

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**

ПОДНЕБЕННА СВІТЛАНА КОСТЯНТИНІВНА

УДК 621.316.727

**ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО
КОМПЛЕКСУ «НЕЛІНІЙНЕ НАВАНТАЖЕННЯ – СИЛОВИЙ АКТИВНИЙ
ФІЛЬТР» В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ 0,4 кВ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Донецьк – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» Міністерства освіти і науки України, м. Маріуполь.

Науковий керівник: кандидат технічних наук
Бурлака Володимир Володимирович,
ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»
Міністерства освіти і науки України, доцент кафедри елек-
трифікації промислових підприємств, м. Маріуполь.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Гриб Олег Герасимович,
Національний технічний університет «Харківський політех-
нічний інститут»,
професор, завідувач кафедри автоматизації енергосистем,
м. Харків;

кандидат технічних наук, доцент
Нікіфоров Андрій Петрович,
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»,
доцент кафедри електричних станцій, м. Донецьк.

Захист відбудеться 13 лютого 2014 р. о 13-30 годині на засіданні спеціалізова-
ної вченої ради Д 11.052.02 при Державному вищому навчальному закладі «Донець-
кий національний технічний університет» за адресою: Україна, 83001, м. Донецьк,
вул. Артема 58, 8-й навчальний корпус, ауд. 8.514.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного вищого навчаль-
ного закладу «Донецький національний технічний університет» за адресою: Україна,
83001, м. Донецьк, вул. Артема 58, 2-й навчальний корпус.

Автореферат розісланий «___» _____ 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 11.052.02
к.т.н., доц.

А.М. Ларін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. За літературними даними втрати електроенергії в електричних мережах складають понад 10 %, що, при існуючій тенденції її подорожчання, обумовлює необхідність та актуальність підвищення енергоефективності електротехнічного комплексу з нелінійними навантаженнями. Останнім часом значно збільшилася доля нелінійних навантажень в електричних мережах 0,4 кВ, що загострило проблеми компенсації неактивних складових повної потужності, що споживаються такими навантаженнями. При цьому основну проблему складає потужність викривлень, що обумовлена вищими гармоніками споживаного навантаженнями струму.

Вищі гармоніки в мережі обумовлюють додаткові втрати енергії в електричних машинах та апаратах, негативно впливають на роботу пристроїв релейного захисту, автоматики та телемеханіки, викликають перенапруги внаслідок резонансних явищ.

Існує ряд способів зниження рівня вищих гармонік в мережі. У порівнянні з пасивними фільтрокомпенсуючими пристроями та пристроями для симетрування, найбільш ефективним в мережах 0,4 кВ на сьогоднішній день є використання активних фільтрів. В залежності від виконання фільтру, його можна підключити послідовно або паралельно навантаженню.

Проблемам підвищення якості електроенергії методами активної фільтрації присвячені праці вчених: Ю.К. Розанова, Г.Г. Жемерова, А.К. Шидловського, В.О. Волкова, І.В. Жежеленка, Zainal Salam, Tan Perng Cheng, J. Dixon, A. Moran, M. Salo, M. Gaiceanu, T.C. Green, J.H. Marks, G. Moleykutty, P.B. Kartik, R. Strzelecki, L.Czarnecky.

Незважаючи на широкі можливості активних фільтрів, їх практичне використання стримується через недостатнє дослідження енергетичної та економічної ефективності їх роботи у складі електротехнічного комплексу з нелінійними навантаженнями, високої вартості обладнання. У цьому зв'язку дана робота є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні результати дисертаційної роботи отримані автором у процесі його участі в якості виконавця держбюджетної науково-дослідної роботи відповідно до тематичного плану наукових досліджень ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» за темою № 1 (12) «Розробка наукових та технологічних основ створення енергоефективних зварювальних джерел живлення з інтегрованими функціями активної фільтрації вищих гармонік» (№ держреєстрації 0112U000499).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення енергоефективності електротехнічного комплексу «нелінійне навантаження – силовий активний фільтр».

Реалізація поставленої мети передбачала розв'язання таких **задач**:

1. Розробка математичних моделей електротехнічного комплексу «нелінійне навантаження – силовий активний фільтр» для дослідження електромагнітних процесів в ньому та оцінки його енергетичних параметрів.

2. Розробка методів і способів підвищення енергоефективності електротехнічного комплексу «нелінійне навантаження – силовий активний фільтр» за рахунок

зниження втрат у ньому і розробки алгоритмів управління, які забезпечують мінімізацію втрат потужності в електричній мережі.

3. Вибір енергетичних параметрів силового активного фільтра досліджуваного електротехнічного комплексу.

4. Підвищення ефективності компенсації реактивної потужності і потужності спотворень нелінійного навантаження за рахунок використання в системі управління силовим активним фільтром частотного розділення задач подавлення вищих гармонік струму: використання основного інвертору на низькій частоті та додаткової коригувальної ланки для усунення залишкових та високочастотних гармонік.

5. Розробка адаптивної системи управління силовим активним фільтром з урахуванням зміни параметрів електричної мережі та інтерфейсного фільтру.

6. Експериментальна перевірка розробленого силового активного фільтру в комплексі з нелінійними навантаженнями.

Об'єктом дослідження є електромагнітні процеси в електричній мережі, що обумовлені роботою нелінійного навантаження з силовим активним фільтром.

Предметом дослідження є управління електромагнітними процесами в електротехнічному комплексі «нелінійне навантаження – силовий активний фільтр» в мережі 0,4 кВ.

Методи досліджень. Розв'язання поставлених у дисертаційній роботі задач ґрунтується на фундаментальних законах електротехніки, теорії лінійних та нелінійних кіл, застосовується пряме і зворотне перетворення Фур'є; теорія чотириполосників; спектральні методи розрахунку кіл; частотні критерії стійкості системи автоматичного управління зі зворотними зв'язками; методи оцінки втрат потужності в інверторах напруги; математичний апарат аналізу і синтезу імпульсних систем автоматичного управління. Достовірність результатів підтверджується зіставленням результатів розрахунків за запропонованими методиками і розробленими моделями та експериментальними дослідженнями.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Отримав подальший розвиток метод підвищення енергоефективності електротехнічного комплексу «нелінійне навантаження – силовий активний фільтр», що полягає в тому, що втрати потужності в мережі зменшені за рахунок компенсації реактивної потужності та потужності викривлень, та що відрізняється тим, що втрати потужності в силовому активному фільтрі комплексу знижені за рахунок зменшення частоти перемикавання силових ключів інвертору.

2. Удосконалено систему автоматичного управління силовим активним фільтром комплексу «нелінійне навантаження – силовий активний фільтр» шляхом активної корекції похибки регулювання вихідного струму введенням до складу фільтру додаткової коригувальної ланки у вигляді керованого джерела ЕРС з пропорційним регулятором, що включається послідовно з конденсатором інтерфейсного фільтру та охопленого від'ємним зворотним зв'язком за вихідним струмом фільтру.

3. Вперше розроблено метод управління силовим активним фільтром з додатковою коригувальною ланкою з використанням системи управління основним інвертором з послідовною корекцією на базі швидкого перетворення Фур'є та системи з від'ємним зворотним зв'язком для додаткової коригувальної ланки, що дозволяє забезпечити високу швидкодію фільтру при мінімізації потужності цієї ланки.

4. Отримав подальший розвиток метод адаптації системи управління силовим активним фільтром з додатковою коригувальною ланкою до зміни індуктивностей інтерфейсного фільтру та мережі в точці підключення активного фільтру, що полягає в ітераційному підборі коефіцієнтів для послідовної корекції за умови мінімуму потужності додаткової коригувальної ланки, що дозволяє зменшити втрати потужності в електротехнічному комплексі «нелінійне навантаження – силовий активний фільтр» та електричній мережі.

Практичне значення мають:

1. Система управління силовим активним фільтром електротехнічного комплексу дозволяє в 3,5 – 4 рази зменшити частоту перемикання силових ключів при збереженні потрібної точності компенсації неактивних складових повної потужності нелінійних навантажень в електричній мережі 0,4 кВ за рахунок введення послідовної корекції.

2. Інженерна методика вибору потужності силового активного фільтру в залежності від активної потужності нелінійного навантаження та її коефіцієнту потужності, а також потрібного коефіцієнту потужності електротехнічного комплексу «нелінійне навантаження – силовий активний фільтр».

3. Силовий активний фільтр з додатковою коригувальною ланкою та двоканальна система управління ними дозволяють підвищити ефективність електротехнічного комплексу «нелінійне навантаження – силовий активний фільтр» за рахунок зменшення втрат в силовому активному фільтрі, можливості використання елементної бази зі зменшеним класом напруги у додатковій коригувальній ланці і при цьому підвищити якість подавлення вищих гармонік струму нелінійних навантажень.

Промислове випробування розробки в умовах Маріупольського ПЕМЗО «Міськвітло» і ТОВ «Черметавтоматика Маріуполь» підтвердило її ефективність для промислового використання.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, що містяться у дисертації, отримані здобувачем самостійно і полягають у вирішенні поставлених науково-практичних задач, розробці математичних моделей електротехнічного комплексу «нелінійне навантаження – силовий активний фільтр», розробці методів і способів підвищення енергоефективності електротехнічного комплексу за рахунок зниження втрат у ньому і розробки алгоритмів управління та методик вибору енергетичних параметрів силового активного фільтра електротехнічного комплексу, розробці адаптивної системи управління силовим активним фільтром з урахуванням зміни параметрів електричної мережі і інтерфейсного фільтру, експериментальній перевірці розробленого силового активного фільтру електротехнічного комплексу.

