забезпечення оптимальних умов роботи силового обладнання можливо за рахунок поліпшення електромагнітної сумісності навантаження з мережею живлення та підтримки на заданому рівні параметрів електричної енергії. Потребує вирішенню питання роботи подібних компенсаторів в умовах зміни характеру навантаження, а також адаптивності подібних пристроїв до вимог конкретного замовника, що обумовлює удосконалення та розробку універсального напівпровідникового компенсатора з ефективною цифровою швидкодіючою системою керування та регулювання.

Таким чином, актуальною є науково-практична задача створення структур систем керування та алгоритмів керування енергоефективними багатофункціональними напівпровідниковими компенсаторами неактивних складових повної потужності; математичних моделей таких компенсаторів для аналізу їх статичних та динамічних характеристик, показників якості електроенергії мережі живлення, енергетичних характеристик компенсаторів.

Зв'язок роботи з науковими програмами і планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі радіоелектроніки НТУ "ХПІ" у рамках завдань фундаментальної держбюджетної НДР МОН України «Дослідження системи та алгоритмів керування напівпровідниковим фільтрокомпенсатором» (№ДР 0106U001517) та госпдоговорної НДР «Дослідження способів поліпшення електромагнітної сумісності силового

передавача радара некогерентного розсіяння з мережею живлення» (Інститут іоносфери НАН і МОН України, договір №38266), в яких здобувачка була виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження – розробка енергоефективного напівпровідникового двоканального компенсатора неактивних складових повної потужності з використанням сучасних теорій потужності, ідей керування за прогнозом і нечітких обчислень.

Поставлена мета вимагає вирішення наступних наукових завдань:

- аналіз засобів і пристроїв компенсації неактивної потужності в трифазних мережах електроживлення з нелінійним навантаженням, способів керування компенсаторами неактивних складових повної потужності;
- розробка теоретичних положень побудови багатофункціонального двоканального компенсатора неактивних складових повної потужності, критеріїв розрахунку параметрів силової схеми пристрою;
- розробка нових принципів та методик керування напівпровідниковим двоканальним компенсатором неактивних складових повної потужності;
- синтез fuzzy-регулятора, що входить до складу системи керування двоканальним напівпровідниковим компенсатором, розробка методик вибору параметрів налаштування регулятора;
- розробка та дослідження комп'ютерної моделі напівпровідникового компенсатора з цифровою системою керування і регулювання.

Об'єктом дослідження є процес компенсації неактивних складових повної потужності трифазної мережі електроживлення.

Предметом дослідження є методи керування енергоефективними напівпровідниковими компенсаторами неактивних складових повної потужності трифазної мережі електроживлення.

Методи дослідження. При розробці принципів побудови системи керування використані положення сучасних теорій потужності, методи обчислення з прогнозуванням, методи регулювання на основі нечіткої логіки. Для розрахунку й аналізу характеристик компенсатора, впливу навантаження на мережу живлення використовувалися методи рішення диференціальних та алгебричних рівнянь. При вирішенні завдань дослідження роботи системи керування компенсатором використовувалися методи цифрового моделювання на основі пакету програми Matlab, методи оптимізації багатовимірних задач.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- запропоновано новий принцип комплексного підходу до вирішення завдання підвищення якості електроенергії мережі живлення і поліпшення електромагнітної сумісності навантаження з мережею живлення;
- вперше запропоновано нові методики керування двоканальним компенсатором, що дозволяють забезпечити високі динамічні характеристики перетворювача в умовах зміни характеру навантаження;
- отримали подальший розвиток теоретичні положення побудови мікропроцесорних систем керування двоканальним напівпровідниковим компенсатором на основі fuzzy-логіки і прогнозних обчислень, запропоновано

перспективні структури систем керування і регулювання такими перетворювачами;

- удосконалено методики вибору параметрів налаштування fuzzy-регуляторів з використанням методів багатовимірної оптимізації, визначені варіативні параметри і показники якості, обрані функції обмежень та цільова функція.

Практичне значення одержаних результатів для електроенергетики полягає у розробці структури та алгоритмів роботи цифрової багатоконтурної системи керування двоканальним напівпровідниковим компенсатором, що забезпечують ефективну роботу перетворювача в умовах зміни характеру навантаження, високу точність регулювання необхідних параметрів мережі живлення в точці підключення компенсатора.

Розроблені та обґрунтовані рекомендації щодо вибору параметрів силової схеми компенсатора (патент України на корисну модель № 57064).

Результати роботи знайшли практичне застосування в Інституті іоносфери НАН і МОН України (м.Харків) при вирішенні проблеми електромагнітної сумісності силового передавача радара некогерентного розсіяння з мережею живлення та поліпшення його енергетичних характеристик, а також у дослідно-конструкторських роботах ДП НДІ «ХЕМЗ» (м. Харків) при дослідженні способів поліпшення електромагнітної сумісності перетворювачів електричної енергії з мережею живлення.

Теоретичні й практичні результати роботи впроваджені також у навчальний процес кафедри радіоелектроніки НТУ «ХП».

Особистий внесок здобувача. Положення і результати, винесені на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них:

- методики керування низькочастотним каналом компенсатора, розробка алгоритму керування, що забезпечує перемикання режимів роботи двоканального напівпровідникового компенсатора з режиму генерації реактивної потужності в мережу живлення на режим споживання та навпаки, моделювання розробленого алгоритму в середовищі Matlab;

- синтез fuzzy-регулятора у складі двоконтурної системи керування двоканальним компенсатором;

- отримання залежності амплітуд вищих гармонік струму мережі та рівня комутаційних перенапруг від напруги на конденсаторі накопичувача для уточнення критеріїв вибору параметрів силової схеми пристрою;

- оптимізація параметрів налаштування двоконтурної системи керування напівпровідниковим двоканальним компенсатором неактивних складових повної потужності за допомогою векторних методів оптимізації цільових функцій;

- моделювання електромагнітних процесів системи електроживлення формувача потужних зондуючих імпульсів у середовищі Matlab Simulink, дослідження енергетичних характеристик формувача;

- цифрова реалізація двоконтурної системи керування високочастотним каналом компенсатора на основі прогнозних обчислень та алгоритмів нечіткої

логіки, отримання програмного коду, що реалізує fuzzy-регулятор контуру регулювання гармонік струму мережі живлення компенсатора в програмі FuzzyTech.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати, що виносяться на захист, доповідалися та обговорювалися і отримали позитивні відгуки на Міжнародних науково-технічних конференціях: «Силова електроніка і енергоефективність» (м. Алушта, 2009 - 2012 рр.), «Проблеми сучасної електротехніки» (м. Київ, 2010 р., м. Вінниця, 2012р.); Міжнародній науковій конференції «Проектування інженерних та наукових програм у Matlab» (м. Харків, 2011р.) та Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2012 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 10 наукових публікаціях, з них: 8 - у наукових фахових виданнях України (1 - у виданні, включеному до міжнародної наукометричної бази), 1 - у тезах доповідей міжнародної наукової конференції та 1 патент України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації складає 187 сторінок; з них 31 рисунки та 2 таблиці по тексту; 28 рисунків на 23 сторінках; 1 таблиця на 1 сторінки; список використаних джерел із 91 найменувань на 11 сторінках, 4 додатки на 26 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У **першому розділі** проаналізовані питання впливу неактивних складових повної потужності на якість електроенергії мережі живлення. Наведені основні положення сучасних теорій потужності, що дозволяють розраховувати неактивні складові повної потужності та енергетичні характеристики в системах з напівпровідниковими перетворювачами різних типів.

