

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

ДЕМЧЕНКО ЮРІЙ СЕРГІЙОВИЧ



УДК 621.314

**ВИСОКОЧАСТОТНІ КОРЕКТОРИ КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ В
ДЖЕРЕЛАХ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З БЕЗТРАНСФОРМАТОРНИМ
ВХОДОМ**

05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі промислової електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Ямненко Юлія Сергіївна,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,
завідувач кафедри промислової електроніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Денисов Юрій Олександрович,
Чернігівський національний технологічний університет,
завідувач кафедри електроніки, автоматики, робототехніки
та мехатроніки

кандидат технічних наук
Пазєєв Андрій Георгійович,
Інститут електродинаміки
Національної академії наук України,
старший науковий співробітник відділу стабілізації
параметрів електромагнітної енергії

Захист відбудеться «___» червня 2019 р. о 14:30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.19 в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, Київ-56, пр. Перемоги, 37, корп. 12, ауд. 412.

З дисертацією можна ознайомитись у Науково-технічній бібліотеці ім. Г. І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, Київ-56, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «___» травня 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



В.Б. Швайченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сьогоднішній день велика кількість навантажень, що підключаються до мережі живлення, споживає струм, який суттєво відрізняється від синусоїдного. Це призводить до того, що в мережу генерується значна кількість вищих гармонік струму, які можуть викликати негативні наслідки, такі як резонансні явища в елементах мережі, перегрів нульового проводу за рахунок гармонік, кратних трьом, зменшення активної потужності мережі, спотворення синусоїдності напруги живлення, негативний вплив на силові конденсатори та пов'язані з ними реактори. Також вищі гармоніки призводять до додаткових втрат у трансформаторах та електричних машинах, прискорюють старіння ізоляції електрообладнання.

З метою запобігання негативного впливу вищих гармонік струму на мережі живлення в Україні діє стандарт ДСТУ EN 61000-3-2:2016, що обмежує величину гармонічних складових струму споживання для систем електроживлення з вхідним фазовим струмом до 16 А.

Для задоволення вимог даного стандарту в пристроях перетворювальної техніки широко застосовуються коректори коефіцієнта потужності (ККП). На вході імпульсних джерел живлення потужністю до кількох кіловат здебільшого встановлюють активні високочастотні коректори, побудовані на основі підвищувальних широтно-імпульсних перетворювачів. Якщо потужність джерела живлення не перевищує 200–300 Вт, то коректор, зазвичай, працює в режимі переривчастого струму, якщо більше, то в режимі безперервного струму.

Питанням поліпшення якості вхідного струму напівпровідникових перетворювачів займалися такі вітчизняні та зарубіжні вчені: Артеменко М.Ю., Батрак Л.М., Жаркін А.Ф., Жемеров Г.Г., Жуйков В.Я., Клімов В.П., Козлов А.В., Комаров М.С., Миколаєць Д.А., Михальський В.М., Москаленко Г.О., Нгуен Лихай Тунг, Новський В.А., Пазєєв А.Г., Палачов С.О., Соколов В. М., Федій В.С., Чопик В. В., Шаповал І. А., Шидловський А.К., Adragna C., Buso S., Erickson R.W., Maksimovic D., Mattavelli P., Spiazzi G., Tenti P. та багато інших. Розрахунок процесів у активному високочастотному коректорі здійснено в роботі Белова Г.О. Деталі проектування однофазних коректорів представлені в роботі Мелешина В.І. У роботі Rosetto L. описано різні методи керування активними коректорами, проте не надано порад щодо доцільної області їх застосувань. Цифрове керування із зоною нечутливості запропоноване у роботі Prodic A., а в роботі Chen J. реалізоване цифрове керування з прогнозуванням. У роботі Grote T. наведено адаптивний метод керування широтно-імпульсним перетворювачем, проте не представлено реалізацію даного методу для коректора коефіцієнта потужності.

Найбільшого поширення набули такі методи керування активними високочастотними ККП, як граничний метод керування, метод керування за піковим струмом та метод керування за середнім струмом. Кожному з них притаманні певні недоліки. Зокрема, недоліком пікового методу керування є спотворення вхідного струму в області переходу через нуль. Дослідження даного питання проведено у роботі Zhou C., де запропоновано до еталонного сигналу додавати сигнал постійної

величини. Проте особливістю такого підходу є те, що при малих навантаженнях коректор стає некерованим.

Таким чином, подальше дослідження існуючих та створення нових методів керування активними високочастотними коректорами коефіцієнта потужності є актуальною задачею.

Дисертація присвячена дослідженню шляхів подальшого розвитку та удосконалення методів керування однофазними активними високочастотними коректорами коефіцієнта потужності в джерелах електроживлення з безтрансформаторним входом та створенню нових методів, а саме розробці методу керування за піковим струмом з введенням корегуючого впливу, що дозволяє покращити спектр вхідного струму, створенню схеми додаткової комутації для граничного керування. Крім того, у роботі приділено увагу розробці цифрових методів керування коректорами.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі промислової електроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського. Теоретичні положення дисертації відображено у ініціативній науково-дослідній НДР «Комп'ютерне моделювання засобів підвищення енергоефективності процесів електроспоживання в багатофазних системах живлення», що виконується на факультеті електроніки, № державної реєстрації НДР 0118U002263. Дисертаційна робота відповідає науковому напрямку досліджень, передбачених Державною науково-технічною програмою «Енергоефективні та ресурсозберігаючі технології генерування, перетворення та використання енергії», а також напрямку наукових досліджень наукової школи кафедри промислової електроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського – «Теоретичні основи перетворення параметрів електричної енергії».

Мета і задачі дослідження. Метою даної роботи є підвищення рівня електромагнітної сумісності напівпровідникових перетворювачів електроенергії з мережею живлення шляхом вдосконалення існуючих методів керування високочастотними коректорами коефіцієнта потужності.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалися наступні задачі:

- 1) аналіз сучасних методів керування активними високочастотними коректорами коефіцієнта потужності;
- 2) вдосконалення існуючих методів керування високочастотними коректорами коефіцієнта потужності;
- 3) розробка цифрових систем керування коректорами;
- 4) комп'ютерне моделювання роботи коректорів коефіцієнта потужності для перевірки запропонованих положень.

Об'єктом дослідження є процеси формування вхідного струму напівпровідникових перетворювачів електроенергії.

Предметом дослідження є методи керування активними високочастотними коректорами коефіцієнта потужності, спрямовані на підвищення рівня електромагнітної сумісності напівпровідникових перетворювачів електроенергії з мережею живлення.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених у роботі задач використовувалися: теорія електричних кіл та теорія диференціальних рівнянь для аналізу якості вхідного струму сучасних методів керування коректорами; теорія лінійних та нелінійних імпульсних систем, операторний метод, теорія автоматичного регулювання для розробки цифрових систем керування; методи математичного та комп'ютерного моделювання для перевірки достовірності запропонованих теоретичних положень.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1) вдосконалено метод граничного керування шляхом введення схеми додаткової комутації, за рахунок чого вдалося уникнути спотворення вхідного струму у випадку значного збільшення навантаження коректора коефіцієнта потужності;

2) вдосконалено метод керування за піковим струмом шляхом введення у систему керування додаткового корегуючого сигналу, що дозволило зменшити величину загального коефіцієнта гармонік вхідного струму з 23% до 1,3%;

3) вперше для коректорів коефіцієнта потужності застосовано адаптивний метод керування за піковим струмом, який полягає у зміні величини нахилу компенсуючої пилкоподібної напруги при зміні вхідної напруги коректора. Даний метод дозволив зменшити величину загального коефіцієнта гармонік вхідного струму з 24,2% до 18,7%.

Практичне значення одержаних результатів:

1) розроблений алгоритм пуску коректора дозволяє повністю усунути стрибок вхідного пускового струму;

2) запропонована модифікована схема коректора з керуванням за піковим струмом дозволяє зменшити рівень третьої гармоніки у вхідному струмі на 5-10 %;

3) розроблена цифрова система керування коректором за піковим струмом суттєво спрощує структуру системи керування у порівнянні з аналоговою системою;

4) запропонована цифрова система керування коректором зі спрощеним зворотним зв'язком забезпечує попередню стабілізацію вихідної напруги та зменшує кількість обчислень сигналу зворотного зв'язку по вихідній напрузі на 40%;

5) розроблені у середовищі Simulink моделі дозволяють дослідити статичні та динамічні характеристики коректорів коефіцієнта потужності, оцінити показники електромагнітної сумісності та обрати необхідну схему коректора для конкретного практичного випадку.

Результати дисертаційної роботи прийняті для використання у ТОВ «Олімп» та ТОВ «ІТЛ», а також впроваджені у навчальний процес кафедри промислової електроніки КПІ ім. І.Сікорського, а саме у дисципліни «Пристрої перетворювальної техніки» та «Електронні системи керування та регулювання». Крім того, отримані результати знайшли відображення у трьох патентах України на корисну модель.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати, які виносяться на захист, належать авторові особисто. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать: [2] – аналіз існуючих методів корекції коефіцієнта потужності, [4] – розробка схеми додаткової комутації

транзистора; [5] – розробка комп’ютерних моделей коректорів коефіцієнта потужності та дослідження залежності спектру вхідного струму від навантаження; [14] – розробка схеми коректора з корегуванням еталонного сигналу по похідній; [3] – розробка адаптивного цифрового керування коректором за піковим струмом; [6] – проведення порівняльного аналізу способів покращення спектру вхідного струму коректора; [7] – розробка цифрового коректора зі спрощеним зворотним зв’язком та проведення порівняння запропонованого алгоритму з класичним керуванням зі зворотним зв’язком по напрузі. Роботи [1, 11, 12, 13] написані автором дисертації без співавторів. У роботах [8, 9, 10] здобувачу належить розробка способів керування високочастотними коректорами.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, які включено в дисертацію, доповідалися та обговорювалися на:

1. Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених «Електроніка», м. Київ (Україна), 2011 р., 2019 р.
2. IEEE International Scientific Conference «Electronics and Nanotechnology (ELNANO)», м. Київ (Україна), 2014 р., 2015 р.
3. Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної електротехніки», м. Київ (Україна), 2014 р.
4. Міжнародній конференції «Інтелектуальні енергетичні системи - ESS’15», м. Київ (Україна), 2015 р.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 14 наукових праць, у тому числі: 7 статей у фахових виданнях України (з них 6 – у виданнях, які входять до наукометричних баз даних Scopus та Index Copernicus), 3 патенти України на корисну модель та 4 публікації у матеріалах міжнародних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел зі 136 найменувань та 4 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 185 сторінок, у тому числі 128 сторінок основного тексту, 100 рисунків та 13 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність виконання роботи, сформульовано мету та задачі наукових досліджень, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів дисертації.

