

Національна академія наук України
Інститут електродинаміки

ЧОПИК ВАСИЛЬ ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 621.314.58

**МАТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З РОЗШИРЕНИМ ДІАПАЗОНОМ
РЕГУЛЮВАННЯ ВХІДНОГО РЕАКТИВНОГО СТРУМУ ДЛЯ АКТИВНОЇ
КОМПЕНСАЦІЇ СКЛАДОВИХ ПОТУЖНОСТІ**

Спеціальність 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті електродинаміки НАН України, м. Київ.

Науковий керівник – доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Михальський Валерій Михайлович,
Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ, провідний науковий співробітник відділу перетворення та стабілізації електромагнітних процесів.

Офіційні опоненти: – доктор технічних наук, професор
Сенько Віталій Іванович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Київ,
професор кафедри теоретичної електротехніки;

– кандидат технічних наук, доцент
Іванець Сергій Анатолійович,
Чернігівський державний технологічний університет
Міністерства освіти і науки України, м. Чернігів,
декан факультету електронних та інформаційних технологій.

Захист дисертації відбудеться «___» _____ 2014 р. об ___ годині
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.187.01 в Інституті електродинаміки
НАН України за адресою:
03680, м.Київ-57, просп. Перемоги, 56. Тел. 456-91-15.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту електродинаміки НАН України за вищевказаною адресою.

Автореферат розісланий «___» _____ 2014р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Ю.М. Гориславець

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Світовий промисловий розвиток невід'ємно пов'язаний з перетворенням електроенергії. Більше половини електроенергії, що виробляється, споживається в перетвореному вигляді (в основному електроприводом різного призначення), тому підвищення техніко-економічних показників систем електроприводів є важливим внеском у вирішення важливих питань енерго- і ресурсозбереження. Це вирішення значною мірою залежить від перетворювачів частоти (ПЧ), як складової частини всієї системи електроприводу. В останні десятиріччя регульований електропривод змінного струму отримав суттєвий поштовх для подальшого інтенсивного розвитку завдяки стрімкому вдосконаленню силової напівпровідникової електроніки, що дало можливість створення нових типів ПЧ. Основні вимоги, які висуваються до ПЧ у складі електроприводу, можна сформулювати наступним чином: висока точність відпрацювання заданої вихідної напруги (струму); можливість реалізації двонаправленого потоку енергії від мережі до навантаження і навпаки; відповідність вимогам електромагнітної сумісності; регульований вхідний коефіцієнт потужності для вирішення задач активної компенсації складових потужності.

Серед ПЧ, які найбільше відповідають наведеним вимогам, можна виділити такий клас перетворювачів, як матричні перетворювачі (МП), що інтенсивно досліджуються і впроваджуються останнім часом.

Враховуючи велику кількість досліджень МП в останні роки, потрібно відзначити ключові проблеми створення практичних методів керування, які забезпечували б задану якість вхідних і вихідних характеристик МП, і принципів безпечної комутації струму ключами двосторонньої провідності, регулювання вхідного коефіцієнта потужності в широких межах (тобто регулювання вхідного реактивного струму). Ці проблеми не отримали цілком задовільних рішень, особливо в умовах спотворень напруг мережі живлення і струмів навантаження. Існуючі підходи до керування не використовують можливості силової топології МП повною мірою, а ті, що мають таку можливість, існують в теоретичному плані як масивні математичні конструкції розрахунку відносних тривалостей використання ключів МП, які є важко реалізованими в масштабі реального часу при оперативному (в межах одного-двох циклів модуляції) керуванні декількома одночасно регульованими параметрами. Регулювання вхідного реактивного струму для задач компенсації складових потужності вимагає використання теорії миттєвої потужності для кількісного визначення глибини регулювання, а також визначення меж, доцільності та можливості такого регулювання. Ключові проблеми застосування існуючих методів розрахунку компенсаційних струмів для активної компенсації складових потужності полягають у: топологічній невідповідності методів розрахунку по відношенню до силових схем; вузькому цільовому призначенні існуючих методів розрахунку та регулювання компенсаційного струму активних фільтрів, побудованих виключно на основі автономних інверторів напруги (АІН) з масивною батареєю електролітичних конденсаторів у ланці постійного струму; надлишковості підходів до розрахунку з використанням проміжкових математичних перетворень в різні координатні системи.