Апробація результатів дисертації. Матеріали роботи доповідались на міжнародних науково-технічних конференціях «Університетська наука» (м. Маріуполь, ПДТУ, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 гг.), II-й міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано-та мікроелектроніки» (м. Чернівці, Чернівецький національний університет імені Ю. Федьковича, 2012), Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених та студентів з міжнародною участю (м. Миколаїв, НУК, 2012), Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод» (м. Краматорськ, Донбаська державна машино-

будівна академія, 2012), Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених та студентів «Енергетика, енергозбереження» (м. Маріуполь, Приазовський державний технічний університет, 2013), 9-й Міжнародній молодіжній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій РТ-2013» (м. Севастополь, Севастопольський національний технічний університет, 2013), 17-му Міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті» (м. Харків, Харківський національний університет радіоелектроніки, 2013), XI Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених та спеціалістів «Електро-механічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації» (м. Кременчук, Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського, 2013), II Міжгалузевій науково-практичній конференції молодих вчених і фахівців в області проектування підприємств гірничо-металургійного комплексу, енерго- та ресурсозбереження, захисту навколишнього природного середовища «Інноваційні шляхи модернізації базових галузей промисловості, енерго- та ресурсозбереження, охорона навколишнього природного середовища» (м. Харків, Державне підприємство «Український науково-технічний центр металургійної промисловості «Енергосталь», 2013), VI Міжнародній науково-технічній конференції «Управління режимами роботи об'єктів електричних і електромеханічних систем - 2013 (КРЕС - 2013)» (м. Донецьк, Донецький національний технічний університет, 2013), Всеукраїнській науковій інтернет-конференції «Сучасна наука - інструмент динамічного розвитку економіки України» (м. Тернопіль, Тернопільський національний економічний університет, 2013), науково-практичній конференції молодих вчених та студентів «Наукові дослідження молоді - інновації в науці та практиці» (м. Маріуполь, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет, 2013).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 23 наукові праці, у тому числі 1 стаття у закордонному фаховому журналі, що входить до наукометричної бази SCOPUS, 6 статей у наукових фахових виданнях України, 15 тез доповідей на Всеукраїнських та міжнародних конференціях, отримано 1 патент України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків. Повний обсяг дисертаційної роботи складає 198 сторінок, з них 143 сторінки основного тексту, 101 рисунок за текстом, 4 таблиці, 122 найменування використаних джерел на 15 сторінках, 5 додатків на 40 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «Аналіз існуючих методів підвищення енергоефективності електротехнічного комплексу «нелінійне навантаження – силовий активний фільтр» в електричних мережах 0,4 кВ» розглянуті причини зменшення енергоефективності електротехнічних комплексів з нелінійними навантаженнями через погіршення якості електроенергії, проведено огляд існуючих стандартів, що нормують показники якості електроенергії. Розглянуто найбільш поширені методи підвищення якості електроенергії: раціонального розподілу навантажень, встановлення пасивних і активних фільтрів, кожен з яких має свою область застосування, свої переваги і недоліки.

Для підвищення якості електроенергії в мережах 0,4 кВ поширення набули силові паралельні активні фільтри (САФ), основним достоїнством яких є можливість

адаптації до змінюваних нелінійних навантажень. В результаті розгляду існуючих принципів побудови САФ сформульовані основні їх недоліки: обмежена швидкість зміни вихідного струму, викликана наявністю інтерфейсного фільтра (ІФ) та наявність у вихідному струмі модуляційної складової на частоті перемикання силових ключів інвертору напруги (ІН).

На підставі проведеного критичного аналізу обґрунтовано напрями досліджень, які полягають у необхідності зменшення втрат потужності у електротехнічному комплексі за рахунок зменшення частоти перемикання САФ комплексу, зміни структури ІФ, розробці системи управління та методик вибору потужності САФ, що забезпечуватимуть мінімізацію втрат потужності в електричній мережі.

У другому розділі «Дослідження електротехнічного комплексу «нелінійне навантаження – силовий активний фільтр» розглянуто електротехнічний комплекс, що складається з нелінійного навантаження та САФ, який може бути підключений так, як показано на рис. 1.

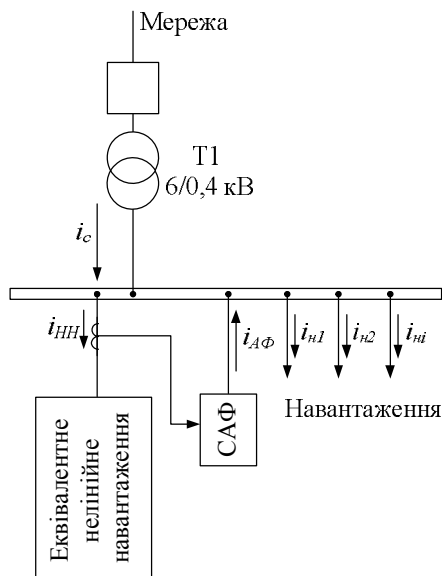


Рисунок 1. Спрощена схема підключення САФ у складі електротехнічного комплексу з нелінійними навантаженнями

САФ представляє собою ІН, утворений 6-транзисторним трифазним мостом, який отримав найбільше поширення в мережах 0,4 кВ, з ланкою постійного струму (ЛПС). Спрощена схема САФ наведена на рис. 2.

Перетворення напруги ЛПС в змінну досягається за допомогою групи ключів, які періодично комутуються таким чином, щоб отримати необхідну напругу на вході ІФ та забезпечити необхідний вихідний струм САФ. В якості ключів в САФ зазвичай використовуються транзистори IGBT. Формування сигналів управління ними здійснюється за допомогою засобів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) з трикутною несучою. У результаті аналізу алгоритмів управління САФ обраний частотний метод управління, заснований на швидкому перетворенні Фур'є (ШПФ). Це дозволило реалізувати СУ з послідовною корекцією.

Застосування частотних методів управління обмежує можливість подавлення інтергармонік і субгармонік САФ, проте у роботі прийнято припущення, згідно з яким рівні неканонічних гармонік вважаються малими настільки, що значного впливу на рівень несинусоїдальності не чинять.

Проведено аналіз залежності втрат потужності в мережі від розподілу навантаження по фазах у разі несиметричної і/або викривленої мережевої напруги. Встановлено, що мінімум втрат потужності досягається, коли комплекс «нелінійне навантаження – силовий активний фільтр» по відношенню до мережі представляє активне навантаження з рівними фазними опорами, незалежно від коефіцієнту несиметрії напруг живлення та їх спектрального складу. Результати аналізу використані при розробці алгоритмів функціонування системи управління САФ. Поліпшення енергетики електротехнічного комплексу досягається за рахунок зменшення втрат шляхом зниження частоти перемикання силових ключів ІН в силовій частині САФ.

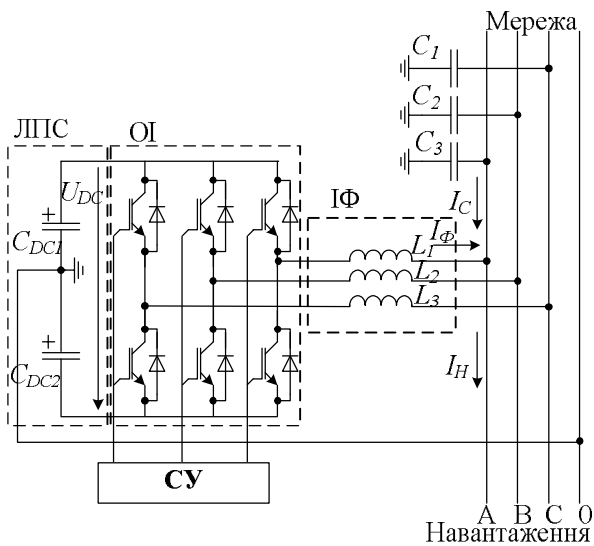


Рисунок 2. Схема САФ

У зв'язку з цим такий фільтр нездатний відпрацьовувати високочастотні гармоніки з великими амплітудами. Таким чином, для ефективної роботи САФ потрібне виконання наступних умов:

- ІФ повинен подавляти модуляційні складові на частоті перемикання ключів інвертора і всіх комбінаційних частотах;
- ІФ повинен бути «прозорим» для вищих гармонік струму навантаження.

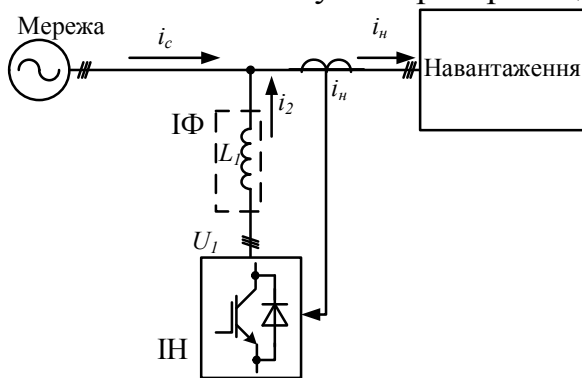


Рисунок 3. Схема підключення САФ з ІФ першого порядку

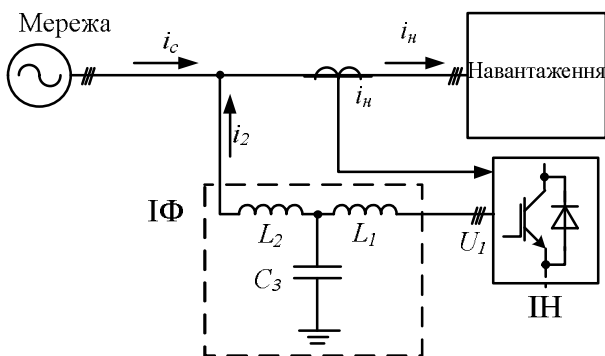


Рисунок 4. Схема підключення САФ з ІФ третього порядку

Це також дає можливість реалізувати САФ з більшим вихідним струмом при незмінній потужності втрат.