У **першому розділі** розглянуто основні показники, що використовують для оцінки якості вхідного струму, а саме коефіцієнт потужності та загальний коефіцієнт гармонік.

Коефіцієнт потужності K_{II} визначається наступним чином:

$$K_{II} = \frac{P}{S} = \frac{U_1 I_1 \cos \varphi_1}{U_1 \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} I_k^2}} = \frac{I_1}{\sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} I_k^2}} \cos \varphi_1 = \nu \cdot \cos \varphi_1, \quad (1)$$

де P – активна потужність, S – повна потужність, U_1, I_1, φ_1 – діючі значення напруги, струму та фазовий кут першої гармоніки, I_k – діюче значення струму гармонік k -го порядку, ν – коефіцієнт спотворення вхідного струму.

З виразу (1) видно, що негативний вплив перетворювача на мережу живлення визначається двома складовими: спотворенням форми споживаного струму та відставанням струму від напруги на певний кут. Спотворення струму виражається у відхиленні його форми від синусоїдної. Відставання струму від напруги призводить до споживання реактивної потужності.

Таким чином, для підвищення коефіцієнта потужності необхідно звести до мінімуму кут запізнювання струму відносно напруги, а також зменшити вміст вищих гармонік вхідного струму.

Загальний коефіцієнт гармонік (THD – total harmonic distortion) K_T визначається як:

$$K_T = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1}. \quad (2)$$

Висока ефективність та хороші масогабаритні показники високочастотних напівпровідникових перетворювачів зумовили їх широке застосування у сучасних системах електроживлення. Такі пристрої будуються за структурою “вхідний некерований випрямляч – ємнісний фільтр – високочастотний перетворювач постійної напруги” (рис. 1). За ними історично закріпилася назва “Джерела електроживлення з безтрансформаторним входом”. Такі пристрої споживають імпульсний струм суттєво несинусоїдної форми, що призводить до генерації в мережу вищих гармонік струму.

Вищі гармоніки струму негативно впливають на мережу та інше обладнання, підключене до неї. Для характеристики цього впливу використовується термін “електромагнітна сумісність” (ЕМС).

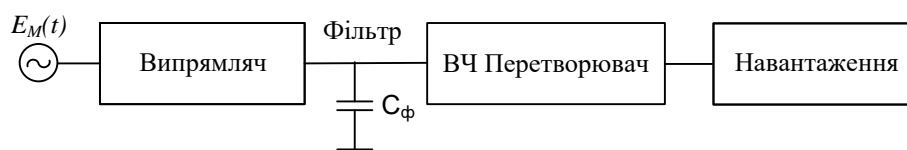


Рис. 1. Схема джерела живлення з безтрансформаторним входом

Електромагнітна сумісність (ЕМС) – це здатність електроприймача нормально функціонувати в мережі електропостачання, до якої він підключений, і не вносити в цю мережу завад, неприпустимих для роботи інших електроприймачів.

На рис. 2 представлений гармонічний склад вхідного струму випрямляча з ємнісним фільтром, приведений до основної гармоніки. Як видно з діаграми, в спектрі вхідного струму присутні непарні гармоніки, величина яких є досить суттєвою. Коефіцієнт потужності такого випрямляча становить 0,5-0,6, а загальний коефіцієнт гармонік може досягати 180%.

Способи підвищення коефіцієнта потужності перетворювальних пристроїв можна поділити на дві категорії: застосування додаткового обладнання, яке має

фільтруючі властивості, та удосконалення схемотехнічних рішень перетворювальних пристроїв.

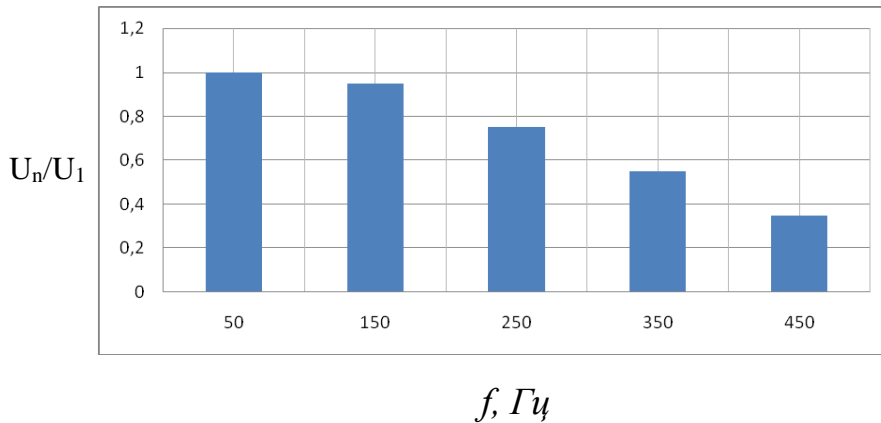


Рис. 2. Гармонічний склад вхідного струму випрямляча з ємнісним фільтром

У якості додаткового обладнання для покращення ЕМС можуть застосовуватися пасивні коректори коефіцієнта потужності, резонансні LC-фільтри вищих гармонік та силові активні фільтри (САФ). Пасивні коректори побудовані на основі дроселів і конденсаторів та найчастіше застосовуються в недорогих пристроях, де не пред'являється жорстких вимог до рівня вищих гармонік струму. Пасивна корекція дозволяє досягти значення коефіцієнта потужності близько 0,9. Проте даний метод має декілька недоліків. LC-фільтр може бути ефективний як коректор коефіцієнта потужності тільки у випадку, якщо напруга, частота і навантаження змінюються у вузькому інтервалі значень. Так як фільтр повинен працювати в області низьких частот (50/60 Гц), його компоненти мають великі габарити, масу і малу добротність. Перевагами пасивних ККП є набагато менша кількість компонентів і відповідно більший час напрацювання на відмову, а також при пасивній корекції створюється менше електромагнітних і контактних завад, ніж при активній.

Один з ефективних способів покращення ЕМС – застосування силових активних фільтрів. Розрізняють силові активні фільтри напруги та струму. Силові активні фільтри будуються зазвичай на базі інверторів напруги або струму з широтно-імпульсною модуляцією. Перевагами САФ є багатофункціональність (компенсація вищих гармонік струму з довільним спектром, можливість усунення резонансних явищ в електромережах шляхом компенсації резонуючих гармонік, компенсація реактивної потужності, компенсація потужності несиметрії), залежність установленної потужності елементів активного фільтра лише від складових неактивної потужності, можливість нарощування потужності компенсації до заданого рівня шляхом паралельного підключення декількох САФ. Основними їх недоліками є відносна складність системи керування, неможливість реалізації безінерційної компенсації та відносно висока вартість. Вказані недоліки стримують широке застосування силових активних фільтрів у системах електроживлення.

Всі розглянуті вище фільтруючі пристрої являються додатковим обладнанням для покращення ЕМС (з додатковими капітальними вкладеннями, втратами електроенергії та експлуатаційними витратами). У ряді випадків їх застосування

стає економічно недоцільним, так як додаткові витрати можуть перевищувати витрати від пониженої якості електроенергії.

Більш перспективний шлях зниження рівня вищих гармонік та несинусоїдальності напруги мережі живлення полягає не у застосуванні додаткових пристроїв, а в удосконаленні схемотехнічних рішень та конструкцій нелінійних навантажень електричних мереж.

Найбільш перспективним способом покращення ЕМС напівпровідникових перетворювачів електроенергії є застосування активних коректорів коефіцієнта потужності, які забезпечують примусове формування майже синусоїдальних струмів споживання. Коефіцієнт потужності при цьому близький до одиниці.

Методи активної корекції можна умовно розділити на низькочастотні та високочастотні. Якщо частота роботи коректора набагато вища за частоту мережі живлення – це високочастотний коректор, інакше – низькочастотний.

Низькочастотні ККП мають низьку вартість, відносну простоту та вони не є джерелами високочастотних завад. Однак коефіцієнт потужності таких коректорів не може перевищувати значення 0,9. Крім того, вони мають великі габарити, обумовлені застосуванням низькочастотного дроселя.

Підвищення робочої частоти коректора дозволяє зменшити габарити дроселя. Існує декілька варіантів побудови активних високочастотних (ВЧ) ККП. Найпоширенішою в наш час є схема підвищуючого перетворювача (boost converter). Ця схема може працювати в широкому діапазоні вхідних напруги (від 85 до 270 В) без обмежень та будь-яких додаткових налаштувань.

На рис. 3 представлено схему коректора, побудованого на основі підвищуючого перетворювача. При включеному MOSFET-ключі струм в дроселі L лінійно наростає, діод $VD2$ замкнутий, а конденсатор $C2$ розряджається на навантаження. Потім транзистор закривається, напруга на дроселі L відкриває діод $VD2$ і дросель віддає накопичену енергію в конденсатор, одночасно живлячи навантаження. Конденсатор $C1$ має малу ємність і служить для фільтрації високочастотних завад. Робоча частота такого коректора становить десятки-сотні кілогерц. Система керування (СК) коректора формує вхідний струм за певним заданим законом та стабілізує вихідну напругу.

Коректор може працювати в трьох режимах: переривчастого струму, неперервного струму та граничному режимі. У режимі переривчастого струму струм дроселя спадає до нуля на кожному періоді комутації ключа, а в режимі неперервного струму відкривання ключа відбувається, коли струм дроселя ще не встигнув досягти нуля. Граничний режим характеризується тим, що ключ відкривається в момент, щойно струм дроселя досягає нульового значення. У пристроях потужністю більше 400 Вт здебільшого використовується неперервний режим, а в малопотужних – режим переривчастого струму.