Виконано аналіз систем компенсації неактивних складових повної потужності, в результаті якого обґрунтовано необхідність створення багатофункціональних компенсаторів неактивних складових повної потужності, показана доцільність розробки двоканального напівпровідникового компенсатора з розподілом функцій контролю за величинами окремих параметрів мережі живлення та їх корекції по окремих каналах. Структура компенсованого керованого випрямляча (ККВ) створює умови для ефективної реалізації таких компенсаторів.

Силовa схема ККВ представлена двоканальною структурою (рис. 1). Один канал представлений одно або двомостовим випрямлячем з частотою

комутації 50 Гц і призначений для компенсації середньої реактивної потужності мережі живлення. Другий канал представлений силовим активним фільтром (САФ) (інвертор напруги з частотами комутації вище 10 кГц) призначений для пригнічення вищих гармонік мережі живлення, симетрування струмів у фазах трифазного ланцюга.

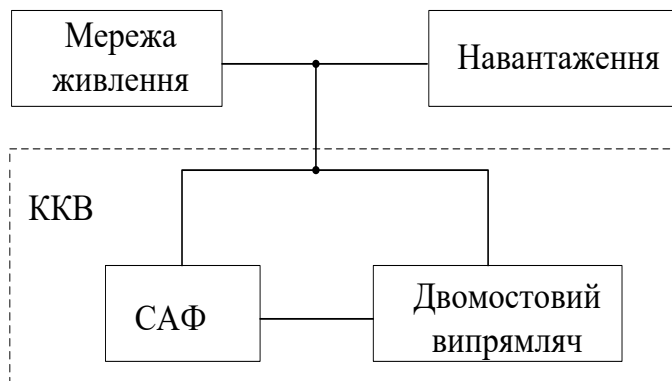


Рисунок 1 – Структура силової схеми компенсатора неактивних складових повної потужності

Підвищити ефективність функціонування компенсаторів неактивних складових повної потужності в цілому дозволяє побудова багатоконтурних систем керування. Це обумовлюється тим, що одночасне застосування в системі керування і регулювання напівпровідниковим компенсатором додаткових контурів регулювання має забезпечити підтримання на заданому рівні величини генерованої або споживаної середньої реактивної потужності та миттєвих значень неактивних потужностей, при збереженні оптимальних умов функціонування силового обладнання напівпровідникового компенсатора. Застосування контурів нечіткого керування у вигляді fuzzy-регуляторів у ряді випадків забезпечує більш високі показники якості перехідних процесів у порівнянні з класичними регуляторами.

Другий розділ присвячений розробці структури системи керування, методів керування двоканальним компенсатором неактивних складових повної потужності, методик керування низькочастотним і високочастотним каналами компенсатора, синтезу fuzzy-регулятора на основі алгоритму нечіткого виводу Мамдані.

Структура аналого-цифрової системи керування компенсатором на базі p - q теорії потужності наведена на рис. 2.

Силова частина перетворювача містить дві вентильних групи ВГ_G та ВГ_T компенсатора реактивної потужності на повністю керованих тиристорах та одноопераційних тиристорах відповідно, їх навантаження – реактор L_D , силовий активний фільтр САФ, конденсатор фільтра C і допоміжні ключі скидання енергії у вигляді діодної групи ДГ, D1, D2.

Визначено особливості керування пристроями компенсації неактивних складових повної потужності. Об'єднання в одному пристрої декількох функцій вимагає нових підходів до побудови швидкодіючих систем керування.

Найбільш перспективними напрямками, що відповідають природі мікропроцесорного керування, є керування за прогнозом та нечітке керування.

Завдання компенсатора полягає у підтримці близького до нуля значення середньої реактивної потужності, а також у компенсації миттєвих складових неактивної потужності, зокрема компенсації вищих гармонік струму мережі й підтримці форми мережевого струму близької до синусоїди.

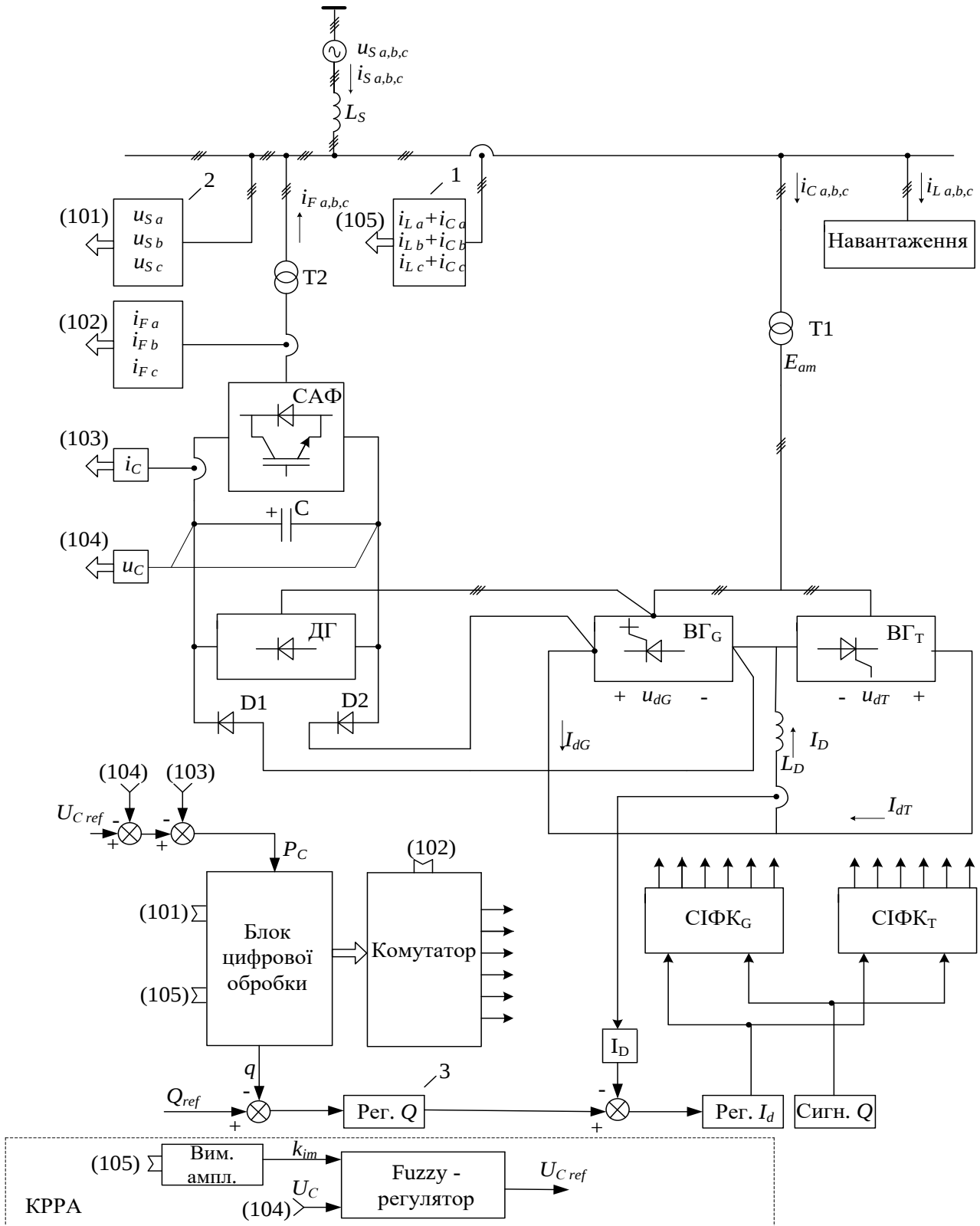


Рисунок 2 – Структура системи керування компенсатором з fuzzy-регулятором

Для зворотного зв'язку по струму в системі автоматичного регулювання використовується сигнал датчика струму 1, який несе інформацію про величини миттєвих сумарних значень активної та неактивної потужностей навантаження та компенсатора:

$$\begin{aligned} p_{\Sigma} &= p_L + p_C, \\ q_{\Sigma} &= q_L + q_C, \end{aligned}$$

де p_{Σ} , q_{Σ} – миттєва сумарна активна та неактивна потужності в точці підключення компенсатора й навантаження; p_L , q_L – миттєва активна та неактивна потужності навантаження; p_C , q_C – миттєва активна та неактивна потужності компенсатора.