Зменшення динамічних втрат призводить до того, що спектр модуляційних складових в струмі САФ зміщується в бік низьких частот. При цьому використання ІФ першого порядку (рис. 3) не дозволяє отримати прийнятні показники якості роботи САФ, оскільки для збереження рівня модуляційних складових у вихідному струмі САФ (зазвичай не більше 20 %) необхідно збільшити індуктивність ІФ, що призведе до зниження максимальної швидкості зміни вихідного струму САФ.

Для ефективного подавлення модуляційних складових в вихідному струмі САФ може бути використаний ІФ більш високого порядку, зокрема, третього, схема підключення якого наведена на рис. 4. Підвищення ефективності подавлення складових на частоті перемикання інвертора проілюстровано на рис. 5, з якого видно, що АЧХ ІФ третього порядку в області високих частот характеризується більшим коефіцієнтом ослаблення у порівнянні з ІФ першого порядку.

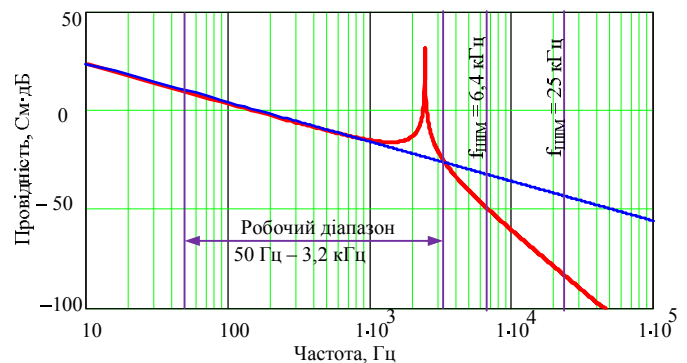


Рисунок 5. Частотні характеристики ІФ першого та третього порядків

Однак разом з цим у робочому діапазоні частот з'являється нерівномірність АЧХ, обумовлена резонансним характером ІФ, яку потрібно враховувати.

Властивості САФ досліджені на розробленій автором моделі електротехнічного комплексу, узагальнена схема якого наведена на рис. 6.

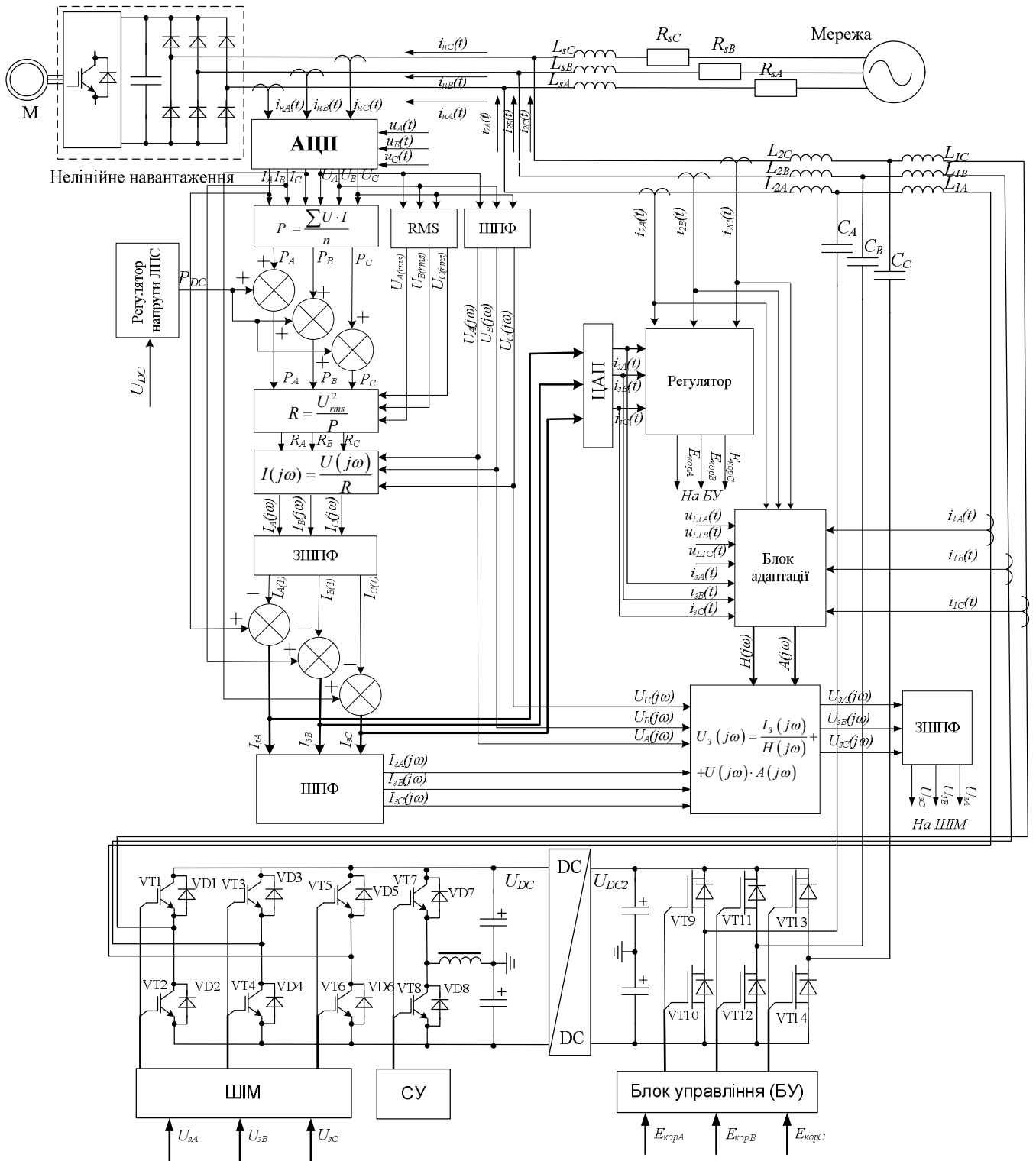


Рисунок 6. Узагальнена схема досліджуваного електротехнічного комплексу

Урахування інерційності ІФ виконується при формуванні напруги на виході інвертора САФ, для визначення компоненти спектру якого отримано вираз:

$$U_1(j\omega) = U_c(j\omega) \cdot (L_1 \cdot C_3 \cdot (j\omega)^2 + 1) + I_{зад}(j\omega) \cdot (L_1 L_2 C_3 (j\omega)^3 + (L_1 + L_2)j\omega), \quad (1)$$

де $U_c(j\omega)$ – спектр напруги мережі, $I_{зад}(j\omega)$ – спектр струму САФ, що інjektується; L_1, L_2, C_3 – параметри ІФ третього порядку;

$$I_{зад}(j\omega) = U_c(j\omega)/R - I_n(j\omega), \quad (2)$$

де $I_n(j\omega)$ – спектр струму навантаження, R – імітований активний опір.

Для отримання спектрів струму і напруги використано ШПФ. Вираз (1) дозволяє врахувати частотну характеристику ІФ в СУ ІН. Опорна напруга для генератора ШІМ формується як зворотне перетворення Фур'є (ЗШПФ) від $U_1(j\omega)$.

Для математичного моделювання нелінійне навантаження вводиться до моделі як джерело струму, що задається масивом вибірок. Взятो струм перетворювача частоти Danfoss з вихідною потужністю близько 23 кВт. На рис. 7 наведено діаграми струмів (а, в) та спектр струму мережі (б, г) в режимах без урахування інерційності ІФ (а, б) та з її врахуванням (в, г).