Широкого поширення набули наступні три методи керування ВЧ коректорами коефіцієнта потужності: метод граничного керування, метод керування за піковим струмом та метод керування за середнім струмом. Аналіз цих методів проведено у даній дисертаційній роботі.

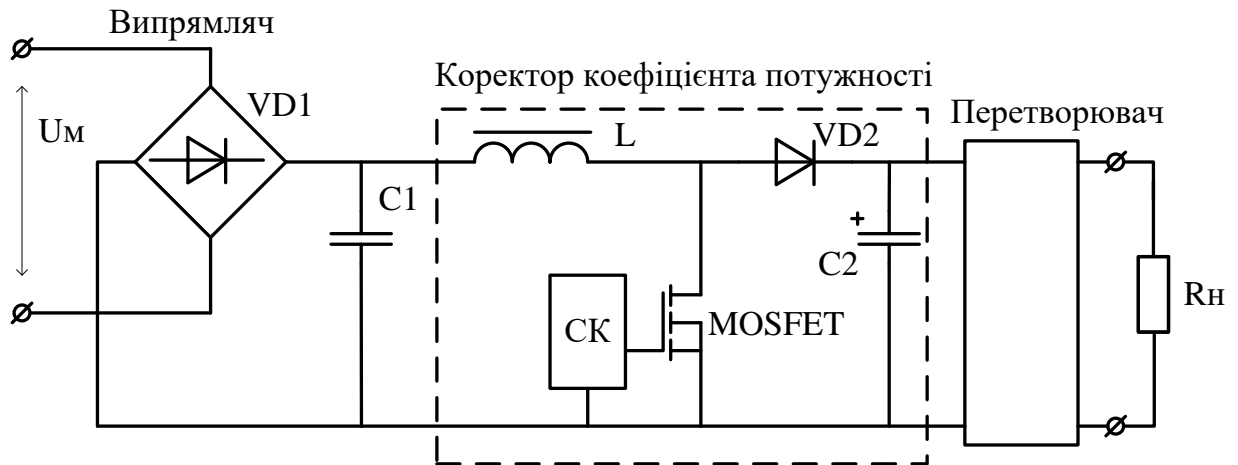


Рис. 3. Активний високочастотний ККП

У **другому розділі** проведено дослідження аналогових систем керування високочастотними коректорами коефіцієнта потужності та представлено вдосконалення існуючих методів керування коректорами.

Зазвичай напівпровідникові перетворювачі електроенергії з корекцією коефіцієнта потужності будуються за двокаскадним принципом «коректор – ВЧ перетворювач», що дозволяє використовувати коректор без зворотного зв'язку по вихідній напрузі. Найбільш доцільним при цьому являється використання найпростішого методу керування - граничного. Але у випадку зростання навантаження такий підхід може призвести до суттєвого просідання вихідної напруги, що викликає спотворення вхідного струму коректора.

Для усунення спотворення вхідного струму та розширення діапазона роботи коректора необхідно додатково відкривати силовий транзистор. Для цього запропоновано схему коректора, яка зображена на рис. 4. До вже існуючої системи керування додано схему додаткової комутації транзистора (СДКТ). Структура СДКТ наведена на рис. 5, вона складається з генератора прямокутних імпульсів ТГ та лічильника імпульсів СТ. Лічильник підсумовує вхідні імпульси від генератора, що подаються на його вхід С. На вхід R, що призначений для скидання лічильника в нульовий стан, подається сигнал від системи керування. Сигнал із виходу переповнення лічильника Р подається на вхід елемента АБО (рис. 4), що використовується для логічного підсумовування сигналів, що надходять від СК та СДКТ.

Опишемо детальніше принцип роботи схеми додаткової комутації. Згенеровані прямокутні імпульси від ТГ надходять на вхід С лічильника СТ. При переповненні на виході Р лічильника генерується одиничний імпульс. Даний імпульс встановлює тригер Т в одиничний стан, що призводить до вмикання силового ключа VT. Таким чином здійснюється додаткове відкривання транзистора коректора. Сигнал від СК використовується для обнуління лічильника і подається на його вхід R. Таким чином, якщо система працює в нормальному режимі, обнуління лічильника відбувається при кожному відкриванні транзистора VT. У даному

випадку не відбувається переповнення лічильника, і схема додаткової комутації транзистора не впливає на роботу пристрою.

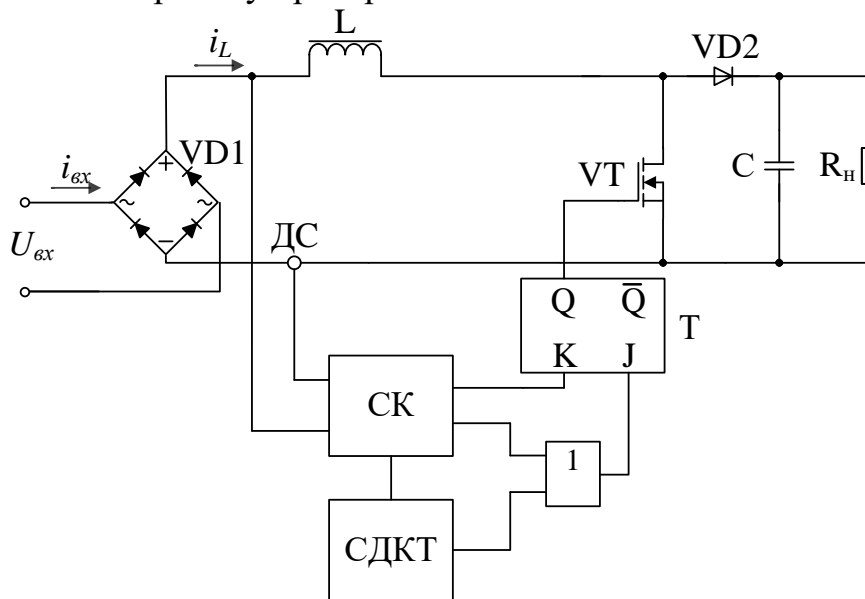


Рис. 4. Коректор зі схемою додаткової комутації транзистора

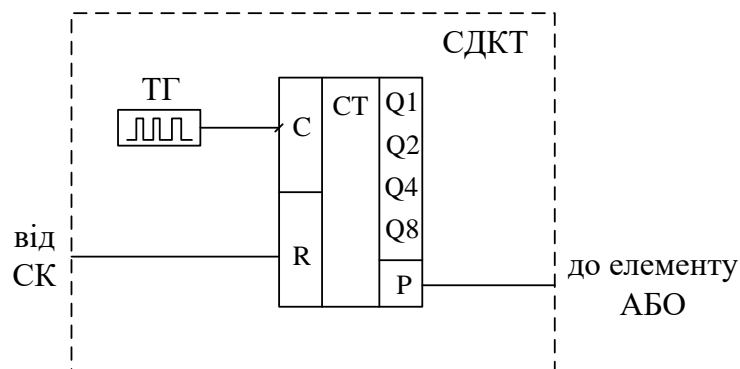


Рис. 5. Схема додаткової комутації транзистора

У випадку значного зменшення опору навантаження відбувається просідання вихідної напруги ККП, що призводить до зростання струму навіть при закритому транзисторі. При цьому сигнал від СК на відкриття транзистора відсутній, лічильник встигає переповнитися і на виході Р видає імпульс, що додатково відкриває транзистор.

Дослідження коректора з керуванням за піковим струмом показало, що вхідний струм даного коректора суттєво відрізняється від синусоїдного. Усереднений струм дроселя такого коректора визначається наступним чином:

$$i_{Lcep}(t) = \left(\frac{U_m U_e}{k} + \frac{U_m S_e T_s}{U_{вух}} - \frac{U_m T_s}{2L} \right) |\sin \omega t| + \frac{U_m^2 T_s}{2LU_{вух}} \sin^2 \omega t - S_e T_s, \quad (3)$$

де L – індуктивність дроселя, S_e – нахил пілкоподібної напруги, U_m – амплітудне значення напруги мережі живлення, ω – кутова частота мережі живлення, k – коефіцієнт ділення дільника вхідної напруги, U_e – сигнал з виходу підсилювача

помилки по напрузі (ППН), T_s – період комутації транзистора, $U_{вих}$ – вихідна напруга коректора.

Із виразу (3) видно, що струм дроселя, що являється вхідним струмом за модулем, крім синусоїдної компоненти, має у своєму складі також компоненту, пропорційну квадрату синусоїди, та постійну складову, що суттєво погіршує спектр.

Для покращення спектру вхідного струму коректора з керуванням за піковим струмом запропоновано метод керування із корегуванням еталонного сигналу по похідній (рис. 6). Випрямлена вхідна напруга коректора з коефіцієнтом ділення $k2$ подається на диференціюючу ланку, модуль вихідного сигналу якої додається до сигналу з виходу помножувача.