Невирішеність наведеного комплексу задач перешкоджає створенню і широкому впровадженню ефективних електроприводів з використанням МП, силова топологія яких може забезпечувати неспотворююче формування вихідних напруги та струму, а також додатково виконувати функції компенсатора складових потужності на вході

перетворювача. Використання силової топології МП як активного фільтра в даний час мало досліджено, а існуючі пропозиції та рішення носять одиничний характер, де МП є складовою частиною гібридних регенеративних систем з двигун-генераторами, сполученими з великим маховим колесом, або як альтернатива перетворювачам в складі гнучких систем передачі змінного струму (Flexible alternating current transmission systems, FACTS), де традиційно застосовується "регенеруючий випрямляч - інвертор напруги" з накопичувачем в ланці постійного струму.

З наведених причин створення методів керування МП, що забезпечують розширення діапазону регулювання вхідного реактивного струму для активної компенсації складових потужності, є важливою науковою задачею, а тема досліджень в цьому напрямку є актуальною.

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

Дослідження за темою дисертаційної роботи виконувались в Інституті електродинаміки відповідно до планів НДР НАН України за темами: "Дослідити засоби покращення якості керування матричними перетворювачами" (шифр 1.7.3.243, "Сигнал-2", затверджено постановою Бюро ВФТПЕ НАН України від 22.02.2005р., протокол №4, № ДР 0105U002313); "Розробка та дослідження засобів підвищення якості електроенергії на вході і виході напівпровідникових перетворювачів частоти, напруги і струму в умовах несиметрії та несинусоїдальності напруг мережі живлення" ("Модулятор", затверджено постановою Бюро ВФТПЕ НАН України від 06.10.2009р., протокол №13, № ДР 0109U006757); "Розробити принципи та критерії оптимального керування джерелами живлення електромагнітних сепараторів, спеціальних трансформаторів, індукторів в технологіях термічної обробки матеріалів, створити на їх основі системи адаптивного керування" ("База-П5", затверджено постановою Бюро ВФТПЕ НАН України від 6.10.2009р., протокол №13, № ДР 0109U006889). При виконанні цих робіт автор був відповідальним виконавцем розділів, пов'язаних з розробкою методів керування напівпровідниковими перетворювачами, алгоритмів керування з розширеним діапазоном регулювання вхідного реактивного струму МП, застосуванням теорії миттєвої потужності для підвищення якості електроенергії на вході та виході напівпровідникових перетворювачів та забезпечення їх електромагнітної сумісності з мережею живлення та навантаженням.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розвиток теорії матричних перетворювачів шляхом створення нових та удосконалення існуючих методів керування, спрямованих на розширення діапазону регулювання вхідного реактивного струму для підвищення ефективності активної компенсації небажаних складових потужності.

Досягнення поставленої мети передбачало вирішення таких основних задач:

- огляд існуючих методів керування матричними перетворювачами при застосуванні їх як пристроїв перетворення параметрів електроенергії та активних компенсаторів небажаних складових потужності;
- порівняльний аналіз принципів керування та методів передачі реактивної енергії з виходу на вхід матричних перетворювачів;
- розробка методу керування матричними перетворювачами з використанням сингулярного розкладання для розширення діапазону регулювання вхідного реактивного струму (потужності) в умовах несиметрії напруг мережі живлення;
- розробка алгоритму керування матричними перетворювачами з використанням екстремальних положень просторових векторів керуючих функцій;

- дослідження впливу характеру керуючих функцій МП з розширеним діапазоном регулювання вхідної реактивної потужності на показники якості вихідної напруги, вхідного струму перетворювача та величину пульсацій електромагнітного моменту асинхронних двигунів;

- розробка пропорційно-векторного методу керування паралельними активними фільтрами;

- визначення досяжних діапазонів регулювання вхідної реактивної потужності матричних перетворювачів в складі паралельних активних фільтрів при використанні різних способів формування вхідного реактивного струму;

- проведення експериментальних досліджень матричних перетворювачів з розширеним діапазоном регулювання вхідного реактивного струму.