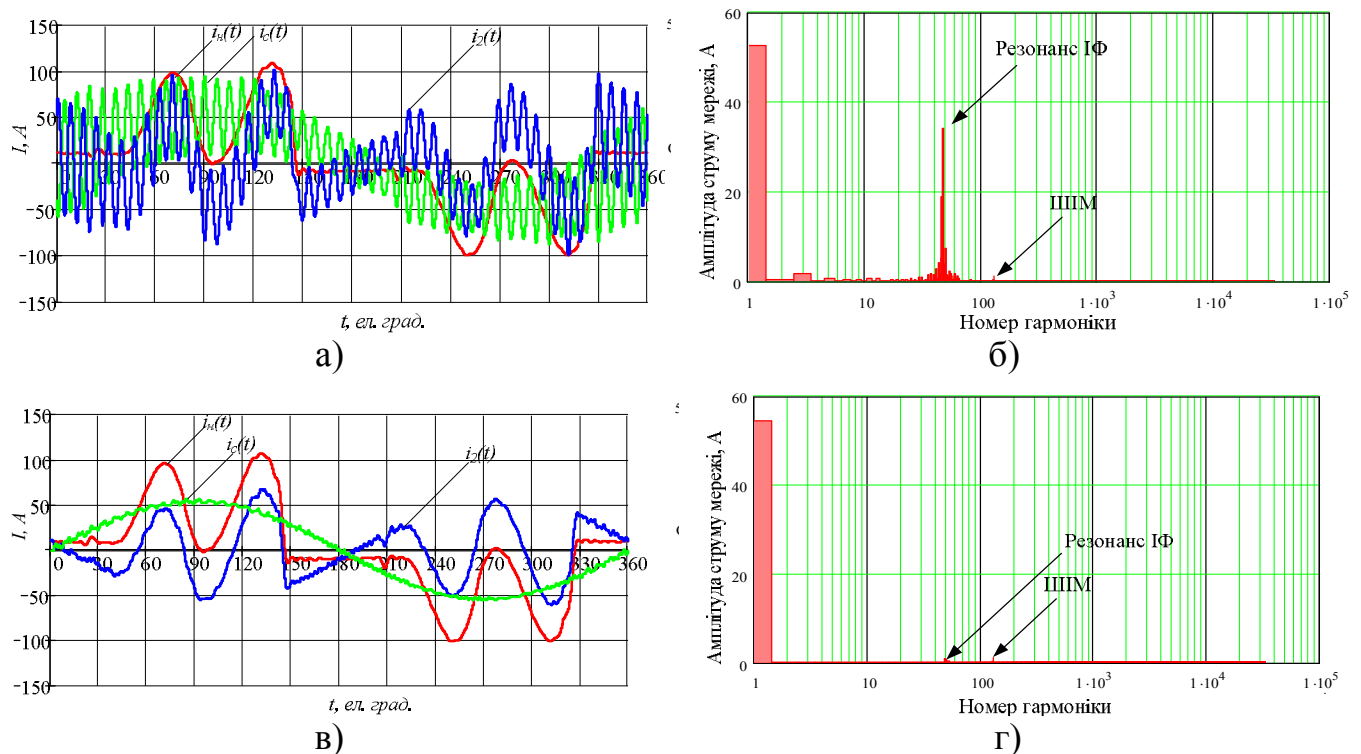


Рисунок 7. Ефективність урахування інерційності ІФ

Зміна параметрів ІФ та імпедансу мережі призводить до зниження ефективності урахування інерційності ІФ паралельного САФ, що зумовлено високою чутливістю системи управління до параметрів ІФ. Це виражається в недостатньому подавленні вищих гармонік струму і зростанню ТНД струму мережі. Таким чином, виникає необхідність додаткової корекції вихідного струму фільтра з метою забезпечення ефективної роботи САФ зі зниженою частотою перемикання ключів ІН.

У третьому розділі «Розробка системи корекції похибки регулювання вихідного струму силового активного фільтра» для зменшення похибки регулювання вихідного струму САФ до його складу введена додаткова коригувальна ланка (ДКЛ). Розглянуто декілька варіантів підключення ДКЛ, що працює в режимі джерела ЕРС: підключення її послідовно з вихідною індуктивністю ІФ L_2 (рис. 8), або послідовно з конденсатором ІФ C_3 (рис. 9).

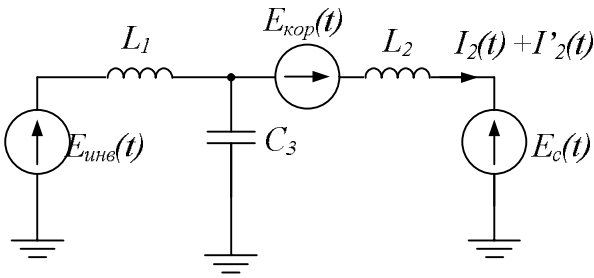


Рисунок 8. Підключення ДКЛ послідовно з вихідною індуктивністю L_2

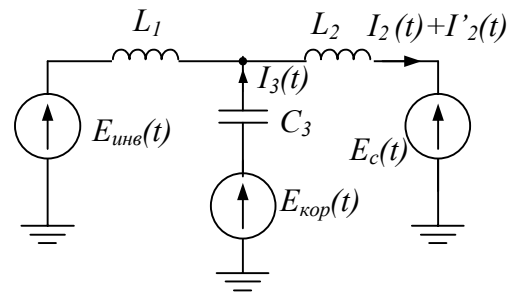


Рисунок 9. Підключення ДКЛ послідовно з конденсатором C_3

Для кожного з розглянутих варіантів підключення розраховано коефіцієнт передачі $Y(j\omega)$, та знайдена величина ЕРС ДКЛ:

$$E_{кор}(j\omega) = I'_2(j\omega)/Y(j\omega), \quad (3)$$

де $I'_2(j\omega)$ – спектр часткового струму корекції, який знаходиться як перетворення Фур'є від різниці струму завдання основного ІН $I_{зад}(t)$ і часткового струму САФ $I_2(t)$, що обумовлений дією ЕРС інвертора $E_{инв}(t)$ і ЕРС мережі $E_c(t)$.

На основі математичного моделювання встановлено, що ДКЛ має найбільшу ефективність (найменшу повну потужність) при підключенні послідовно з конденсатором інтерфейсного фільтра.

Однією з переваг такого включення ДКЛ є зниження вимог до її вихідної напруги, що дозволяє виконати цю ланку із застосуванням MOSFET транзисторів, які мають кращі динамічні властивості в порівнянні з IGBT, крім того, такий варіант дає можливість використовувати загальну «землю» в СУ основним ІН та ДКЛ.

У четвертому розділі «Підвищення ефективності електротехнічного комплексу «нелінійне навантаження – силовий активний фільтр» встановлено, що наявність у СУ обчислювача ЕРС корекції з урахуванням інерційності ІФ та резонансний характер останнього обумовлюють високу чутливість СУ до змін параметрів ІФ. З метою зниження чутливості СУ САФ з ДКЛ синтезована система управління з від'ємним зворотним зв'язком по вихідному струму фільтра.

Для підвищення енергоефективності електротехнічного комплексу «нелінійне навантаження – силовий активний фільтр» розроблено методику, що дозволяє визначити потужність САФ $S_{АФ}$ в залежності від потужності навантаження P_n , вихідного (PF) та бажаного ($PF_{жс}$) коефіцієнтів потужності та ТНД струму навантаження (THD_I). Отримано вираз для знаходження відносної потужності САФ (або іншого компенсатора неактивних складових повної потужності):

$$\frac{S_{АФ}}{P_n} = \sqrt{\frac{1}{PF^2} - 1} - \sqrt{\frac{1}{PF_{жс}^2} - 1}. \quad (4)$$

При необхідності компенсації тільки вищих гармонік струму потужність САФ має обиратися з урахуванням ТНД струму навантаження (THD_I):

$$S_{АФ} = D = \frac{P_n}{PF} \cdot \frac{THD_I}{\sqrt{1 + THD_I^2}}. \quad (5)$$

При необхідності компенсації тільки реактивної потужності, потужність САФ має обиратися згідно з виразом:

$$S_{A\Phi} = Q = \frac{P_n}{PF} \sqrt{1 - PF^2 \cdot (1 + THD_1^2)}. \quad (6)$$

При неможливості проведення вимірів та аналізу струму нелінійного навантаження приблизний вибір потужності САФ можна виконати за типовими характеристиками.

Отримані вирази для обчислення та вибору параметрів ІФ третього порядку:

$$L_1 = \frac{U_{DC}}{2 \cdot \Delta I_{\max} \cdot f_{ШИМ}}; \quad L_2 = U_{DC2} / \left(\frac{dI_{2\max}}{dt} \right); \quad C_3 = \frac{(L_1 + L_2)}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_{рез}^2 \cdot L_1 \cdot L_2}, \quad (7)$$

де ΔI_{\max} – максимальна амплітуда пульсацій струму інвертора, А; U_{DC} – напруга ЛПС основного інвертора САФ, В; $\frac{dI_{2\max}}{dt}$ – максимальна швидкість зміни вихідного струму фільтра, А/с; U_{DC2} – напруга живлення ЛПС ДКЛ, В; $f_{рез}$ – резонансна частота ІФ, Гц.

Отримано вираз для визначення мінімально необхідної ємності конденсатора ЛПС САФ при відомій потужності навантаження:

$$C = S \cdot T / (2 \cdot \Delta U_{DCp-p} \cdot \Delta U_{DCcp}), \quad (8)$$

де U_{DCp-p} – розмах пульсацій напруги ЛПС, В; U_{DCcp} – середня напруга ЛПС, В; S – повна потужність навантаження, ВА; T – період мережі, с.

Для ефективної роботи САФ потрібне точне вимірювання параметрів ІФ та адаптація системи управління САФ до зміни їх та параметрів електричної мережі. В якості критерія адаптації прийнятий мінімум потужності ДКЛ, оскільки він буде досягнутий за умови правильного урахування параметрів ІФ.

Для знаходження індуктивності дроселя ІФ L_1 вимірюється напруга на ньому та вихідний струм інвертора. Індуктивність L_1 розраховується за формулою:

$$L_1 = U_{m(ШИМ)} / (2 \cdot \pi \cdot f_{ШИМ} \cdot I_{m(ШИМ)}), \quad (9)$$

де $I_{m(ШИМ)}$ – амплітуда складової струму на частоті ШІМ, А; $U_{m(ШИМ)}$ – амплітуда складової напруги на частоті ШІМ, В.