На вході регулятора середньої реактивної потужності 3 встановлюється сигнал завдання Q_{ref} .

Сигнали з виходу датчика напруги 2 і датчика струму мережі 1 надходять до входів блоку цифрової обробки БЦО, в якому здійснюється перетворення напруги та струму мережі з координат α , β , γ у координати α , β . На третій вхід БЦО надходить сигнал P_C , пропорційний потужності, що надходить до накопичувача.

У БЦО здійснюється розрахунок струмів $i_{F\alpha}$ та $i_{F\beta}$, які повинен генерувати в мережу інвертор напруги для компенсації неактивних складових миттєвої потужності, зокрема пригнічення вищих гармонік струму:

$$\begin{aligned} i_{F\alpha} &= \frac{2}{3(u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2)} (u_{\alpha} (\tilde{p} + P_C) + u_{\beta} \tilde{q}) \\ i_{F\beta} &= \frac{2}{3(u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2)} (u_{\beta} (\tilde{p} + P_C) - u_{\alpha} \tilde{q}), \end{aligned}$$

де $\tilde{p}$, $\tilde{q}$ змінні – складові активної та неактивної потужностей.

По струмах $i_{F\alpha}$ та $i_{F\beta}$ у координатах α , β розраховуються сигнали завдання миттєвих значень фазних струмів інвертора напруги - САФ. Завдання по струмах САФ з виходу блоку цифрової обробки БЦО надходять на вхід комутатора на компаратор з гістерезисом, де порівнюються з фактичними значеннями фазних струмів САФ. Залежно від результату порівняння включаються транзистори відповідних плечей САФ.

Керування вентильними групами ВГ_G та ВГ_T здійснюється за допомогою систем імпульсно-фазового керування СІФК_G та СІФК_T.

Реалізація додаткових контурів регулювання системи керування компенсатором потребує проведення аналізу роботи ККВ в режимі компенсатора неактивних складових повної потужності для врахування впливу параметрів силової схеми ККВ на регульовані параметри мережі живлення.

При виключенні ключів вентиляльної групи на ГТО тиристорах виникають комутаційні перенапруги, які пов'язані з накопиченням енергії в індуктивності розсіяння силового трансформатора Т1. Встановлено, що вибір величини напруги на конденсаторі накопичувача слід виконувати з урахуванням наявності діапазону, в якому відбувається збільшення амплітуд окремо взятих гармонік і коефіцієнта гармонік струму мережі в цілому. Результатом обліку отриманих в даному розділі залежностей є введення в описану структуру системи керування компенсатором на рис. 2 додаткового контуру регулювання по рівню амплітуд вищих гармонік струму мережі живлення КРРА.

Рішення завдання цифрової реалізації багатоконтурної системи керування напівпровідниковим компенсатором пропонується здійснити шляхом впровадження цифрового fuzzy-регулятора, що визначає відхилення від заданого значення амплітуди обраної гармоніки струму та призводить її до встановлених норм.

На вхід fuzzy-регулятора надходять такі сигнали: коефіцієнт i -ї гармоніки струму мережі живлення, тобто рівень амплітуди обраної гармоніки, віднесений до амплітуди першої гармоніки струму мережі живлення - k_{im} , рівень напруги на накопичувальному конденсаторі САФ U_c . Вихідний сигнал fuzzy-регулятора $U_{c\ ref}$ керує напругою на накопичувальному конденсаторі САФ.

Зміна напруги на конденсаторі накопичувача забезпечує регулювання рівня комутаційних перенапруг, що виникають при роботі вентиляльної групи на повністю керованих тиристорах, а так само рівнем амплітуди обраної гармоніки струму мережі живлення.

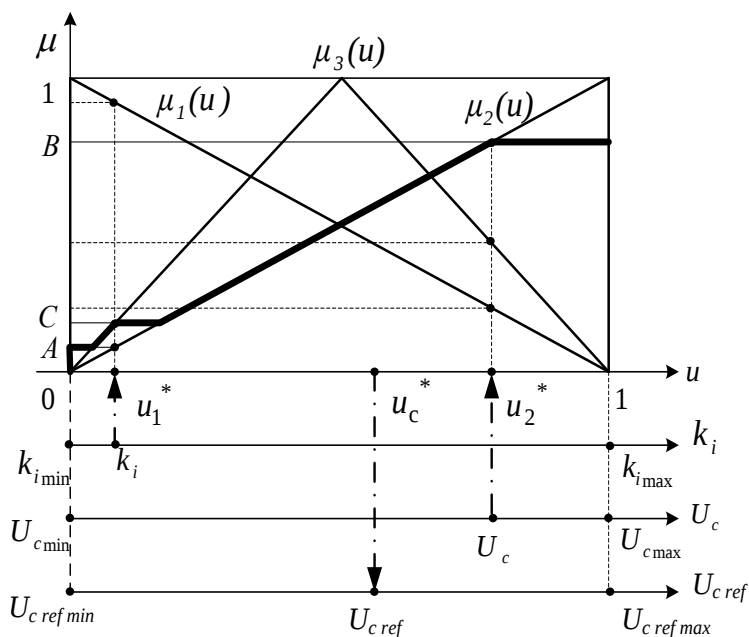


Рисунок 3 – Процес синтезу fuzzy-регулятора

Зроблено синтез fuzzy-регулятора, що полягає у виборі функцій належності терм-множин лінгвістичних змінних, алгоритму нечіткого виводу, вибору критеріїв оптимізації основних параметрів регулятора (діапазонів зміни лінгвістичних змінних, форми і параметрів функцій належності (рис. 3)) для мінімізації критерію якості в замкнутій системі автоматичного керування.

Детально розглянуто процес вироблення керуючої дії fuzzy-регулятора u_c^* на основі алгоритму нечіткого виводу Мамдані:

$$u_c^* = \frac{A \int_0^{A/2} u du + 2 \int_{A/2}^{C/2} u^2 du + C \int_{C/2}^C u du + \int_C^B u^2 du + B \int_B^1 u du}{A \int_0^{A/2} du + 2 \int_{A/2}^{C/2} u du + C \int_{C/2}^C du + \int_C^B u du + B \int_B^1 du};$$

$$u_c^* = \frac{B/2 + (A^3 - 4B^3 + 3C^3)/24}{B + (A^2 - 2B^2 + C^2)/4}.$$

Запропоновано цифрову систему керування низькочастотним каналом компенсатора, що використовує сучасні теорії потужності та побудована на основі прогнозу стану системи на наступному такті. Розроблені алгоритми керування низькочастотним каналом компенсатора, що орієнтовані на роботу компенсатора, у разі побудови низькочастотного каналу перетворювача двома вентиляльними групами, які передбачають переведення струму з однієї вентиляльної групи в іншу у разі перемикавання з режиму генерації реактивної потужності в мережу живлення на режим споживання та навпаки, що підвищує коефіцієнт корисної дії компенсатора в режимі споживання реактивної потужності з мережі.

Задане значення струму $i_{зад}$ реактора L_d визначається на основі різниці між поточним значенням середньої реактивної потужності в точці підключення компенсатора і заданим, тобто відповідає величині реактивної потужності Q , що підлягає компенсації:

$$Q = Q_3 - Q_T,$$

де Q_3 – задане значення реактивної потужності; Q_T – поточне середнє значення реактивної потужності в точці підключення джерела реактивної потужності і компенсатора до мережі, обчислене з використанням теорій потужності.