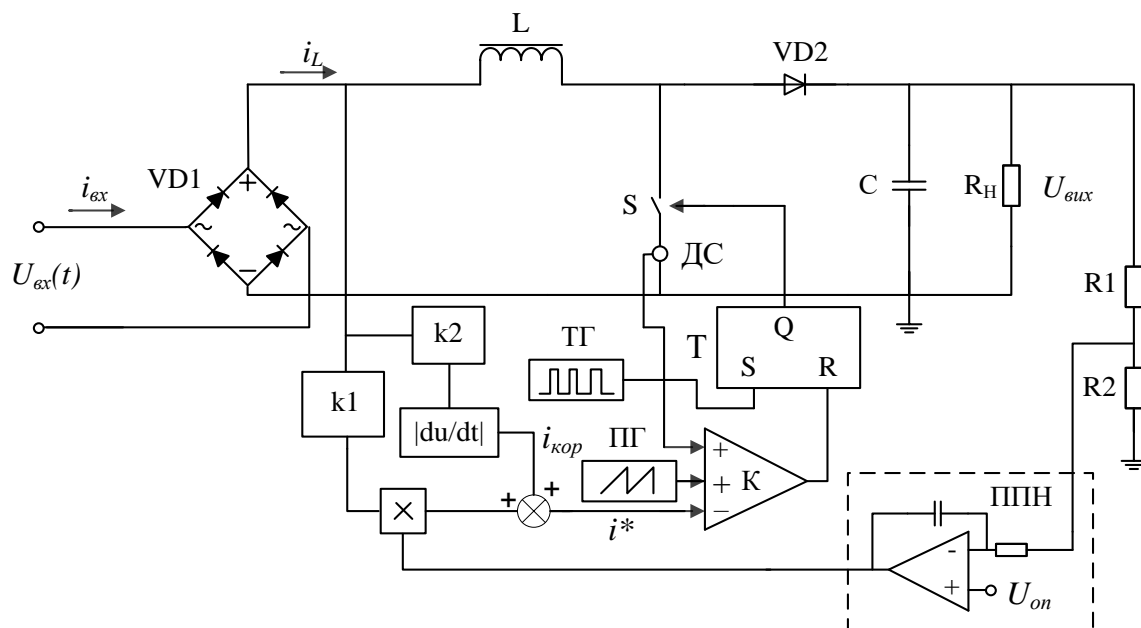


Рис. 6. Схема ККП з корегуванням по похідній

Корегуючий вплив $i_{кор}$ при цьому описується наступним виразом:

$$i_{кор}(t) = A |\cos \omega t|, \quad (4)$$

де $A = S_e T_s$.

Подальшого покращення спектру вхідного струму можна досягнути за рахунок введення корегуючого впливу виду

$$i_{кор}(t) = A - B \sin^2 \omega t, \quad (5)$$

де $A = S_e T_s$, $B = \frac{U_m^2 T_s}{2LU_{вих}}$.

Даний підхід дозволяє отримати майже синусоїдний вхідний струм.

Спотворення вхідного струму коректора з піковим методом керування викликано в основному присутністю третьої гармоніки. А тому доцільно розробити метод, що буде націлений саме на її придушення. Для цього запропоновано модифікований метод керування коректором з фільтрацією третьої гармоніки (рис. 7).

Суть даного методу полягає в тому, що вхідний струм $i_{вх}$ подається на смуговий фільтр Φ , який виділяє третю гармоніку. Ця гармоніка з певним

коефіцієнтом k віднімається від еталонного сигналу i^* . Результуючий сигнал надходить на інверсний вхід компаратора K та використовується для формування вхідного струму. Такий метод дозволяє зменшити рівень третьої гармоніки i , як наслідок, покращити спектр вхідного струму ККП.

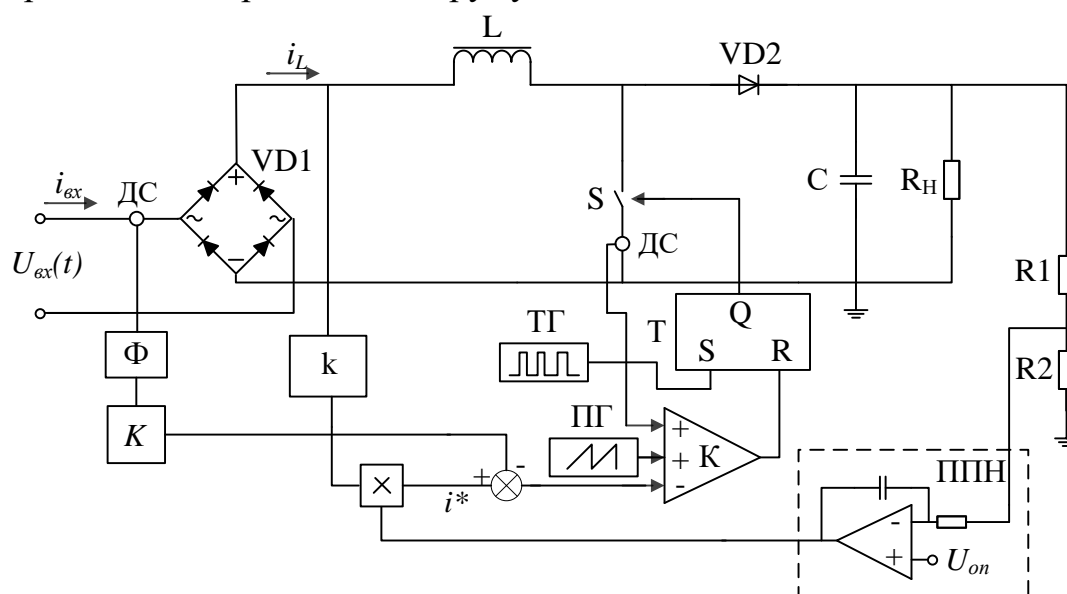


Рис. 7. Схема ККП з методом керування з фільтрацією третьої гармоніки

Третій розділ присвячений цифровим системам керування високочастотними коректорами коефіцієнта потужності.

На рис. 8 зображено формування порогового значення струму дроселя при піковому методі керування, де i^* – еталонний сигнал, i_{cmp} – порогове значення струму дроселя, i_n – струм на початку n -го такту, s_1 , s_2 – нахил наростання та спадання струму дроселя, s_e – нахил компенсуючої пилкоподібної напруги (КПН), T_s – період комутації, D – коефіцієнт заповнення. При цьому справедливі наступні вирази:

$$i_{cmp} = i_n + s_1 \cdot DT_s, \quad (6)$$

$$i_{cmp} = i^* - s_e \cdot DT_s. \quad (7)$$

Використовуючи (6) та (7), можна отримати:

$$i_{cmp} = i^* - s_e \frac{i^* - i_n}{s_1 + s_e} = \frac{1}{1 + k_{sc}} (i^* + k_{sc} i_n), \quad (8)$$

де $k_{sc} = \frac{s_e}{s_1}$ – коефіцієнт компенсації.

На рис. 9 наведена схема ВЧ ККП із цифровою СК за піковим струмом, що реалізує алгоритм керування згідно виразу (8). СК може бути побудована на основі мікропроцесора або цифровий сигнальний процесор (ЦСП). Пояснимо принцип роботи даної схеми. Вхідна напруга, вихідна напруга та сигнал з датчика струму дроселя надходять на аналогово-цифровий перетворювач (АЦП). АЦП для вимірювання струму дроселя запускається на початку кожного періоду комутації за сигналом від цифрового широтно-імпульсного модулятора (ЦШІМ). Еталонний

сигнал i^* знаходиться як добуток вимірної вхідної напруги та сигналу з виходу регулятора напруги. Нахил наростання струму дроселя s_1 є пропорційним вхідній напрузі. Регулятор струму формує порогове значення струму i_{cmp} згідно виразу (8). Компаратор К порівнює даний струм зі струмом дроселя. У момент їх співпадання відбувається закривання силового ключа коректора. Таким чином, розроблений цифровий коректор реалізує піковий метод керування.

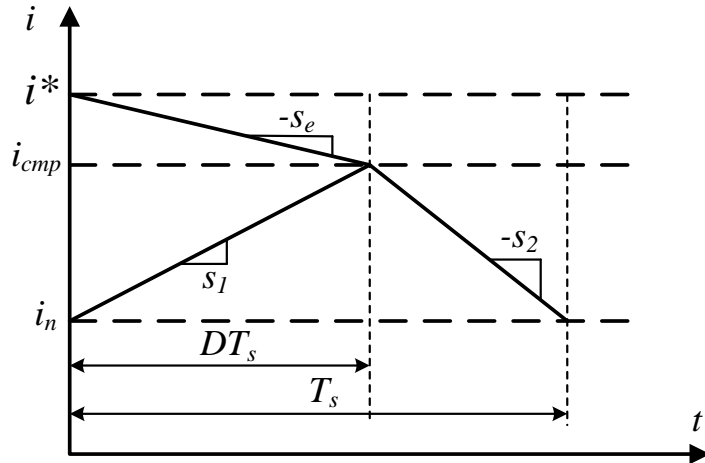


Рис. 8. Формування порогового значення струму

Крім того, у систему введено корегування по похідній. Розрахунок похідної від вхідної напруги виконується наступним чином:

$$\frac{du_{ex}(t)}{dt} = \frac{\Delta u_{ex}(t)}{\Delta t} = \frac{u_{ex}(t_2) - u_{ex}(t_1)}{t_2 - t_1} = k_1 \cdot (u_{ex}(t_2) - u_{ex}(t_1)), \quad (9)$$

де k_1 – коефіцієнт дільника вхідної напруги, t_1 , t_2 – сусідні моменти часу вибірки вхідної напруги.

Очевидно, що отримана цифрова система керування коректором є простішою за аналогову, так як може бути побудована на одному мікроконтролері або ЦСП. Також необхідно відмітити той факт, що в цифровій системі, на відміну від аналогової, введення похідної не ускладнює структури СК, а лише призводить до незначного збільшення кількості математичних обчислень.

Одним із недоліків керування ККП за піковим струмом є виникнення субгармонічних коливань при коефіцієнті заповнення, більшому за 50 %. Для з'ясування причини виникнення даних коливань розглянемо більш детально процеси в коректорі у разі керування за піковим струмом. На рис. 10 наведені діаграми струму дроселя в усталеному режимі (суцільна лінія) та у випадку наявності збурення \hat{i} (штрихпунктирна лінія), де $\Delta i(n)$ та $\Delta i(n+1)$ – відхилення струму від усталеного значення.