Величина L_2 , яка використовується при розрахунку напруги завдання інвертора, складається з індуктивності дроселя L_2 ІФ і індуктивності мережі в точці підключення САФ, і є змінною величиною. Тому в СУ додатково включений блок адаптації, що реалізує ітеративний алгоритм пошуку індуктивності L_2 . Це дозволяє мінімізувати втрати потужності в ДКЛ шляхом мінімізації її напруги живлення.

На рис. 6 наведена узагальнена схема електротехнічного комплексу «нелінійне навантаження – силовий активний фільтр» з ДКЛ та модифікованою СУ з від'ємним зворотним зв'язком по вихідному струму САФ та блоком адаптації. Використання системи реального часу для ДКЛ дозволяє підвищити точність відпрацювання вихідного струму САФ, зменшити чутливість до зміни параметрів ІФ та мережі.

У п'ятому розділі «Експериментальне дослідження електротехнічного комплексу, що містить силовий активний фільтр з додатковою коригувальною ланкою» розглянуті технічні рішення описаних теоретичних алгоритмів. Основний інвертор утворений шістьма IGBT транзисторами, що управляються за допомогою мікросхем-драйверів. ІН підключений до мережі через ІФ третього порядку.

Для перевірки коректності підходу до проектування САФ, що полягає в розділенні завдань між основним інвертором САФ і ДКЛ, в якості силової частини ДКЛ у практичній реалізації використаний лінійний підсилювач, що не суперечить теоретичним положенням, оскільки ДКЛ являє собою кероване джерело ЕРС. У промислових умовах найбільш ефективно виконання ДКЛ у вигляді високочастотного низьковольтного інвертора. СУ ДКЛ виконана в аналоговому вигляді (рис. 10).

Запропоновані рішення дозволили використовувати низьковольтну ДКЛ, силова частина якої виконана на мікросхемі TDA7293, що представляє собою підсилювач потужності з напругою живлення до ± 50 В та вихідним струмом до 10 А.

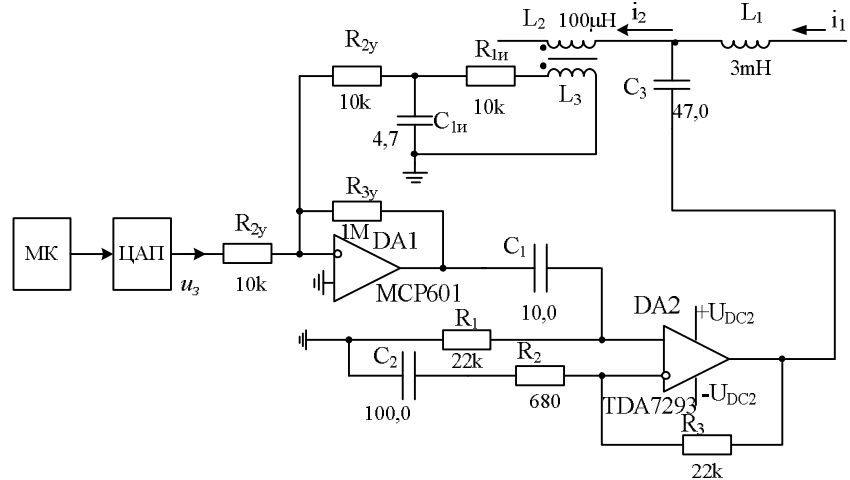


Рисунок 10. Практична реалізація ДКЛ та її СУ

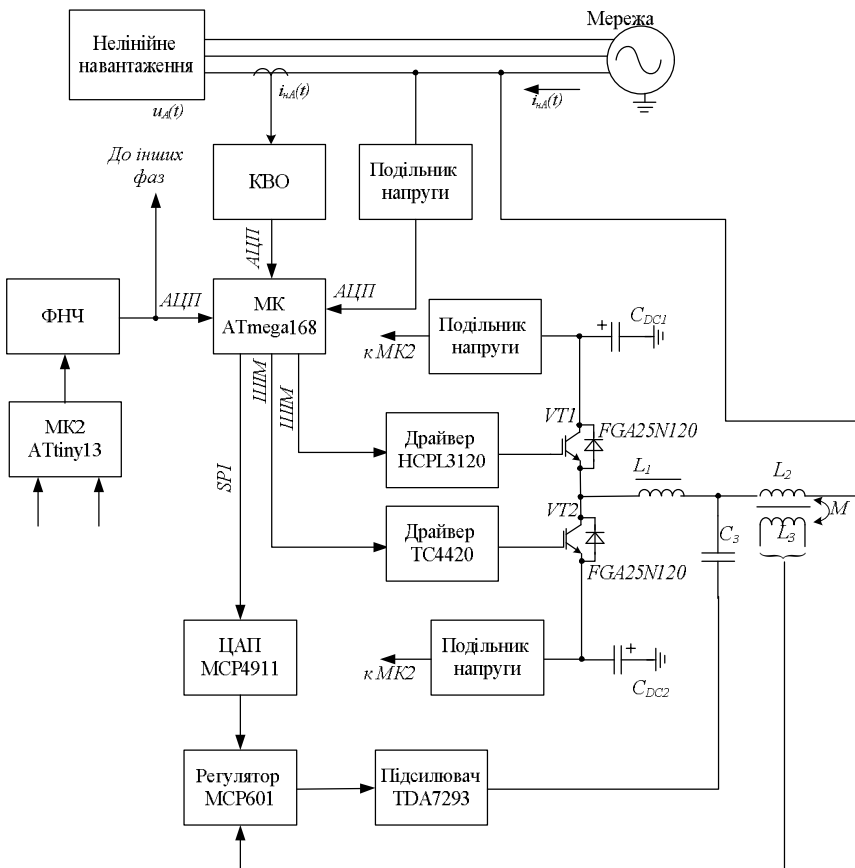


Рисунок 11. Структурна схема СУ САФ та його силової частини на одну фазу

Вимірювання струму навантаження здійснено за допомогою трансформаторів TZ75L2, навантажених на конвертори від'ємного опору (КВО).

Частотні характеристики отриманої замкненої системи в робочому діапазоні САФ мають лінійний характер. Розрахунковий запас стійкості по фазі для СУ ДКЛ становить 27° . Проведено експериментальні дослідження в умовах лабораторії теоретичних основ електротехніки ДВНЗ "ПДТУ". Експериментальний САФ зібраний з трьох фазних модулів, що мають загальний вузол вимірювання та стабілізації напруги ЛПС. Спрощена схема САФ для однієї фази наведена на рис. 11. СУ основним інвертором виконана на однокристальному мікроконтролері ATmega168.

САФ випробувано в режимах з включеним і відключеним ДКЛ. Осцилограми струмів при роботі САФ при використанні в якості нелінійного навантаження трифазного випрямляча без згладжування з активним навантаженням наведені на рис. 12. Осцилограми струмів при роботі САФ з трифазним мостовим випрямлячем з ємнісним фільтром в якості навантаження наведені на рис. 13.

Результати підтвердили коректність теоретичних положень, викладених у роботі і показали відповідність параметрів роботи САФ розрахунковим.

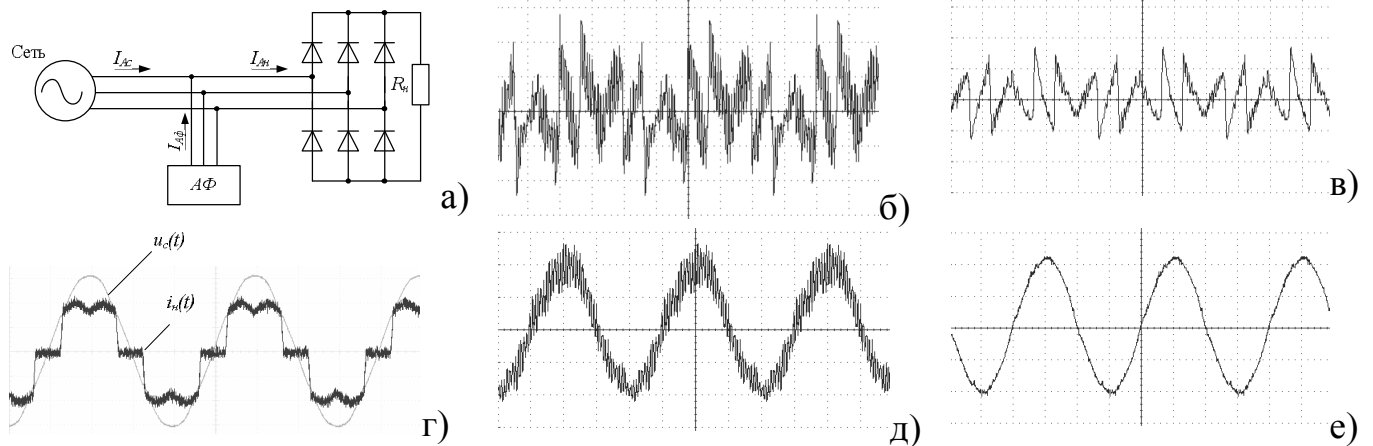


Рисунок 12. Схема а) та осцилограми: г) – струму навантаження, $\text{THD}_{\text{IH}} = 29\%$ та напруги мережі, $\text{THD}_{\text{Uc}} = 2,5\%$; б) – вихідного струму САФ без ДКЛ; в) – вихідного струму САФ з ДКЛ; д) – струму мережі при роботі САФ без ДКЛ, $\text{THD}_{\text{Ic}} = 6,7\%$; е) – струму мережі при роботі САФ з ДКЛ $\text{THD}_{\text{Ic}} = 2,9\%$