На рис. 4 представлений алгоритм керування низькочастотним каналом компенсатора при зміні знака реактивної потужності навантаження «-» на «+». При зміні знака заданого значення реактивної потужності Q_3 з негативного на позитивний, тобто при перемиканні з режиму генерації реактивної потужності в мережу на режим споживання, запропонований алгоритм керування забезпечує переведення струму з вентиляльної групи ВГ_Г у ВГ_Т. Алгоритм керування по прогнозу передбачає обчислення кута α_0 , при якому до моменту наступної комутації з кутом керування α_1 струм навантаження досягає заданого значення. Поточне значення кута α_0 визначається як момент рівності нулю отриманих в даному розділі дисертації виразів для функціоналів $F1$ та $F2$. Перехідний процес у даному випадку відображений на рисунку 5.

$$F1 = \frac{U_{2m}}{k(L_H \cdot \omega + R_H(\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{2}))} \cdot (\sin(\alpha_1 + \frac{7}{6}\pi) - \sin(\alpha_0 + \frac{5}{6}\pi)) - i_{зад}^* + i_{H0}^* = 0.$$

$$F2 = \frac{U_{2m}}{k(L_H \cdot \omega + R_H(\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{2}))} \cdot (\sin(\alpha_1 + \frac{1}{6}\pi) - \sin(\alpha_0 + \frac{1}{6}\pi)) - i_{\text{зао}}^* + i_{\text{но}}^* = 0.$$

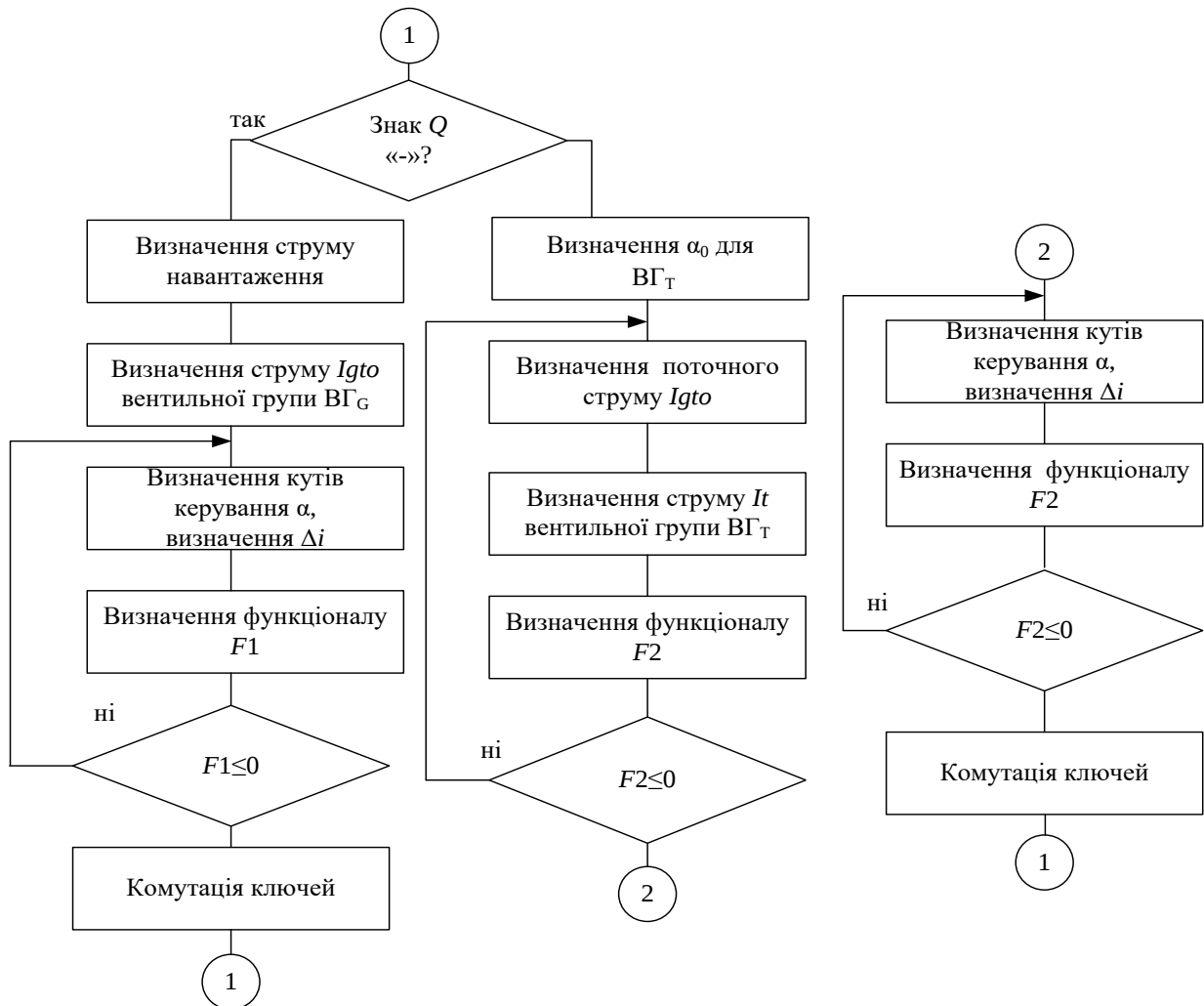


Рисунок 4 – Алгоритм керування низькочастотним каналом компенсатора при зміні знака реактивної потужності навантаження з «-» на «+»

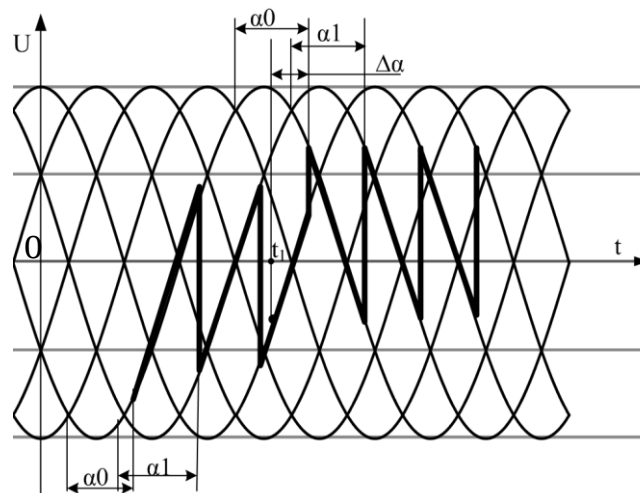


Рисунок 5 – Перехідні процеси при зміні знака реактивної потужності навантаження з «-» на «+»

У третьому розділі представлено комп'ютерне моделювання та експериментальні дослідження електромагнітних процесів у двоканальному компенсаторі неактивних складових повної потужності з двоконтурною системою керування та навантаженні з використанням розробленої Matlab-моделі перетворювача (рис 6).