Для рис. 10 можна записати:

$$\Delta i(n+1) = -a \cdot \Delta i(n) + (1+a) \cdot \hat{i}(n+1), \quad (10)$$

$$\text{де } a = \frac{s_2 - s_e}{s_1 + s_e}.$$

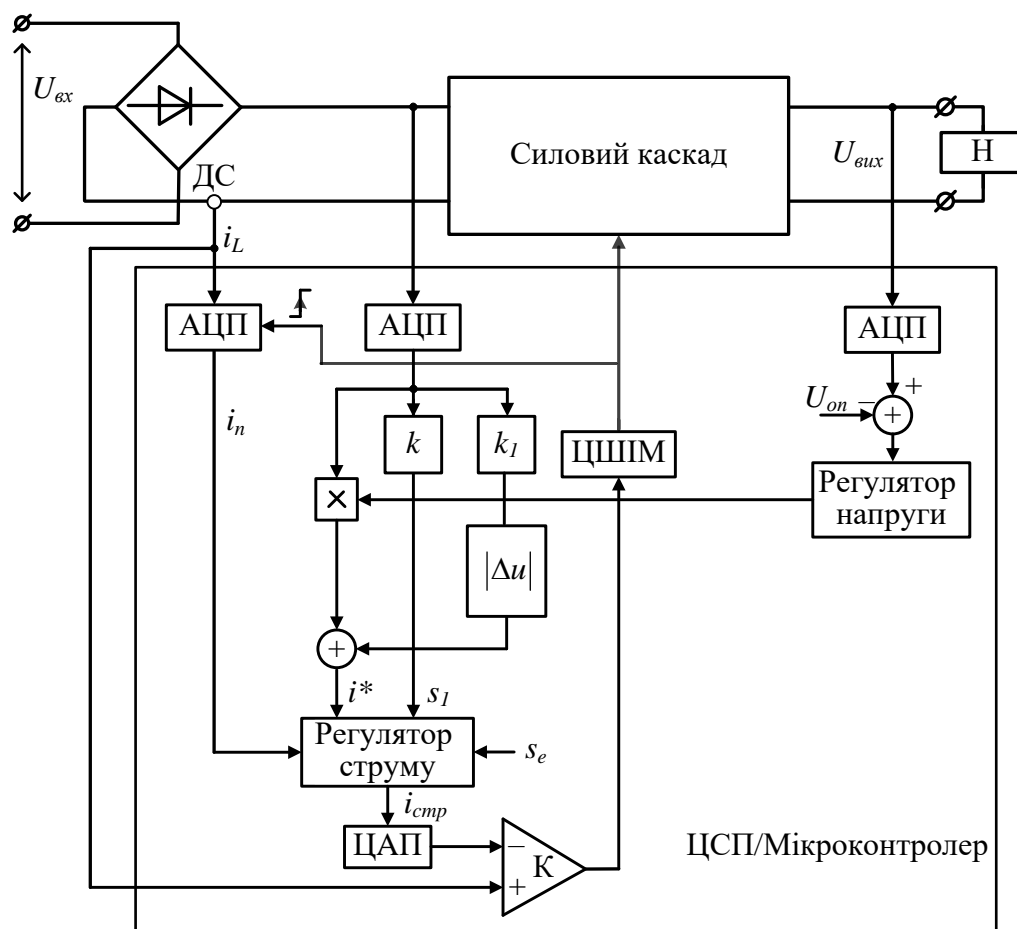


Рис. 9. Коректор із цифровою системою керування за піковим струмом

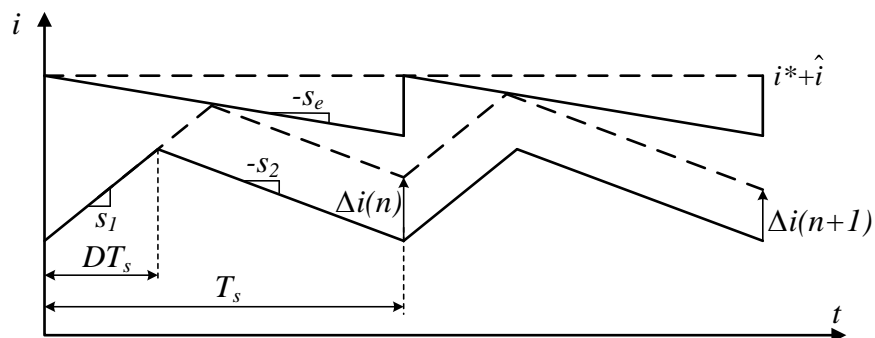


Рис. 10. Діаграми струму дроселя в усталеному та збуреному режимі

Застосувавши z-перетворення до виразу (10), отримаємо:

$$H(z) = \frac{\Delta i(z)}{\hat{i}(z)} = (1+a) \cdot \frac{z}{z+a}. \quad (11)$$

З (11) видно, що у разі виконання умови $s_1 < s_2$ та відсутності КПН ($s_e=0$) величина a більше одиниці, і система має полюс поза колом одиничного радіусу. Умова $s_1 < s_2$ виконується у випадку, коли коефіцієнт заповнення D більший за 0,5. Цим і пояснюється виникнення субгармонік у системі за умови $D > 0,5$. Для забезпечення стійкості вводиться додаткова компенсуюча пилкоподібна напруга з нахилом s_e (рис. 10). У цьому разі необхідно, щоб виконувалася умова:

$$a = \left| \frac{s_2 - s_e}{s_1 + s_e} \right| < 1. \quad (12)$$

Тобто необхідна величина нахилу КПН становить:

$$s_e > \frac{1}{2}(s_2 - s_1). \quad (13)$$

У разі відсутності збурення $\hat{i}(n+1)$ вираз (10) має вигляд:

$$\Delta i(n+1) = -\frac{s_2 - s_e}{s_1 + s_e} \cdot \Delta i(n). \quad (14)$$

Як видно з (14), при $s_e = s_2$ коливання струму можуть бути придушені всього за один такт ($\Delta i(n+1) = 0$). Система у цьому разі має найменшу тривалість перехідного процесу. У подальшому дана умова називається повною компенсацією.

Особливістю активного ВЧ ККП є те, що вхідна напруга змінюється в часі. А отже, для забезпечення повної компенсації необхідно змінювати величину нахилу компенсуючої пилкоподібної напруги на періоді вхідної напруги. Це може бути досягнуте аналоговим контролером, але такий метод призводить до суттєвого ускладнення системи керування. У даній роботі представлена цифрова система (рис. 11), що забезпечує адаптивне керування коректором коефіцієнта потужності без ускладнення структури контролера. Дана СК може бути реалізована на основі цифрового сигнального процесора або мікроконтролера.

Адаптивний алгоритм керування забезпечує потрібний нахил КПН в усьому інтервалі зміни вхідної та вихідної напруг. У цьому разі величина нахилу пилкоподібної напруги враховується під час обчислення порогового значення струму i_{cmp} згідно виразу (8) (рис. 8).

Введемо коефіцієнт компенсації k_{sc} :

$$k_{sc} = \frac{s_e}{s_1}. \quad (15)$$

Тоді (8) можна переписати у вигляді:

$$i_{cmp} = \frac{1}{1 + k_{sc}} (i^* + k_{sc} i_n). \quad (16)$$

Отже, порогове значення визначається еталонним сигналом i^* та величиною струму i_n на початку n-го такту, а коефіцієнт k_{sc} враховує нахил КПН. Мінімальне значення k_{sc} становить $\frac{0.5U_{вх} - U_{вх}}{U_{вх}}$, а повне $-\frac{U_{вх} - U_{вх}}{U_{вх}}$.

Запропонований адаптивний алгоритм цифрового керування коректором коефіцієнта потужності забезпечує повну компенсацію субгармонік струму в усьому діапазоні зміни вхідної та вихідної напруг. При цьому коливання струму можуть бути придушені всього за один такт, що дає змогу досягнути найменшої тривалості перехідного процесу.

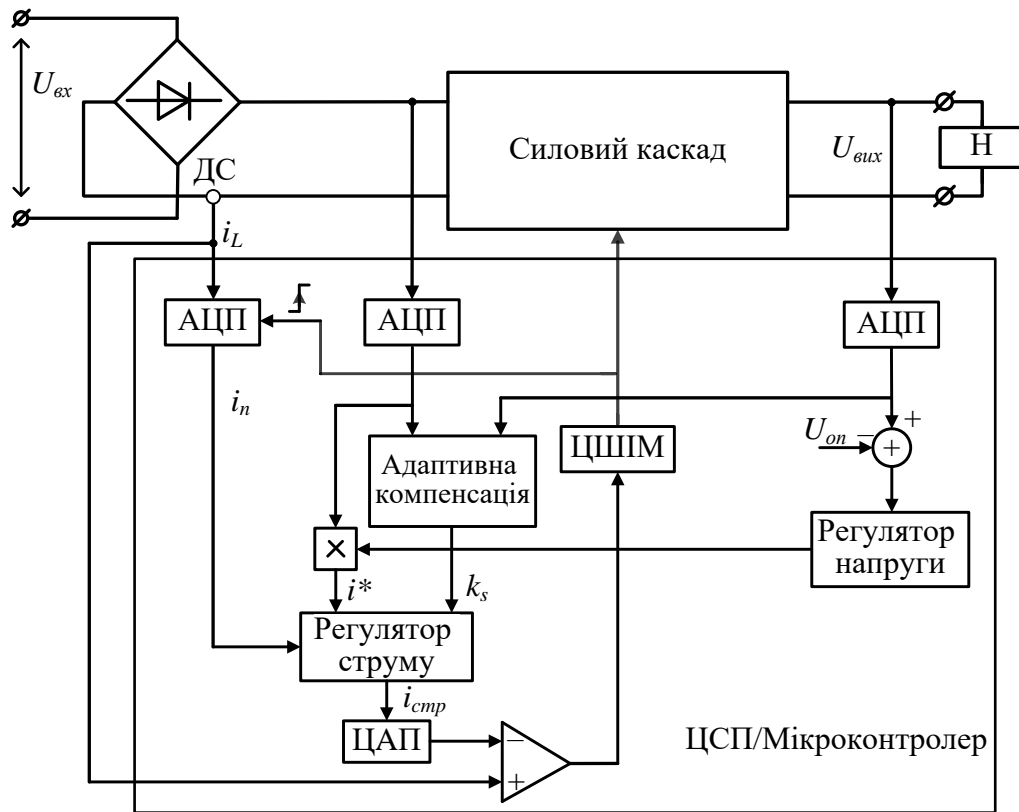


Рис. 11. Схема ВЧ ККП з адаптивним цифровим керуванням

Четвертий розділ присвячений моделюванню роботи високочастотних коректорів коефіцієнта потужності. У середовищі Simulink розроблені моделі, що дозволяють дослідити статичні та динамічні характеристики коректорів коефіцієнта потужності, оцінити показники електромагнітної сумісності та обрати необхідну схему коректора для конкретного практичного випадку.