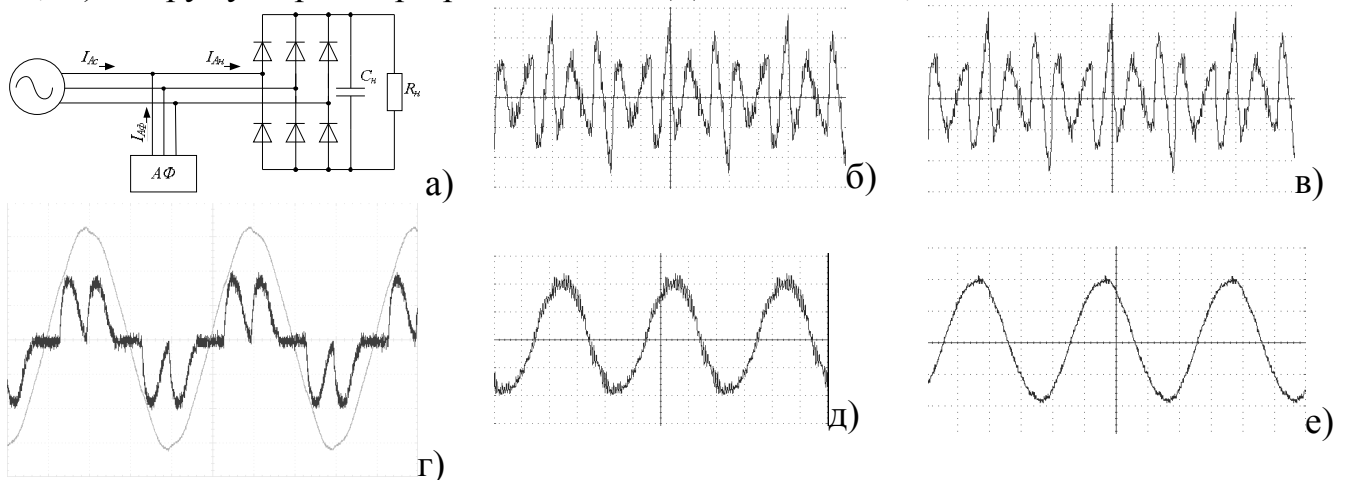


Рисунок 13. Схема а) та осцилограми: г) – струму навантаження, $\text{THD}_{\text{IH}} = 57\%$ та напруги мережі, $\text{THD}_{\text{Uc}} = 2,5\%$; б) – вихідного струму САФ без ДКЛ; в) – вихідного струму САФ з ДКЛ; д) – струму мережі при роботі САФ без ДКЛ, $\text{THD}_{\text{Ic}} = 6,3\%$; е) – струму мережі при роботі САФ з ДКЛ $\text{THD}_{\text{Ic}} = 2,5\%$

Проведено аналіз енергоефективності комплексу «нелінійне навантаження – паралельний активний фільтр», в якості критерію прийнято зменшення втрат активної потужності в силовому активному фільтрі. Для цього проведено розрахунок втрат в запропонованій структурі САФ з ДКЛ. Досліджено роботу основного ІН на частоті 25 кГц з ІФ першого порядку та роботу основного ІН на частоті 6,4 кГц з ІФ третього порядку та ДКЛ, що працює в режимі ІН на частоті 50 кГц. В якості силових ключів основного ІН проаналізовано використання IGBT типів IRG7PH73K10,

IXYN82N120C3, SKM50GB12V, FGA25N120ANTD, в якості силових ключів ДКЛ використані MOSFET IRFP4568. Напруги живлення: основний ІН: ± 400 В, ДКЛ: ± 50 В. Отримані результати наведені на рис. 14.

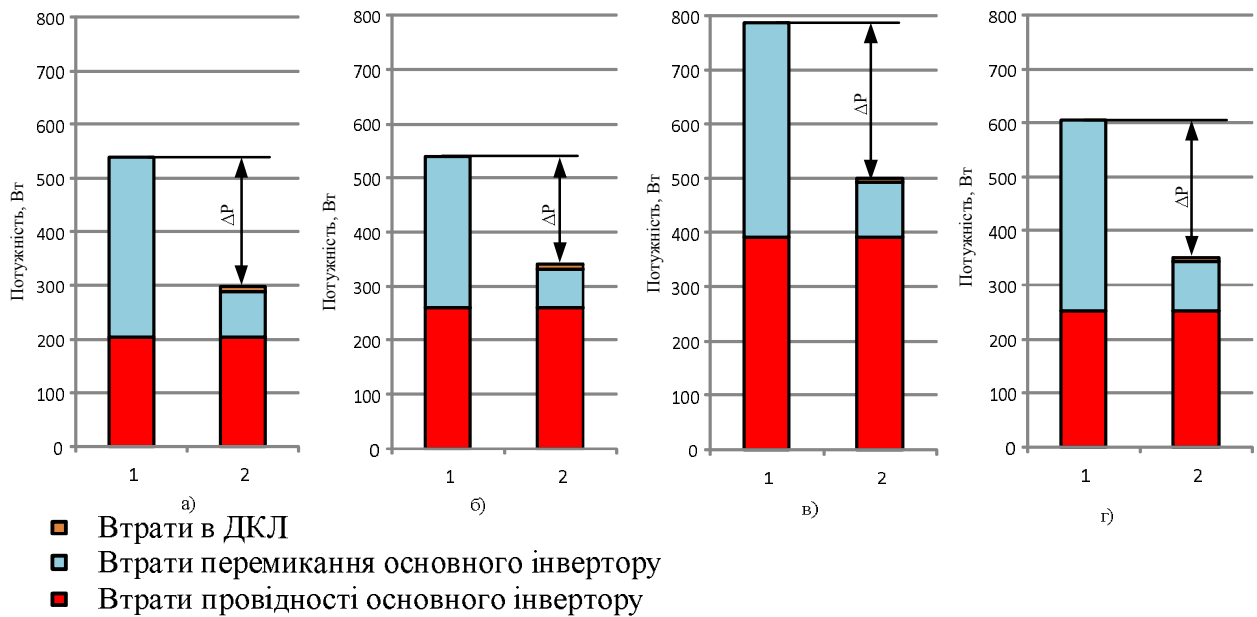


Рисунок 14. Втрати потужності в САФ: 1 – частота перемикання основного ІН 25 кГц, 2 – частота перемикання основного ІН 6,4 кГц: а) IRG7PH73K10; б) IXYN82N120C3; в) SKM50GD125D; г) FGA25N120ANTD

Результати показали, що використання запропонованого в роботі підходу до побудови САФ дозволяє на 30 – 40 % зменшити втрати активної потужності в ньому при збереженні рівня подавлення вищих гармонік струму.

Проведено аналіз економічної ефективності електротехнічного комплексу «нелінійне навантаження – силовий активний фільтр» на прикладі підстанції ПС1 ДП «Маріупольський морський торговельний порт». Розраховано, що застосування запропонованих у роботі підходів дозволяє вирішити задачі компенсації реактивної потужності та вищих гармонік струму і уникнути резонансних перенапружень, викликаних використанням частотного приводу, з терміном окупності близько 0,74 року та економічному ефекті понад 226 тис. грн. на рік.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-практична задача підвищення енергоефективності електротехнічного комплексу «нелінійне навантаження – силовий активний фільтр» за рахунок зменшення частоти перемикання силових ключів інвертору, удосконалення системи управління та модифікації силової частини фільтра.

Основні наукові і практичні результати полягають у такому:

1. У дисертаційній роботі дане нове рішення науково-практичної задачі підвищення енергоефективності електротехнічного комплексу «нелінійне навантаження – силовий активний фільтр» за рахунок розділення задач подавлення вищих гармонік струму в низько- та високочастотному діапазонах між основним інвертором і

введеною до складу силового активного фільтра додатковою коригувальною ланкою і мінімізації частоти перемикання силових ключів з урахуванням інерційності інтерфейсного фільтра.

2. Розроблено алгоритм управління силовим активним фільтром електротехнічного комплексу на основі швидкого перетворення Фур'є з урахуванням динамічних властивостей (інерційності) інтерфейсного фільтра силового активного фільтра, який забезпечує мінімізацію втрат потужності в електричній мережі.

3. Розроблена двоканальна адаптивна система управління силовим активним фільтром з додатковою коригувальною ланкою, що дозволяє підвищити швидкодію активного фільтра, поліпшити подавлення вищих гармонік і забезпечити подавлення модуляційних складових в вихідному струмі фільтра до частот близько 70 кГц.

4. Розроблено методику визначення енергетичних параметрів активного фільтра у складі електротехнічного комплексу «нелінійне навантаження – силовий активний фільтр», яка дозволяє мінімізувати встановлену потужність активного фільтра за рахунок розділення задач подавлення вищих гармонік струму і компенсації реактивної потужності на основній частоті.

5. Розроблено методику визначення параметрів активного фільтра, яка забезпечує мінімізацію втрат потужності в додатковій коригувальній ланці.

6. Розроблено систему регулювання напруги живлення додаткової коригувальної ланки, що дозволяє знизити її споживану потужність до 7 разів залежно від спектрального складу вихідного струму силового активного фільтра.