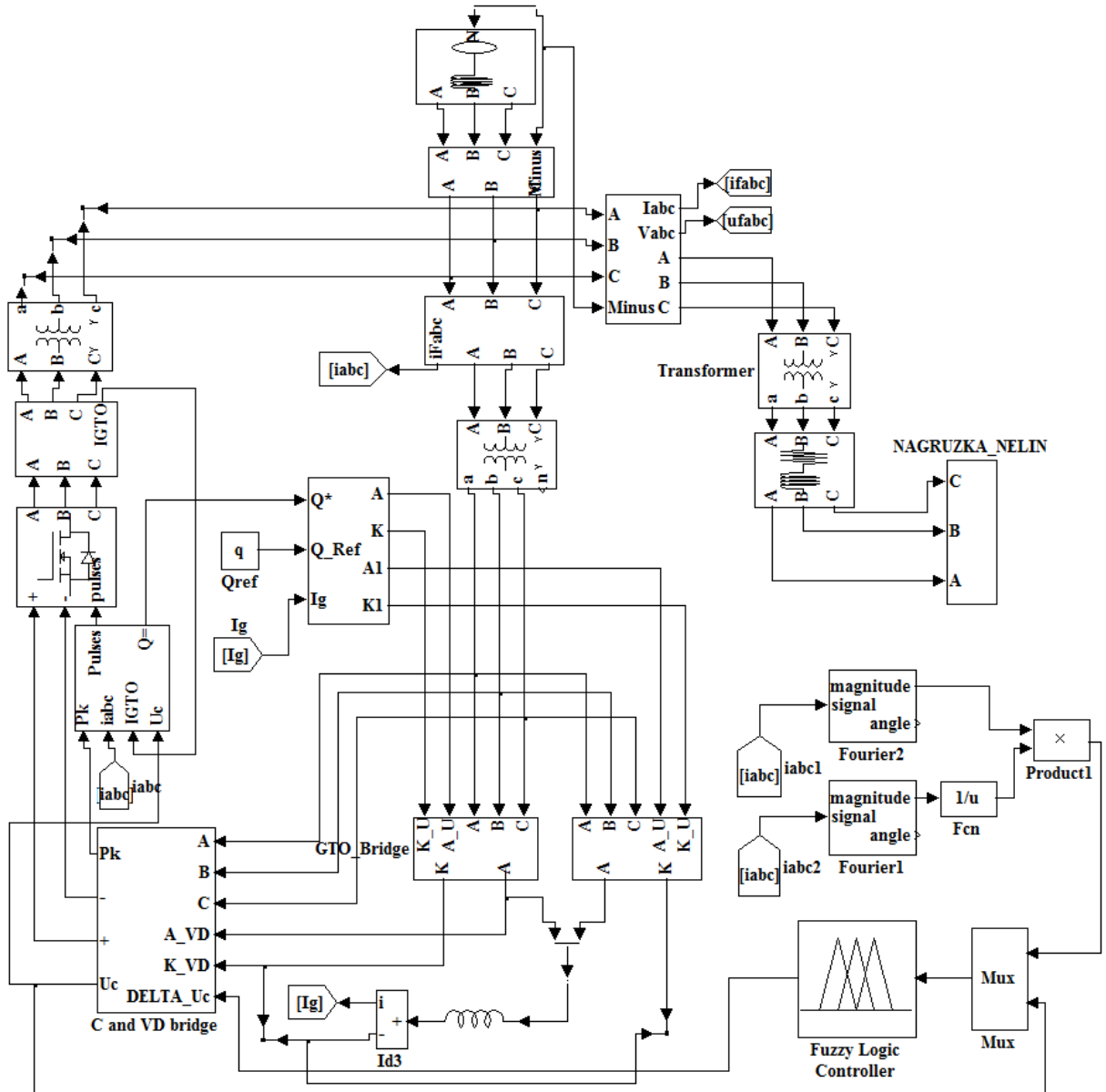


Рисунок 6 – Matlab-модель компенсатора з fuzzy-регулятором

Показано, що при включенні двоканального напівпровідникового компенсатора в мережу живлення з активно-індуктивним навантаженням відбулося значне збільшення коефіцієнта потужності та підтримання його на рівні 0,99. На рис.7 наведена діаграма зміни реактивної потужності в момент t_{on} підключення двоканального напівпровідникового компенсатора до мережі.

Доведено ефективність запропонованого алгоритму керування двоканальним компенсатором при зміні характеру навантаження.

На рис. 8 представлено перехідний процес при зміні знака заданого значення реактивної потужності Q_3 з негативного на позитивний, тобто при

перемиканні з режиму генерації реактивної потужності в мережу на режим споживання. На наведених осцилограмах відпрацювання заданого приросту струму відбувається за кілька тактів роботи низькочастотного каналу.

Математичне моделювання двоконтурної системи керування компенсатором з fuzzy-регулятором підтверджує зроблені теоретичні висновки про наявність діапазону, при якому не доцільне подальше підвищення значення напруги на конденсаторі накопичувача U_C для зменшення величин окремих гармонік струму мережі живлення через перевищення встановленої межі комутаційних перенапруг $U_{\text{кн}}^* \text{max}$ (рис. 9), що необхідно враховувати при налаштуванні параметрів fuzzy-регулятора.

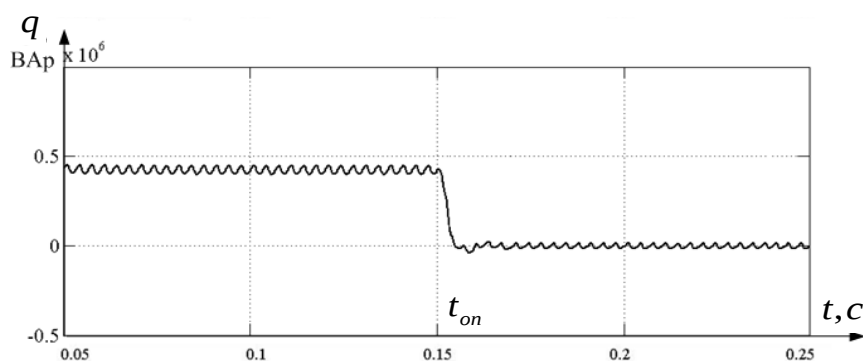


Рисунок 7 – Діаграма реактивної потужності в точці підключення компенсатора до мережі

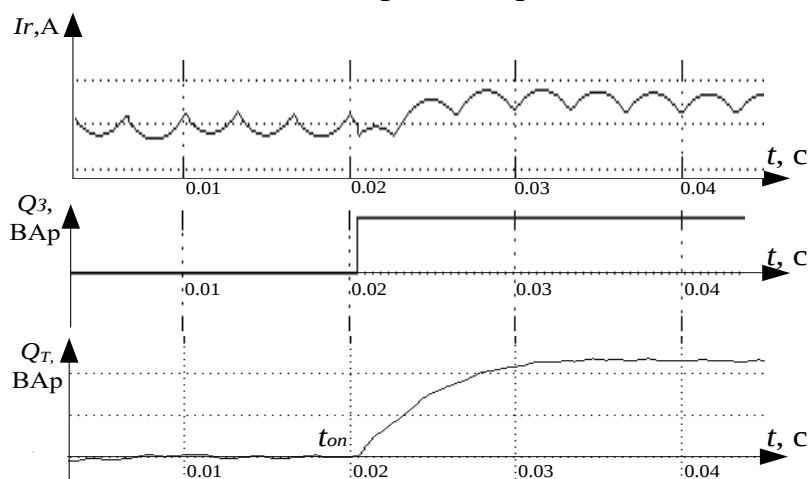


Рисунок 8 – Перехідні процеси при зміні знака реактивної потужності навантаження з «-» на «+»

Запропонована система керування напівпровідниковим компенсатором з контуром нечіткого регулювання за рівнем комутаційних перенапруг дає можливість в процесі компенсації реактивної потужності зменшити генерування в мережу вищих гармонік струму в 3-5 разів, не перевищуючи при цьому встановлений рівень комутаційних перенапруг.

Виконано пошук оптимальних параметрів налаштування регулятора відповідно до розробленого алгоритму, який оснований на використанні методу деформованого багатогранника Нелдера-Міда. Рисунок 10 ілюструє хід

процесу оптимізації значень змінних параметрів x_1 та x_2 на площині (граничні значення функції належності змінної U_C).