На рис. 12 представлена модель ККП зі схемою додаткової комутації транзистора. СДКТ складається з генератора прямокутних імпульсів Pulse Generator та лічильника імпульсів Counter. Лічильник підсумовує вхідні імпульси від генератора, що подаються на його вхід Clk. На вхід Rst, що призначений для скидання лічильника в нульовий стан, подається сигнал від датчика нульового струму. Сигнал із виходу переповнення лічильника Nit подається на J-вхід тригера. Блок Sum використовується для підсумовування сигналів, що надходять від датчика нульового струму (ДНС) та лічильника і фактично виконує роль елемента АБО.

На рис. 13 наведена діаграма вхідного струму коректора зі схемою додаткової комутації транзистора. Діаграма отримана при опорі навантаження, рівному 160 Ом. Загальний коефіцієнт гармонік струму у даному випадку складає 26,78 %.

Як видно з результатів моделювання, введення в модель ККП без зворотного зв'язку схеми додаткової комутації транзистора дійсно дозволяє уникнути ефекту спотворення вхідного струму. На ділянках, де раніше струм був спотвореним, тепер він має пульсуючий характер і не перевищує еталонного сигналу. Отже, введення схеми додаткової комутації покращило динамічні властивості коректора. Отриманий пристрій є більш стійким до зменшення опору навантаження.

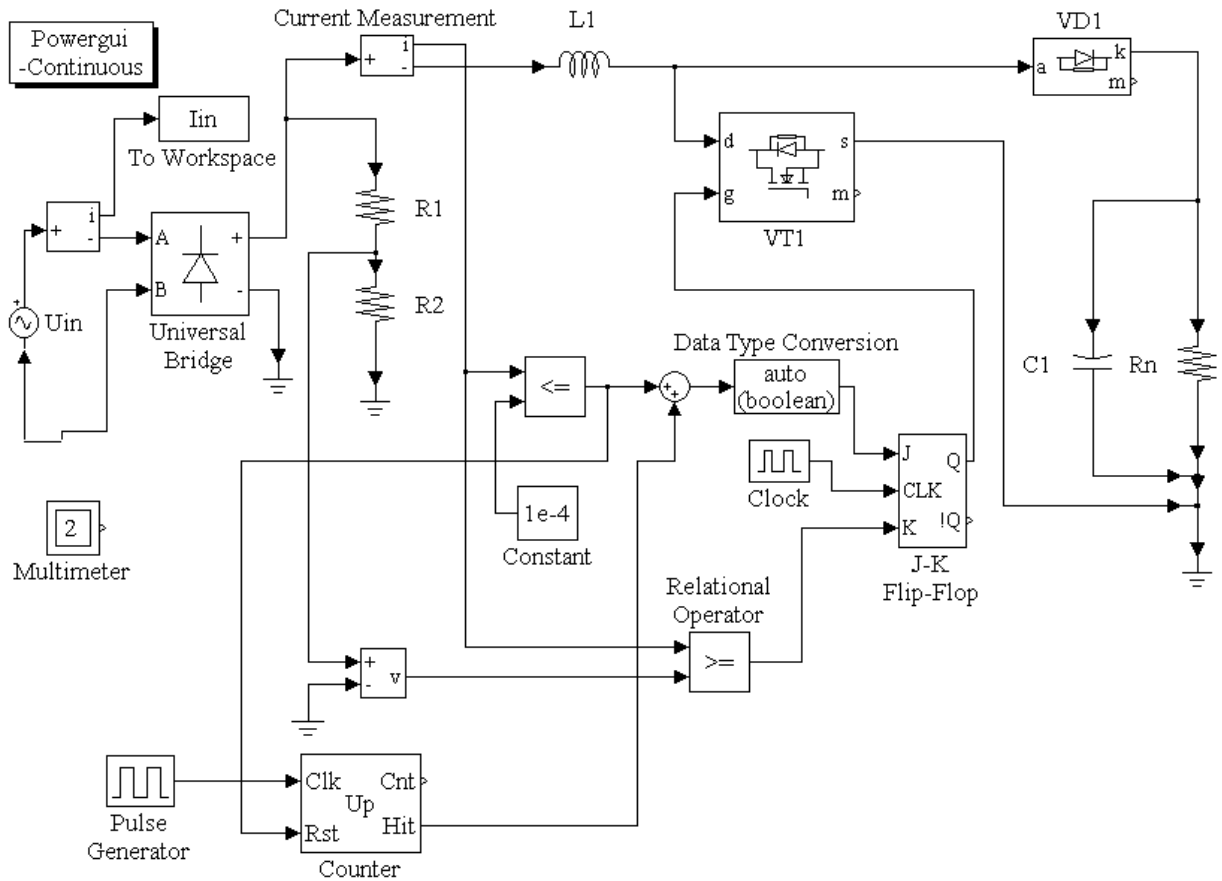


Рис. 12. Модель ККП зі схемою додаткової комутації транзистора

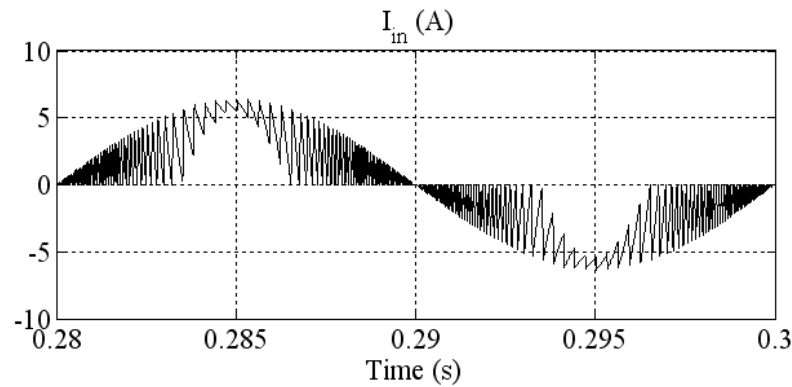


Рис. 13. Діаграма вхідного струму ККП зі схемою додаткової комутації транзистора при $R_n = 160 \text{ Ом}$

Дослідимо ККП з піковим методом керування. Розглянемо наступні корегуючі впливи: підмішування сигналів виду $A|\cos \omega t|$ та $A - B \sin^2 \omega t$, де $A = S_e T_s = 2 \text{ В}$,

$$B = \frac{U_m^2 T_s}{2LU_{\text{вих}}} = 1,32 \text{ В}.$$

Дослідження введення корегуючого сигналу $A|\cos \omega t|$ показало, що величина третьої гармоніки становить лише 1 % від основної. Загальний коефіцієнт гармонік струму зменшився більш ніж в чотири рази і дорівнює 5,8 %. Введення корегуючого впливу $A - B \sin^2 \omega t$ (рис. 14) дозволило досягнути подальшого покращення спектру

вхідного струму коректора. Вхідний струм при цьому майже синусоїдний з коефіцієнтом гармонік всього 1,3 %.

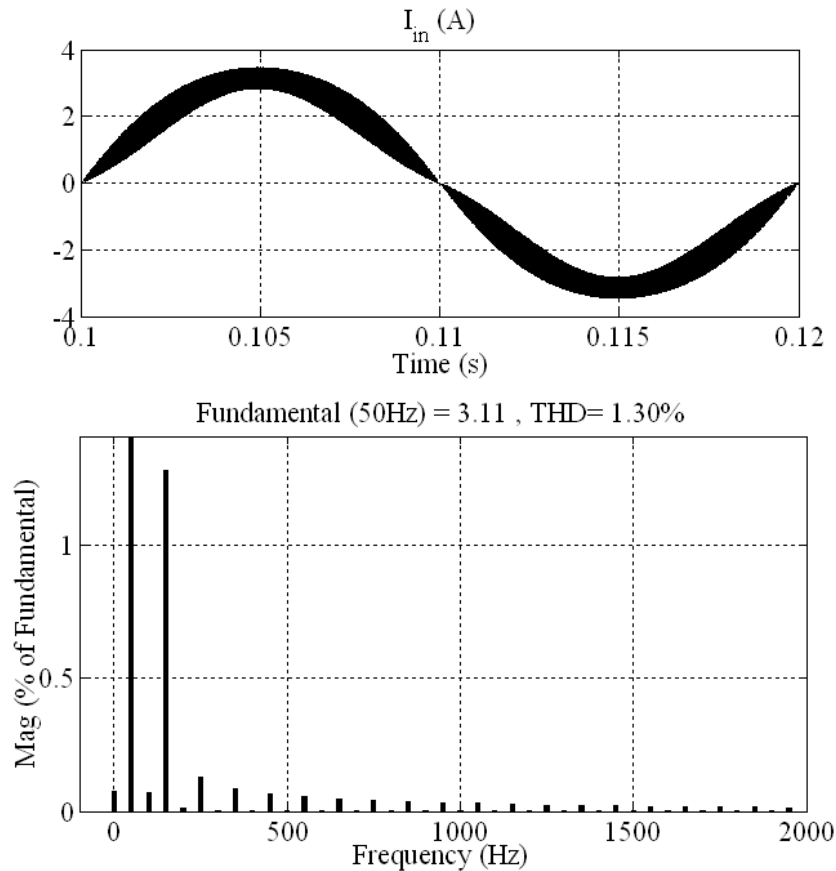


Рис. 14. Вхідний струм та спектр ККП з корегуючим впливом $A - B \sin^2 \omega t$

Таким чином, моделювання підтвердило теоретичні прогнози щодо доцільності введення корегуючого впливу для покращення спектра вхідного струму коректора коефіцієнта потужності з методом керування за піковим струмом. З розглянутих способів найкращий результат забезпечує корегуючий вплив $A - B \sin^2 \omega t$, проте недоліком такого підходу є його складність. Простішим варіантом є введення корегуючого впливу $A |\cos \omega t|$. Отримане значення THD при цьому є трохи вищим, але цілком задовольняє вимогам існуючих стандартів.