7. Результати досліджень пройшли дослідно-промислово апробацію в умовах Маріупольського ПЕМЗО «Міськсвітло» і ТОВ «Черметавтоматика Маріуполь». Результати випробувань показали зниження коефіцієнта несинусоїдальності струму мережі з 7 % до 2 % при включенні додаткової коригувальної ланки і відповідність динамічних параметрів розробленого силового активного фільтра заявленим. Коефіцієнт несинусоїдальності струму навантаження становив 35 – 37 %, коефіцієнт несинусоїдальності напруги мережі становив 5 – 6 %. В якості навантаження використовувалися світильники з лампами ДНаТ-250.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Поднебенная С.К. Силовой параллельный активный фильтр с повышенной эффективностью / С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака, С.В. Гулаков // Электротехника. – М.: Знак, 2013. – № 6. – С. 15 – 20.

2. Поднебенная С.К. Двухступенчатый силовой параллельный активный фильтр / С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака, С.В. Гулаков // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка та енергетика». – Донецьк: ДонНТУ. – 2013. – № 1(14). – С. 222 – 226.

3. Поднебенная С.К. Совершенствование системы управления параллельным активным фильтром / С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака, С.В. Гулаков // Науковий вісник Чернівецького університету: збірник наук. праць. Фізика. Електроніка. – Т. 2, Вип. 1. – Чернівці: Чернівецький національний університет, 2012. – С. 44 – 47.

4. Поднебенная С.К. Снижение уровня помех, генерируемых сварочными источниками питания при помощи параллельного активного фильтра с повышенной

ефективністю / С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака, С.В. Гулаков // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2012. – № 3 (28). – С. 221 – 225.

5. Бурлака В.В. Параллельный активный фильтр с повышенным коэффициентом подавления высших гармоник тока / В.В. Бурлака, С.В. Гулаков, С.К. Бублик (Поднебенная), М.Д. Дьяченко // Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук. пр. – Маріуполь: ПГТУ, 2009. – Вип. 19. – С. 237 – 241.

6. Гулаков С.В. Снижение уровня помех, генерируемых сварочными источниками питания / С.В. Гулаков, В.В. Бурлака, С.К. Бублик (Поднебенная), М.Д. Дьяченко // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: Зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2010. – №2 (19). – С. 91 – 95.

7. Бурлака В.В. Обзор методов управления активными фильтрами / В.В. Бурлака, С.К. Поднебенная, М.Д. Дьяченко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КНУ, 2011. – Вип. 1/2011 (13). – С.51 – 54.

8. Пристрій корекції якості електроенергії / В.В. Бурлака, С.В. Гулаков, С.К. Бублик (Поднебенная), М.Д. Дьяченко // Патент на винахід № 93579 від 25.02.2011р.

9. Бурлака В.В. Особенности применения методов управления активными фильтрами / В.В. Бурлака, С.К. Поднебенная, М.Д. Дьяченко // Международная научно-техническая конференция «Университетская наука-2010»: Сб. тезисов докладов в 3-х томах. Мариуполь: ПГТУ, 2010. – Т. 3 – С. 53.

10. Бурлака В.В. Повышение качества работы активного фильтра с помощью применения линейного корректирующего звена / В.В. Бурлака, С.К. Поднебенная, М.Д. Дьяченко // Международная научно-техническая конференция «Университетская наука-2010»: Сб. тезисов докладов в 3-х томах. Мариуполь: ПГТУ, 2010. – Т. 3 – С. 54.

11. Бурлака В.В. Применение методов широтно-импульсной модуляции в системах управления параллельными активными фильтрами / В.В. Бурлака, С.К. Поднебенная, М.Д. Дьяченко // Университетская наука – 2011: Междунар. научно-техническая конференция, Мариуполь, 16-18 мая 2011. – Мариуполь: ПГТУ, 2011. – Т. 2. – С. 12.

12. Поднебенная С.К. Исследование влияния порядка интерфейсного фильтра на работу параллельного активного фильтра / С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака // Университетская наука – 2012: Междунар. научно-техническая конференция, Мариуполь, 24-26 апреля 2012. – Мариуполь: ПГТУ, 2012. – Т. 2. – С. 83 – 84.

13. Поднебенная С.К. Повышение эффективности силового параллельного активного фильтра путем подключения корректирующего линейного звена / С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака, С.В. Гулаков // Автоматика та електротехніка: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених та студентів з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2012. – С. 64 – 67.

14. Поднебенная С.К. Исследование влияния интерфейсного фильтра на подавление высших гармоник силовым параллельным активным фильтром / С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака, С.В. Гулаков // II-я международная научно-практическая конференция «Физико-технологические проблемы радиотехнических устройств, средств телекоммуникаций, нано- и микроэлектроники», Черновцы, 25-27 октября

2012. – Черновцы: Черновицкий национальный университет имени Ю. Федьковича, 2012. – С.125 – 126.

15. Поднебенная С.К. Адаптивная система управления силовым параллельным активным фильтром / С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака, С.В. Гулаков // Современные информационные технологии, средства автоматизации и электропривод: материалы Всеукраинской научно-технической конференции, посвященной 60-летию ДГМА, 17-21 декабря 2012. – Краматорск: ДГМА, 2012. – С.185 – 187.

16. Поднебенная С.К. Методы повышения эффективности параллельного активного фильтра / С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака // Всеукраинская научно-практическая конференция молодых ученых и студентов «Энергетика, энергосбережение», 21 марта 2013. – Мариуполь: ПГТУ, 2013. – С. 13.

17. Поднебенная С.К. Повышение энергоэффективности электрических сетей методами активной фильтрации / С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака, С.В. Гулаков // Инновационные пути модернизации базовых отраслей промышленности, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей природной среды: сборник трудов II Межотраслевой научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, 27–28 марта 2013 г., г. Харьков / ГП «УкрНТЦ «Энергосталь». – Х. : НТМТ, 2013. – С. 105–110.

18. Поднебенная С.К. Особенности управления силовым параллельным активным фильтром / С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака, С.В. Гулаков // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць XI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 9 – 11 квітня 2013 р. – Кременчук: КрНУ, 2013. – С. 168–169.

19. Поднебенная С.К. Двухступенчатый подход к проектированию силовых параллельных активных фильтров / С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака, С.В. Гулаков // 17-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». Сб. материалов форума. Т. 1. – Харьков: ХНУРЭ, 2013. – С.25 – 26.

20. Поднебенная С.К. Усовершенствованный параллельный активный фильтр / С.К. Поднебенная // 9-я Международная молодежная научно-техническая конференция “Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2013”, Севастополь: СевНТУ, 2013. – С. 236.

21. Поднебенная С.К. Разработка методики выбора емкости конденсатора звена постоянного тока параллельного активного фильтра / С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака // Университетская наука – 2013: Междунар. научно-техническая конференция, Мариуполь, 13-16 мая 2013. – Мариуполь: ПГТУ, 2013. – Т. 2. – С. 16.

22. Поднебенная С.К. Совершенствование метода управления напряжением звена постоянного тока параллельного активного фильтра / С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака, С.В. Гулаков // Всеукраїнська наукова Інтернет-конференція "Сучасна наука – інструмент динамічного розвитку економіки України". – Тернопіль: ТНЕУ, 2013. – С 96 – 99.

23. Поднебенная С.К. К вопросу выбора мощности параллельного активного фильтра / С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака // Научно-практическая конференция молодых ученых и студентов «Наукові дослідження молоді – інновації в науці та практиці». – Мариуполь: ПГТУ, 2013. – С. 15 – 16.

У публікаціях, що написані у співавторстві, здобувачу належить: [1, 2, 4, 10, 12] – впроваджено новий підхід до зниження втрат потужності в силовому активному фільтрі електротехнічного комплексу шляхом розділення задач подавлення вищих гармонік у низько- та високочастотному діапазонах і активній корекції похибки регулювання інвертора, обґрунтовано підключення додаткової коригувальної ланки, що працює в лінійному режимі, досліджено ефективність роботи силового активного фільтра електротехнічного комплексу на математичній моделі та на експериментальному зразку; [3, 11, 19] – розроблена система управління силовим активним фільтром комплексу з урахуванням інерційності інтерфейсного фільтру; [5, 6, 8] – проведено огляд існуючих засобів підвищення якості електроенергії, розроблено математичну модель; [7, 9] – проведено аналіз методів управління силовими активними фільтрами на основі математичного моделювання; [13, 14, 16, 17] – розроблено метод управління активним фільтром з додатковою коригувальною ланкою, що відрізняється застосуванням систем управління з різними структурами: системи з від’ємним зворотним зв’язком і імпульсної системи з прямим зв’язком на основі частотних методів, що дозволяє усунути вплив перехресних зв’язків в об’єкті управління; [15] – розроблено алгоритми системи управління активним фільтром до коливань еквівалентних параметрів інтерфейсного фільтра, викликаних часовою нестабільністю параметрів його елементів і зміною індуктивності мережі в точці підключення активного фільтра, що дозволяє мінімізувати встановлену потужність додаткової коригувальної ланки; [18] – розроблено методику вибору параметрів інтерфейсного фільтру; [21, 22] – розроблено методику вибору ємності конденсатора ланки постійного струму основного інвертору; [22] – удосконалено метод стабілізації напруги ланки постійного струму паралельного активного фільтру; [23] – отримано залежності для вибору потужності силового активного фільтру.