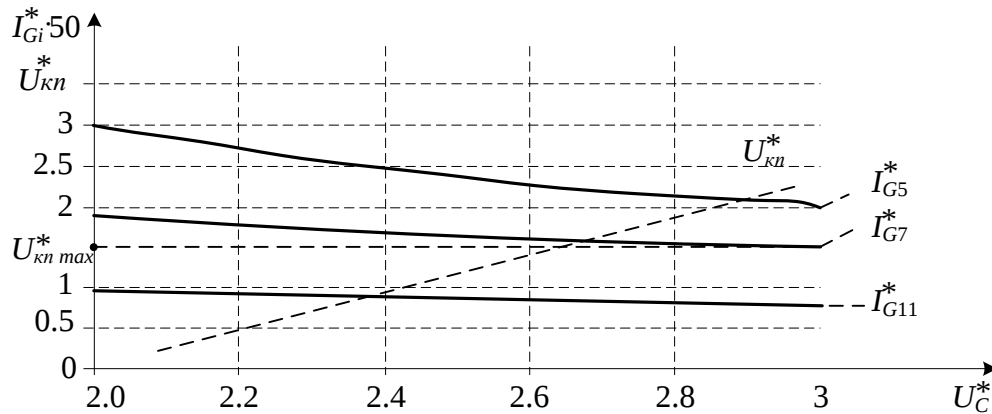


Рисунок 9 – Залежність амплітуд вищих гармонік струму мережі та рівня комутаційних перенапруг від напруги на конденсаторі накопичувача

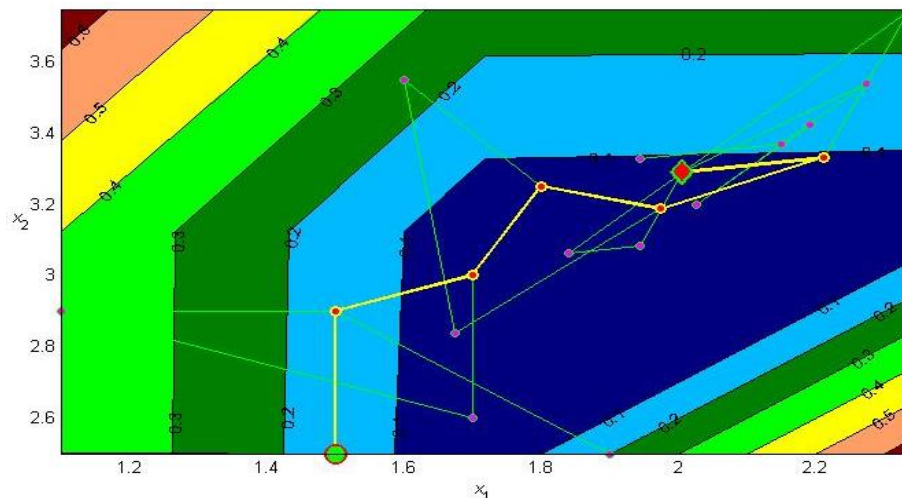


Рисунок 10 – Процес оптимізації значень змінних параметрів на площині

В результаті рішення поставленої задачі параметричного синтезу fuzzy-регулятора за допомогою векторних методів оптимізації цільових функцій отримані оптимальні параметри регулятора (позначені ромбом на рис. 10), при яких можливе забезпечення ефективного керування як рівнем амплітуд окремо взятих гармонік струму мережі живлення, так і коефіцієнта гармонік в цілому.

У процесі моделювання системи керування компенсатором неактивних складових повної потужності при отриманих оптимальних параметрів налаштування fuzzy-регулятора відбувається встановлення напруги на конденсаторі інвертора на рівні, при якому амплітуда обраної, наприклад сьомої, гармоніки струму мережі живлення Im_7 не перевищує 2% від рівня амплітуди першої гармоніки Im_1 .

Четвертий розділ присвячений дослідженню практичного застосування двоканального напівпровідникового компенсатора для поліпшення енергетичних характеристик формувачів потужних зондуючих імпульсів і

мікропроцесорної реалізації двоконтурної системи керування компенсатором неактивних складових повної потужності з fuzzy-регулятором.

Принцип підключення формувача і компенсатора до мережі живлення показаний на рисунку 11.

Математичне моделювання показало, що при підключенні компенсатора, в момент часу t_1 (рис. 12), реактивна потужність Q в точці підключення формувача до мережі знизилася на 90 %, а коефіцієнт потужності в точці підключення компенсатора реактивної потужності і формувача до мережі підтримується на рівні 0,98. На рис. 13 наведені 1, 5, 7 та 11 гармоніки струму, що генеруються формувачем в мережу живлення, без підключення компенсатора (до моменту часу t_1) та з підключенням компенсатора (після моменту часу t_1). При підключенні компенсатора, амплітуда 5-ої гармоніки знизилась на 60 %, 7-ої та 11-ої – на 50 %.

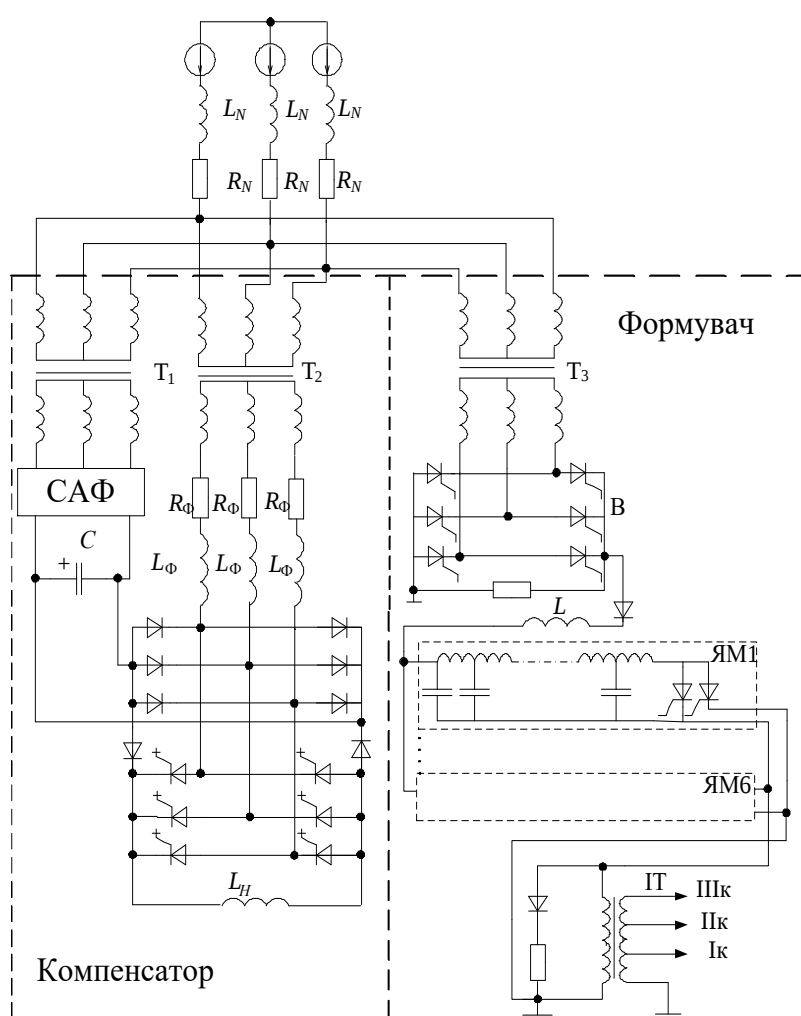


Рисунок 11 – Принцип підключення формувача та компенсатора до мережі живлення

При включенні компенсатора реактивної потужності в мережу живлення відбувається також деяке зниження першої гармоніки струму формувача зондуєчих імпульсів, що позитивно впливає на коефіцієнт корисної дії

формувача, обумовлюючи ефективність компенсації реактивної потужності, споживаної формувачем з мережі живлення.