У таблиці 1 наведена залежність 3-ї, 5-ї та 7-ї гармонік вхідного струму від коефіцієнта передачі K (рис. 7) для ВЧ ККП з методом керування з фільтрацією третьої гармоніки. Значення вищих гармонік вказані відносно основної. Як видно з таблиці, даний метод дозволяє зменшити величину 3-ї гармоніки. Проте одночасно зі зменшенням 3-ї гармоніки спостерігається зростання 5-ї та 7-ї, що є недоліком даного методу.

Проведено дослідження цифрових систем керування ВЧ коректорами коефіцієнта потужності. Для покращення спектра вхідного струму коректора з піковим керуванням введено корегуючий сигнал по похідній. У цифровому виді розрахунок похідної проводиться згідно (9). Дослідження показало, що введення похідної дозволило суттєво підвищити якість вхідного струму коректора

коефіцієнта потужності. Загальний коефіцієнт гармонік при цьому зменшився з 24,2% до 3,66 %.

Таблиця 1

Залежність вищих гармонік струму від коефіцієнта К

К	0	0.5	1	1.5	2	3	4	5
$I_{(3)}, \%$	23.32	21.91	20.52	19.06	16.3	13.32	11.28	9.77
$I_{(5)}, \%$	5.48	4.17	3.33	3.07	3.3	6.52	8.89	10.67
$I_{(7)}, \%$	0.88	2.59	4.22	5.82	8.53	11.04	12.59	13.69
THD, %	24	22.48	21.25	20.25	18.86	18.81	19.54	20.43

Дослідження адаптивного цифрового керування ККП проводилося для двох випадків – мінімальної компенсації ($k_{sc} = \frac{0.51 \cdot U_{вих} - U_{вх}}{U_{вх}}$) та повної компенсації

($k_{sc} = \frac{U_{вих} - U_{вх}}{U_{вх}}$). На рис. 15 представлено діаграму вхідного струму та його спектру

у випадку мінімальної компенсації. Видно, що введення у систему мінімального коефіцієнта компенсації дозволяє зменшити величину THD з 24,2% до 18,69%. Отже, результати моделювання підтвердили теоретичні положення.

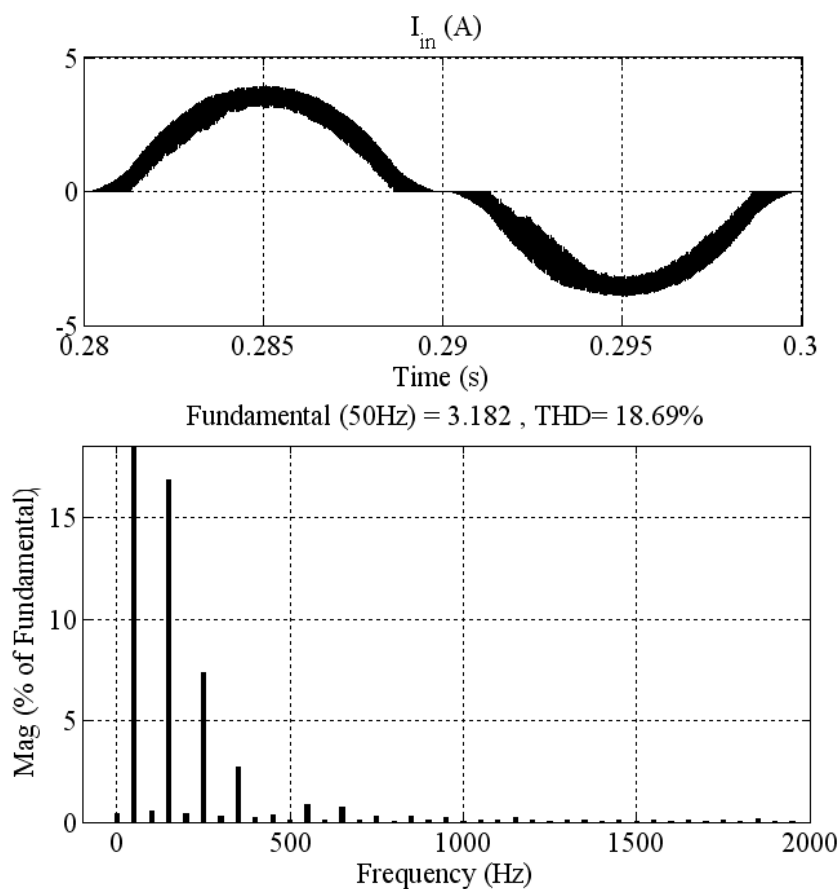


Рис. 15. Вхідний струм та його спектр у випадку мінімальної компенсації

Таким чином, застосування адаптивного цифрового керування дозволяє зменшити спотворення вхідного струму коректора.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена задача підвищення рівня електромагнітної сумісності напівпровідникових перетворювачів електроенергії з мережею живлення шляхом вдосконалення існуючих методів керування високочастотними коректорами коефіцієнта потужності. Результати, викладені у дисертації, дозволили зробити наступні висновки:

1. На підставі проведеного у роботі аналізу досягнуто вдосконалення сучасних методів керування активними високочастотними коректорами коефіцієнта потужності.

2. Двокаскадна структура напівпровідникових перетворювачів дозволяє використовувати коректор без зворотного зв'язку по вихідній напрузі. Але у випадку зростання навантаження це може призвести до суттєвого просідання вихідної напруги, що викликає спотворення вхідного струму коректора. Розроблена схема додаткової комутації транзистора забезпечує зменшення коефіцієнт гармонік струму на 18% та розширити діапазон роботи коректора.

3. Отриманий вираз для усередненого вхідного струму ККП з піковим методом керуванням показав наявність постійної складової, що суттєво погіршує його спектр. Покращення спектру вхідного струму коректора забезпечено введенням додаткового корегуючого впливу, коефіцієнт гармонік струму зменшується при цьому на 25%.

4. Вперше для коректорів коефіцієнта потужності застосовано адаптивне цифрове керування за піковим струмом, що зменшує спотворення вхідного струму на 7%. Такий підхід забезпечує повну компенсацію субгармонік струму в усьому діапазоні зміни вхідної та вихідної напруг ККП.

5. Показано, що при пуску коректора відбувається значний стрибок вхідного струму. Для уникнення вказаного недоліку запропоновано алгоритм пуску коректора, при якому спочатку після підключення пристрою до мережі відбувається заряджання вихідного конденсатора через додатковий зарядний пристрій. Включення коректора здійснюється тільки після того, як вихідна напруга досягне певного рівня.

6. Запропоновано метод керування коректором з фільтрацією третьої гармоніки, що дозволяє зменшити рівень даної гармоніки у вхідному струмі коректора на 5-10%.

7. Розроблено цифрове керування ВЧ коректором коефіцієнта потужності за піковим струмом з корегуванням еталонного сигналу по похідній, що дозволяє досягнути спрощення структури системи керування у порівнянні з аналоговим прототипом.

8. Розроблено цифрову систему керування коректором зі спрощеним зворотним зв'язком, що усуває спотворення вхідного струму ККП при суттєвому збільшенні навантаження, забезпечує попередню стабілізацію вихідної напруги коректора та зменшує кількість обчислень сигналу зворотного зв'язку по вихідній напрузі на 40%.

9. Достовірність запропонованих у дисертації теоретичних положень підтверджено результатами моделювання роботи коректорів у середовищі Simulink.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Demchenko Yu.S. Investigation of the Energy Characteristics of High Frequency Power Factor Correctors / Yu.S. Demchenko // Electronics and communications. – 2014.–№ 6. – P. 34 – 37 (*включено до наукометричної бази даних IndexCopernicus*).

2. Демченко Ю.С. Методи корекції коефіцієнта потужності / Ю.С. Демченко, В.В. Рогаль // Електроніка та зв'язок. – 2013. – №6. – С. 24 – 29 (*здобувачем проаналізовано існуючі методи корекції коефіцієнта потужності*) (*включено до наукометричної бази даних IndexCopernicus*).

3. Рогаль В.В. Коректор коефіцієнта потужності з адаптивним цифровим керуванням по піковому струму / В.В. Рогаль, Ю.С. Демченко // Електроніка та зв'язок. – 2015. – №5. – С. 29 – 35 (*здобувачем розроблена схема коректора з корегуванням еталонного сигналу по похідній*) (*включено до наукометричної бази даних IndexCopernicus*).

4. Рогаль В.В. Дослідження динамічних процесів у високочастотних пристроях корекції коефіцієнта потужності / В.В. Рогаль, Ю.С. Демченко // Технічна електродинаміка. – 2012. – №2. – С. 117 – 118 (*здобувачем розроблена схема додаткової комутації транзистора*) (*включено до наукометричної бази даних Scopus*).

5. Рогаль В.В. Дослідження спектру вхідного струму високочастотних коректорів коефіцієнта потужності / В.В. Рогаль, Ю.С. Демченко // Технічна електродинаміка. – 2014. – №5. – С. 80 – 82 (*здобувачем розроблено комп'ютерні моделі коректорів коефіцієнта потужності та досліджено залежності спектру вхідного струму від навантаження*) (*включено до наукометричної бази даних Scopus*).

6. Рогаль В.В. Способи покращення спектру вхідного струму коректора коефіцієнта потужності / В.В. Рогаль, Ю.С. Демченко // Технічна електродинаміка. – 2015. – №6. – С. 29 – 33 (*здобувачем розроблена схема коректора з корегуванням еталонного сигналу по похідній*) (*включено до наукометричної бази даних Scopus*).

7. Ямненко Ю.С. Підвищення ефективності корекції коефіцієнта потужності / Ю.С. Ямненко, Ю.С. Демченко // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2018. – №4. – С. 42 – 46 (*здобувачем розроблено цифровий коректор зі спрощеним зворотним зв'язком та проведено порівняння запропонованого алгоритму з класичним керуванням зі зворотним зв'язком по напрузі*).