У 1, 2, 7, 16, 19 наукових публікаціях автора повністю висвітлено матеріали дисертації.

АНОТАЦІЇ

Поднебенна С.К. Підвищення енергоефективності електротехнічного комплексу «нелінійне навантаження – силовий активний фільтр» в електричних мережах 0,4 кВ. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», Донецьк, 2013.

В дисертації показано можливість зниження частоти перемикання силових ключів інвертора напруги силового активного фільтру з метою підвищення його енергоефективності у складі комплексу «нелінійне навантаження – силовий активний фільтр». При цьому для збереження рівня фільтрації модуляційних складових на частоті перемикання інвертору запропоновано використання інтерфейсного фільтру третього порядку з крутопадаючою АЧХ. Розроблено систему автоматичного управління, що враховує інерційність інтерфейсного фільтру при формуванні напруги завдання інвертору силового активного фільтру. Проведено аналіз роботи активного фільтру з запропонованою системою управління, який підтвердив її ефективність.

Для підвищення ефективності компенсації неактивної потужності нелінійного навантаження у складі електротехнічного комплексу запропоновано двоступеневий підхід, що полягає у частотному розподілі задач між основним інвертором та додатково введеною до складу активного фільтру малопотужною швидкодіючою коригувальною ланкою, підключеною до інтерфейсного фільтру. Розроблена система управління додатковою коригувальною ланкою з від'ємним зворотним зв'язком по вихідному струму фільтру та низькою чутливістю до зміни параметрів інтерфейсного фільтру і електричної мережі.

Розроблено методику визначення потужності силового активного фільтру в залежності від активної потужності навантаження, коефіцієнта потужності навантаження та бажаного коефіцієнта потужності комплексу «нелінійне навантаження – силовий активний фільтр» в режимах компенсації реактивної потужності, вищих гармонік, або неактивної потужності нелінійних навантажень.

Розроблено методику вибору параметрів інтерфейсного фільтру та ємності конденсаторів ланки постійного струму. Розроблено адаптивну систему управління силовим активним фільтром з додатковою коригувальною ланкою, що пристосовується до параметрів інтерфейсного фільтру та мережі, які змінюються впродовж часу.

Ефективність роботи запропонованих алгоритмів перевірено та доведено за допомогою математичного моделювання та на експериментальному зразку.

Ключові слова: електротехнічний комплекс, якість електричної енергії, нелінійне навантаження, силовий активний фільтр, система автоматичного управління, інтерфейсний фільтр, інвертор напруги.

Поднебенная С.К. Повышение энергоэффективности электротехнического комплекса «нелинейная нагрузка – силовой активный фильтр» в электрических сетях 0,4 кВ. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», Донецк, 2013.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-практической задачи повышения эффективности электротехнического комплекса «нелинейная нагрузка – силовой активный фильтр» за счет снижения потерь в нем и разработке алгоритмов управления активным фильтром, обеспечивающих минимизацию потерь мощности в электрической сети.

Повышение энергоэффективности силового активного фильтра в составе электротехнического комплекса достигнуто за счет снижения частоты переключений силовых ключей инвертора напряжения. При этом для сохранения уровня фильтрации модуляционных составляющих выходного тока на частоте переключения инвертора предложено использование интерфейсного фильтра третьего порядка с крутопадающей АЧХ.

Разработана система автоматического управления силовым активным фильтром, учитывающая инерционность интерфейсного фильтра при формировании напряжения задания инвертора. Для этого в системе управления применены частотные методы, основанные на быстром преобразовании Фурье. Проведен анализ работы активного фильтра с предложенной системой управления, подтвердивший ее эффек-

тивность при соответствии параметров математической модели реальным. При этом установлено, что изменение реальных параметров сети и интерфейсного фильтра без учета этого в системе управления приводит к недостаточно эффективной компенсации неактивной мощности нелинейной нагрузки.

Предложен двухступенчатый подход, заключающийся в частотном распределении задач между основным инвертором и дополнительно введенным в состав активного фильтра маломощным быстродействующим корректирующим звеном, подключенным к интерфейсному фильтру, позволяющий повысить эффективность компенсации неактивной мощности нелинейной нагрузки в составе электротехнического комплекса. При этом основной инвертор работает на низкой частоте, а корректирующее звено решает задачу устранения остаточных и высокочастотных гармоник.

Рассмотрено несколько вариантов подключения дополнительного корректирующего звена: последовательно с выходной индуктивностью интерфейсного фильтра и последовательно с конденсатором интерфейсного фильтра. В результате моделирования установлено, что энергетически более эффективным является подключение дополнительного корректирующего звена в цепь с конденсатором интерфейсного фильтра. Одним из преимуществ такого включения корректирующего звена является снижение требований к его выходному напряжению.

Рассмотренная система управления корректирующим звеном, содержащая блок расчета его выходного напряжения, также обладает повышенной чувствительностью к изменению параметров сети и интерфейсного фильтра, что обусловлено резонансным характером последнего. Для снижения чувствительности разработана система управления дополнительным корректирующим звеном с отрицательной обратной связью по выходному току фильтра и низкой чувствительностью к изменениям параметров интерфейсного фильтра и электрической сети.

Предложена методика определения мощности силового активного фильтра в зависимости от активной мощности нагрузки, исходного коэффициента мощности нагрузки и желаемого коэффициента мощности комплекса «нелинейная нагрузка – силовой активный фильтр». Получено выражение для нахождения относительной мощности силового активного фильтра при компенсации высших гармоник тока, реактивной мощности, или неактивной составляющей полной мощности нелинейной нагрузки. В случае невозможности проведения измерений и анализа тока нелинейных нагрузок получены зависимости мощности активного фильтра от мощности нагрузки для типовых нелинейных нагрузок, обеспечивающие приближенный выбор мощности силового активного фильтра.

Предложена методика выбора параметров интерфейсного фильтра и емкости конденсаторов звена постоянного тока. Разработана адаптивная система управления силовым активным фильтром с дополнительным корректирующим звеном, реализующая итерационный алгоритм нахождения эквивалентных параметров интерфейсного фильтра и сети, изменяющихся с течением времени.

Рассмотрены технические решения описанных теоретических алгоритмов. Экспериментальный образец содержит основной инвертор, образованный шестью IGBT транзисторами, и дополнительное корректирующее звено, в качестве которого использован линейный усилитель класса АВ, являющийся управляемым источником ЭДС. В качестве нелинейной нагрузки использован шестипульсный выпрямитель с

активной и активно-емкостной нагрузками. Активный фильтр исследован с отключенным и со включенным дополнительным корректирующим звеном. Результаты экспериментов подтвердили корректность теоретических положений, изложенных в работе, и показали соответствие параметров работы силового активного фильтра расчетным.

Проведен анализ энергоэффективности комплекса «нелинейная нагрузка – силовой активный фильтр», в качестве критерия принято снижение потерь активной мощности в силовом активном фильтре. Результаты показали, что применение предложенного в работе подхода позволяет снизить на 30 – 40 % потери активной мощности при сохранении уровня подавления гармоник тока активным фильтром.

Проведен анализ экономической эффективности исследуемого комплекса. Рассчитано, что применение предложенных подходов позволяет решить задачи компенсации реактивной мощности и высших гармоник тока, в частности, избежать резонансных перенапряжений, вызванным применением частотного привода совместно с конденсаторными батареями.

Ключевые слова: электротехнический комплекс, качество электрической энергии, нелинейная нагрузка, силовой активный фильтр, система автоматического управления, интерфейсный фильтр, инвертор напряжения.

Podnebennaya S.K. Improving The Energy Efficiency of Electrotechnical Complex Comprising of Nonlinear Load And Shunt Active Power Filter in 0.4 kV Networks. – Manuscript.

Dissertation submitted in fulfillment of the requirements for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.09.03 – Electrotechnical complex and systems. – State higher educational institution "Donetsk National Technical University", Donetsk, 2013.

The energy efficiency of the voltage source inverter (VSI) – based shunt active power filter (APF) as part of electrotechnical complex can be improved by reducing the switching frequency of the VSI. The use of third-order interface filter for improved filtering of the VSI switching noise is proposed. An APF control system that forms the VSI reference voltage with the interface filter's transfer function taken into account, is synthesized.

To further improve the performance of shunt APF, a two-stage approach is proposed: the tasks of eliminating high-order harmonics in low-frequency and high-frequency bands are separated between the main VSI and additional low-voltage high-speed correction stage coupled to interface filter. An additional correction stage' control system with APF output current negative feedback loop and low sensitivity to interface filter' parameters changes is developed and its stability is proven.

The settling time of APF DC link voltage regulator is improved; a method of calculating interface filter parameters and DC link capacitance is proposed. An adaptive control system for APF with additional correction stage which adapts for the interface filter and network parameters changes over the time is developed.

The effectiveness of the proposed APF topology and its control system has been tested and proven by means of mathematical modeling and the experimental verification.

Keywords: electrotechnical complex, power quality, shunt active power filter, control system, nonlinear load, interface filter, voltage source inverter.

Підписано до друку 23.12.2013 р. Формат 60x84 1/16.
Папір офсетний. Умов. друк. арк. 0,93. Обл.-видав. арк. 1,22.
Тираж 100 прим. Зам. № 8

Надруковано в поліграфічному центрі
ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»
Міністерства освіти і науки України
вул. Університетська 7, м. Маріуполь, 87500
Свідоцтво суб'єкта видавничої діяльності № 3729 від 15.03.2010 р.