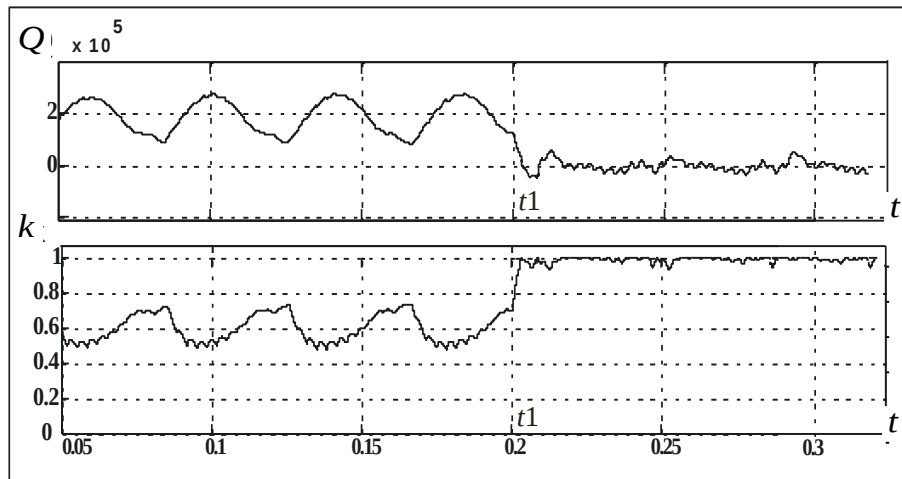


Рисунок 12 – Енергетичні показники формувача

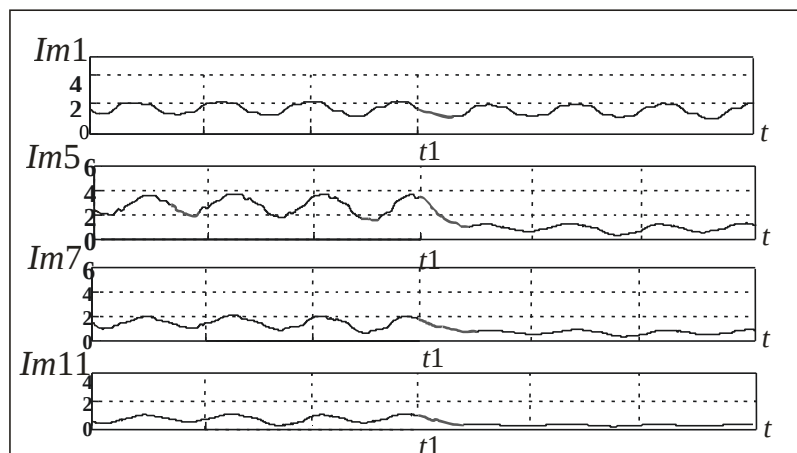


Рисунок 13 – Зміна амплітуд гармонік струму, що генеруються формувачем у мережу живлення

Відзначена можливість мікропроцесорної реалізації fuzzy-регулятора системи керування двоканальним компенсатором неактивних складових повної потужності на основі мікроконтролера спеціального призначення 68HC12 фірми Motorola з апаратною підтримкою нечіткої логіки. Отриманий програмний код на мовах C та Assembler у програмі Fuzzy Tech, який реалізує fuzzy-регулятор контуру регулювання гармонік струму мережі живлення компенсатора.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача створення енергоефективного багатофункціонального двоканального

напівпровідникового компенсатора неактивних складових повної потужності зі швидкодіючою цифровою системою керування та регулювання, що заснована на сучасних теоріях потужності, методах нечіткої логіки та прогнозних обчисленнях.

Основні наукові результати:

1. На основі системного аналізу засобів і пристроїв компенсації неактивних складових повної потужності теоретично обґрунтовано створення багатофункціональних енергоефективних компенсаторів неактивних складових повної потужності, що дозволяють успішно вирішувати задачу компенсації реактивної потужності, що генерується або споживається навантаженням, фільтрації вищих гармонік струму.

2. Розроблено принципи та методики побудови швидкодіючої цифрової багатоконтурної системи керування і регулювання двоканальним компенсатором, з використанням сучасних теорій потужності, нечітких обчислень та ідей керування за прогнозом, а також алгоритми керування низькочастотним каналом компенсатора при зміні характеру навантаження, що забезпечують високі динамічні характеристики компенсатора. Запропонована система керування забезпечує підтримання коефіцієнта потужності навантаження з компенсатором не нижче 0.98 і зниження амплітуд вищих гармонік струму мережі живлення на 50-60%.

3. Виконано синтез fuzzy-регулятор у складі системи керування компенсатором, застосування якого дає змогу в процесі компенсації реактивної потужності зменшити генерування в мережу вищих гармонік струму, не перевищуючи при цьому встановлений рівень комутаційних перенапруг. Розроблено методику вибору параметрів налаштування fuzzy-регулятора на основі методів багатовимірної оптимізації.

4. Розроблено мікропроцесорну систему керування двоканальним компенсатором на основі процесора загального призначення серії TMS та показано реалізацію контуру регулювання гармонік струму мережі живлення на основі процесора спеціального призначення 68HC12 фірми Motorola. Створено спеціальне програмне забезпечення - код на мовах C та Assembler.

5. Отримані результати є закінченими для використання при розрахунку параметрів силової схеми компенсатора неактивних складових повної потужності, розробці структури мікропроцесорної системи керування та регулювання, створення алгоритмів керування в реальному масштабі часу та їх програмної реалізації.

6. Результати проведених у дисертації теоретичних досліджень і практичних розробок знайшли застосування в Інституті іоносфери НАН та МОН України при вирішенні завдання поліпшення електромагнітної сумісності формувача потужних зондуєчих імпульсів вимірювального комплексу некогерентного розсіяння з мережею живлення, а також у дослідно-конструкторських роботах ДП НДІ «ХЕМЗ» при дослідженні способів поліпшення електромагнітної сумісності перетворювачів електричної енергії з мережею живлення та використовуються у навчальному процесі на

кафедрі радіоелектроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», при підготовці фахівців в галузі електроніки та спеціалізованих комп'ютерних систем.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кайда Е. А. (Левон Е. А.) Динамические характеристики двухмостового низкочастотного канала компенсатора неактивной мощности / И. Ф. Домнин, Е. А. Кайда // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЄДНАУ. – 2009. – Ч. 4, Тематичний вип. – С. 63-67.

Здобувачі належить розробка алгоритму керування та регулювання двомостовим випрямлячем каналу компенсації середнього значення реактивної потужності.

2. Кайда Е. А. (Левон Е. А.) Минимизация высокочастотных гармоник, генерируемых выпрямителем двухканального компенсатора неактивных составляющих полной мощности / И. Ф. Домнин, Е. А. Кайда, Л. Ф. Симонова // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ«ХП». – 2010. – №20. – С. 79-84.

Здобувачкою одержано залежності амплітуд вищих гармонік струму живлячої мережі від напруги на конденсаторі накопичувача.

3. Кайда Е. А. (Левон Е. А.) Многоконтурная система управления фильтрокомпенсирующим устройством / И. Ф. Домнин, Е. А. Кайда // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЄДНАУ. – 2010. – Ч. 2, Тематичний вип. – С. 44-47.

Здобувачкою виконано реалізацію контуру регулювання амплітуд вищих гармонік току живлячої мережі з використанням fuzzy-регулятора.

4. Кайда Е. А. (Левон Е. А.) Улучшение энергетических характеристик формирователей мощных зондирующих импульсов / И. Ф. Домнин, Е. А. Кайда // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЄДНАУ. – 2010. – Ч. 3, Тематичний вип. – С. 116-119.