8. Демченко Ю.С., Рогаль В.В., Коваленко Є.Ю. Граничний спосіб керування активними високочастотними коректорами коефіцієнта потужності: пат. у 201703083 Україна: МПК H02M1/42, G05F1/70. № 123231; заявл. 31.03.2017; опубл. 26.02.2018, Бюл. № 4 (*здобувачем здійснено розробку способу керування високочастотними коректорами*).

9. Демченко Ю.С., Рогаль В.В., Коваленко Є.Ю. Спосіб керування активними високочастотними коректорами коефіцієнта потужності по піковому струму: пат. у 201703082 Україна: МПК H02M1/42, G05F1/70. № 123230; заявл.

31.03.2017; опубл. 26.02.2018, Бюл. № 4 (здобувачем здійснено розробку способу керування високочастотними коректорами).

10. Демченко Ю.С., Рогаль В.В., Коваленко Є.Ю. Спосіб керування активними високочастотними коректорами коефіцієнта потужності по піковому струму: пат. у 201703084 Україна: МПК H02M1/12, H02M1/42, G05F1/70. № 123232; заявл. 31.03.2017; опубл. 26.02.2018, Бюл. № 4 (здобувачем здійснено розробку способу керування високочастотними коректорами).

11. Demchenko Yu. Energy Performance Comparison of Active High Frequency Power Factor Correctors / Yu. Demchenko // Proceedings of the IEEE XXXIV International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO) 2014. – Kyiv (Ukraine). – 15-18 April 2014. – P. 447 – 450.

12. Demchenko Yu. Analog and Digital Power Factor Correction Control Investigation / Yu. Demchenko // Proceedings of the IEEE XXXV International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO) 2015. – Kyiv (Ukraine). – 21-24 April 2015. – P. 475 – 477.

13. Демченко Ю.С. Дослідження роботи пристрою корекції коефіцієнта потужності / Ю.С. Демченко // Збірник праць IV міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених «Електроніка-2011», 29-31 березня, 2011. – Київ. – Ч.2. – С. 159 – 164.

14. Рогаль В.В. Керування коректором коефіцієнта потужності з корегуванням по похідній / В.В. Рогаль, Ю.С. Демченко // Матеріали учасників міжнародної конференції «Інтелектуальні енергетичні системи - ESS'15». – Київ. – 9-12 червня 2015. – С. 104 – 108 (здобувачем розроблено схему коректора з корегуванням еталонного сигналу по похідній).

АНОТАЦІЇ

Демченко Ю.С. Високочастотні коректори коефіцієнта потужності в джерелах електроживлення з безтрансформаторним входом. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2019.

Дисертація присвячена вирішенню науково-технічної задачі удосконалення існуючих методів керування активними високочастотними коректорами коефіцієнта потужності в джерелах електроживлення з безтрансформаторним входом для підвищення рівня електромагнітної сумісності напівпровідникових перетворювачів електроенергії з мережею живлення.

У роботі проведено детальний аналіз трьох поширених методів активної високочастотної корекції коефіцієнта потужності: методу граничного керування, методу керування за піковим струмом та методу керування за середнім струмом. Досліджено аналогові та цифрові системи керування коректорами.

Розроблено схему додаткової комутації транзистора, що усуває спотворення вхідного струму та розширює діапазон роботи коректора. Для покращення спектра

вхідного струму коректора з піковим методом керування запропоновано вводити в систему керування додатковий корегуючий вплив. Запропоновано метод керування з фільтрацією третьої гармоніки, що дозволяє зменшити величину даної гармоніки. Розроблено цифрове керування коректором за піковим струмом з корегуванням еталонного сигналу по похідній, що дозволяє досягнути спрощення структури системи керування. Розроблена цифрова система, що реалізує адаптивне керування коректором коефіцієнта потужності та забезпечує потрібний нахил компенсуючої пилкоподібної напруги в усьому діапазоні зміни вхідної та вихідної напруг коректора.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, загальний коефіцієнт гармонік, коректор коефіцієнта потужності, метод керування, напівпровідниковий перетворювач, показники якості струму, система керування.

Демченко Ю.С. Высокочастотные корректоры коэффициента мощности в источниках электропитания с бестрансформаторным входом. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.12 – полупроводниковые преобразователи электроэнергии. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» МОН Украины, Киев, 2019.

Диссертация посвящена решению научно-технической задачи совершенствования существующих методов управления активными высокочастотными корректорами коэффициента мощности в источниках электропитания с бестрансформаторным входом для повышения уровня электромагнитной совместимости полупроводниковых преобразователей электроэнергии с питающей сетью.

В работе проанализированы три распространенные методы активной высокочастотной коррекции коэффициента мощности: метод предельного управления, метод управления по пиковому току и метод управления по среднему току. Исследованы аналоговые и цифровые системы управления корректорами.

Разработана схема дополнительной коммутации транзистора, которая устраняет искажения входного тока и расширяет диапазон работы корректора. Для улучшения спектра входного тока корректора с пиковым методом управления предложено вводить в систему управления дополнительный корректирующий сигнал. Предложен метод управления с фильтрацией третьей гармоніки, что позволяет уменьшить величину данной гармоніки. Разработано цифровое управление корректором по пиковому току с корректировкой эталонного сигнала по производной, что позволяет достичь упрощения структуры системы управления. Разработана цифровая система, реализующая адаптивное управление корректором коэффициента мощности и обеспечивающая нужный наклон компенсирующего пилообразного напряжения во всем диапазоне изменения входного и выходного напряжений корректора.

Ключевые слова: корректор коэффициента мощности, метод управления, общий коэффициент гармоник, показатели качества тока, полупроводниковый преобразователь, система управления, электромагнитная совместимость.

Demchenko Yu.S. High frequency power factor correctors in power supplies with transformerless input. – Manuscript.

Dissertation for obtaining the PhD degree on specialty 05.09.12 – Semiconductor electric power converters. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to solving the scientific and technical problem of improving the existing control methods of active high-frequency power factor correctors in power supplies with transformerless input for increasing the level of electromagnetic compatibility of semiconductor power converters with the power supply network.

The dissertation analyzes the literary sources devoted to the methods of increasing the power factor of semiconductor power converters, methods of active high frequency power factor correction and existing digital control systems of power supplies.

The research of the switch-on process of the active high frequency power factor corrector was carried out. A significant inrush current was detected. This is due to the fact that at the initial moment the output capacitor is discharged and as a result the corrector choke is directly connected to the input voltage on both switching intervals. The largest jump of the input current occurs when the corrector is switched on in the moment of maximum network voltage. In order to eliminate this shortcoming a corrector startup algorithm is proposed, the main idea is to first charge the output capacitor with an additional charger, while the load is disconnected from the corrector. After the voltage on the capacitor has risen to a certain level the corrector is turned on. At the same time the load is also connected. By choosing the voltage level to which the capacitor is charged it is possible to significantly reduce the inrush current or even to get rid of it.

Investigation of the corrector without voltage feedback showed that the output voltage drops below the amplitude value of the supply voltage in the case of a noticeable increase of the load, which leads to the distortion of the input current. To eliminate the distortion of the input current and extend the operating range of the corrector the scheme of additional transistor switching was developed. This scheme opens the power transistor, thus the choke of the corrector accumulates the energy that will be transferred into the capacitor after closing of the transistor, raising the output voltage. This approach allows to substantially improve the input current shape.

An expression for calculating the average input current of the corrector with a peak control method was obtained. It is obvious from the expression that the average current of the choke, which is the rectified input current, in addition to the sinusoidal component also has a sine square component and constant component, which significantly worsens the spectrum of current. To improve the spectrum it is proposed to introduce an additional corrective influence into the control system. A part of the rectified input voltage of the corrector is applied to the differentiating circuit. The absolute output signal of the circuit is added to the output multiplier signal. This control method allows to eliminating current distortion by increasing the reference signal in a zero-crossing area of a supply voltage.

Further improvement of the input current spectrum is achieved by introducing a signal that contains the constant component and the square of the sinusoid.

The distortion of the input current of the corrector with a peak control method is mainly due to the presence of the third harmonic. The developed third-harmonic filtering control method allows to reduce the magnitude of third harmonic and greatly improves the input current spectrum.

Also the development of digital control methods for the correctors was investigated in the dissertation. The digital control system of active high-frequency power factor correctors with average current control method was created. The synthesis process consists of determining the coefficients of the differential equation by finding a discrete transfer function of an analog prototype. Bilateral transform is applied to convert continuous transfer functions into discrete. The expressions for the digital current and voltage regulators are obtained.

Digital peak current control with the correction of a derivative reference signal is developed, which allows to simplify the structure of the control system. In the digital form only two mathematical operations are needed to calculate the derivative – subtraction and multiplication. Thus digital implementation of the corrector allows to achieve a significant simplification of the control system structure. Another feature of such corrector is absence of a sawtooth voltage, its presence is mathematically reproduced when calculating the moment of the corrector's power key closing.

A well-known feature of the peak current control method is the appearance of subharmonic oscillations in the case of duty cycle higher than 50%. To eliminate these oscillations an additional compensating sawtooth voltage with a slope s_e is introduced into the control system. The smallest duration of the transient process can be achieved if the slope s_e is equal to the falling slope of the choke current s_2 . However the corrector input voltage varies in time as well as the current falling slope. Therefore to ensure the condition $s_e=s_2$ the slope of the compensating sawtooth voltage has to be adjustable. An analog controller can achieve this, but such approach leads to a significant complication and cost increase of the control system. The paper presents a digital system that implements the adaptive control of the power factor corrector and provides the required compensating sawtooth voltage slope over the entire range of input and output voltage. Digital signal processor or microcontroller can be used to implement this control system.

A digital corrector with a simplified feedback is developed. The corrector eliminates input current distortion caused by significant load increase and provides a preliminary stabilization of the corrector output voltage. The amount of calculations for the proposed algorithm decreased almost twice compared to a classical control.

The validity of the given theoretical material is confirmed by the results of computer modeling in Simulink environment. The developed computer models allow to investigate the static and dynamic characteristics of active high-frequency power factor correctors.

Keywords: control method, control system, current quality rate, electromagnetic compatibility, power factor corrector, semiconductor converter, total harmonic distortion.