Здобувачкою створено модель формувача потужних зондуєчих імпульсів, виконано дослідження енергетичних характеристик формувача.

5. Кайда Е. А. (Левон Е. А.) Нечеткое регулирование устройством компенсации неактивных составляющих полной мощности / Е. А. Кайда // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЄДНАУ. – 2011. – Ч. 1, Тематичний вип. – С. 184-188.

6. Левон Е. А. Выбор параметров цифрового нечеткого регулятора / И. Ф. Домнин, Е. А. Левон // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЄДНАУ. – 2012. – №2. – С.123-124 .

Здобувачі належить постановка задачі векторної оптимізації параметрів регулятора, вибір цільової функції та штрафних функцій.

7. Левон Е. А. Оптимизация параметров цифрового нечеткого регулятора / Е. А. Левон, И. Ф. Домнин, В. П. Северин // Технічна

електродинаміка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – Ч.2, Тематичний вип. – С. 91-94.

Здобувачці належить комп'ютерне моделювання процесу оптимізації параметрів цифрового нечіткого регулятора.

8. Levon O. O. Fuzzy logic based control system of converter for powerful sounding pulses generator / I. F. Domnin, O. O. Levon, V. V. Varvyanskaya // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ«ХПІ». – 2014. – № 47 (1089). – Р. 22-27.

Здобувачкою отримано результати проектування системи нечіткого логічного виводу в програмі FuzzyTech.

9. Пат. 57064 Україна, МПК (2011.01) H02J 3/01. Фільтрокомпенсуючий пристрій / Домнін І. Ф., Кайда Е. А. (Левон Е. А.); заявник Домнін Ігор Феліксович, Кайда Олена Олександрівна, власник Інститут Іоносфери. – №u201008664; заявл. 12.07.2010; опубл. 10.02.2011, Бюл. №3.

Здобувачкою отримано результати математичного моделювання контуру регулювання вищих гармонік струму живлячої мережі.

10. Кайда Е. А. (Левон Е. А.) Моделирование электромагнитных процессов системы электропитания формирователя мощных зондирующих импульсов в среде Matlab Simulink / Е. А. Кайда // Труды Междунар. научн. конф. [“Проектирование инженерных и научных приложений в среде Matlab”], (Харьков, 11-13 мая 2011 г.) / МОН Украины, компания Софтлайн трейд [и др.]. Харьков: НТУ «ХПИ» . – 2011. – С. 632-634.

АНОТАЦІЇ

Левон О. О. Напівпровідниковий двоканальний регульований компенсатор неактивних складових повної потужності. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2015.

Дисертація присвячена дослідженню і розробці методик поліпшення електромагнітної сумісності споживачів електричної енергії з мережею живлення, шляхом застосування енергоефективних багатофункціональних компенсаторів неактивних складових повної потужності, розробки структури та алгоритмів роботи цифрових багатоконтурних систем керування такими компенсаторами із застосуванням сучасних теорій потужності, методів керування за прогнозом і нечіткої логіки.

Розроблено fuzzy-регулятор у складі системи керування компенсатором, застосування якого дає змогу в процесі компенсації реактивної потужності зменшити генерування в мережу вищих гармонік струму, не перевищуючи при

цьому встановлений рівень комутаційних перенапруг. Розроблено методику вибору параметрів налаштування fuzzy-регулятора на основі методів багатовимірної оптимізації.

Розроблено мікропроцесорну систему керування двоканалним компенсатором на основі процесора загального призначення серії TMS та показано реалізацію контуру регулювання гармонік струму мережі живлення на основі процесора спеціального призначення 68HC12 фірми Motorola.

Ключові слова: компенсаційні випрямлячі, тиристорні компенсатори реактивної потужності, транзисторний інвертор, керований випрямляч, ємнісний накопичувач, система керування, якість електроенергії.

Левон Е. А. Полупроводниковый двухканальный регулируемый компенсатор неактивных составляющих полной мощности. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.12 – полупроводниковые преобразователи электроэнергии. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2015.

Диссертация посвящена исследованию и разработке методик улучшения электромагнитной совместимости потребителей электрической энергии с питающей сетью, путем применения энергоэффективных multifunctional компенсаторов неактивных составляющих полной мощности.

Выполнен анализ способов и устройств компенсации неактивной мощности в системах питания с нелинейной нагрузкой, способов управления компенсаторами неактивных составляющих полной мощности.

Предложен принцип комплексного подхода к решению задачи повышения качества электроэнергии питающей сети и улучшения электромагнитной совместимости нагрузки с питающей сетью.

Разработана и исследована компьютерная Matlab-модель полупроводникового компенсатора с цифровой системой управления и регулирования. Предложенные структура и алгоритм работы цифровой многоконтурной системы управления двухканальным полупроводниковым компенсатором обеспечивают эффективную работу компенсатора в условиях изменения характера нагрузки, высокую точность регулирования требуемых параметров электроэнергии питающей сети в точке подключения компенсатора.

Получили дальнейшее развитие теоретические положения и критерии выбора параметров силовой схемы двухканального компенсатора.

Показана целесообразность использования fuzzy-регулятора в составе дополнительного контура регулирования системы управления компенсатором по уровню коммутационных перенапряжений и амплитуд высших гармоник тока питающей сети, применение которого дает возможность в процессе компенсации реактивной мощности уменьшить генерирование в сеть высших

гармоник тока в 3-5 раз, не превышая при этом установленный уровень коммутационных перенапряжений. Выполнена оптимизация настроечных параметров нечеткого регулятора при которых возможно эффективное управление как уровнем амплитуд отдельно взятых гармоник тока питающей сети, так и коэффициентом гармоник в целом.

Выполнена микропроцессорная реализация алгоритма управления двухканальным компенсатором на основе процессора общего назначения серии TMS и реализация контура регулирования гармоник тока питающей сети на основе процессора специального назначения 68HC12 фирмы Motorola. Получен программный код на языках C и Assembler в программе Fuzzy Tech, реализующий fuzzy-регулятор контура регулирования гармоник тока питающей сети компенсатора.

Ключевые слова: компенсационные выпрямители, тиристорные компенсаторы реактивной мощности, транзисторный инвертор, управляемый выпрямитель, емкостной накопитель, система управления, качество электроэнергии.

Levon O. O. Semiconductor dual two-channel regulated compensator of inactive components of the total power. – Manuscript.

Thesis for a degree in speciality 05.09.12 – semiconductor converter power. – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2015.

The thesis is devoted to researching and developing of electromagnetic compatibility improve methods of electric power consumers with a power line, by applying energy effective multi compensators of total power inactive components and it connected with the development of such compensators digital multi-loop control system structures and algorithms with modern theories of power and predictive computing and fuzzy logic.

The possibility of compensator effective operation in changing load characteristics is considered, and high required parameters regulation accuracy of electricity supply network at the compensator connection point is shown.

A further development of theory and criteria for selecting parameters of the dual channel compensator power circuit is obtained.

The expediency of the fuzzy-controller use is shown, in additional control loop compensator control system on the level of switching overvoltages and amplitudes of the higher harmonics of supply network current, optimization of settings fuzzy controller is executed. A variant of the microprocessor implementation of the dual channel compensator control algorithm is proposed.

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



Підписано до друку 12.03.2015 р. Формат 60х90/16.
Гарнітура Times New Roman. Папір офсетний.
Друк – різнограф. Ум. друк. аркушів. 0,9
Наклад 100 прим. Зам. №

Надруковано у ТОВ «ПЛАНЕТА-ПРІНТ»
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 16
ЄДРПОУ 3125131 від 19.12.2000 р.