Об'єктом дослідження є процеси перетворення параметрів електроенергії з застосуванням матричних перетворювачів.

Предметом дослідження є методи керування матричними перетворювачами, спрямовані на розширення діапазону регулювання вхідного реактивного струму.

Методи дослідження. При виконанні поставлених в роботі завдань використовувались: теорія миттєвих потужностей, методи перетворення координат, метод просторових векторів, елементи матричного числення та векторної алгебри, гармонічний аналіз та синтез кривих напруг та струмів, теорія електричних кіл, теорія диференціальних рівнянь, фізичне та математичне моделювання з використанням засобів MathCAD і MATLAB.

Наукова новизна одержаних результатів:

- розроблено новий метод керування матричними перетворювачами із застосуванням сингулярного розкладання матриць для розширення діапазону регулювання вхідного реактивного струму в умовах несиметрії напруг мережі живлення, що полягає у використанні модифікованого перетворення Парка, яке враховує ступінь несиметрії для визначення відносних тривалостей застосування стаціонарних станів ключів перетворювачів;

- встановлено залежності показників якості вихідної напруги, вхідного струму та величини пульсацій електромагнітного моменту двигунів, що живляться від МП, від характеру функцій керування ключами перетворювача, згідно з якими безрозривність та підвищення ступеня гладкості цих функцій забезпечують відповідне підвищення показників якості електроенергії та зменшення пульсацій моменту;

- розроблено новий метод пропорційно-векторного керування силовим перетворювачем паралельного активного фільтра, який полягає у формуванні вектора напруги на обмежуючому реакторі фільтра однонаправленим з вектором похибки між розрахунковим та реальним струмами компенсації; визначено сукупність обмежень, що накладаються на умови ефективного функціонування паралельних активних фільтрів і полягають у виборі діапазонів робочих напруг та параметрів реактора для забезпечення необхідної динаміки регулювання та заданої якості споживаного з мережі струму;

- запропоновано нову топологію паралельного активного фільтра, яка полягає в застосуванні як силового перетворювача компенсатора автономної системи «МП – трифазний ємнісний накопичувач», що дозволяє забезпечити реалізацію принципу “All Silicon Solution”;

- розроблено принципи забезпечення максимально можливого діапазону регулювання вхідного реактивного струму МП, які полягають у застосуванні для визначення відносних

тривалостей використання стаціонарних векторів нових співвідношень, що містять коефіцієнти прямого представлення вихідних параметрів перетворювача;

- розроблено новий метод розрахунку струмів компенсації паралельного активного фільтра з незалежним визначенням небажаних складових без використання проміжкових перетворень координат для трифазного трипровідного навантаження, який полягає в аналітичній мінімізації повного циклу математичних перетворень в теорії миттєвої потужності.

Практичне значення одержаних результатів:

- розроблено алгоритм керування МП з використанням сингулярного розкладання матриць для розширення діапазону регулювання вхідного реактивного струму, модифікованого для застосування в умовах несиметрії напруг мережі живлення;

- розроблено алгоритм керування МП, який реалізовує вибір оптимального екстремального положення векторів керуючих функцій, виходячи з критерію мінімізації відхилення визначених відносних тривалостей використання стаціонарних станів перетворювача від значень цих тривалостей на попередніх циклах модуляції;

- запропоновано методику пропорційно-векторного керування струмами компенсаторів, яка дозволяє регулювати довжину елементарних переміщень кінця вектора струму за цикл широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) і, тим самим, здійснювати регулювання амплітуди пульсацій струму та швидкодії роботи компенсатора;

- розроблено алгоритм керування МП, що реалізовує максимально можливий діапазон регулювання вхідної реактивної потужності і використовує спрощену процедуру розрахунку відносних тривалостей застосування стаціонарних станів ключів, заснований на узагальнюючих рішеннях трансферних рівнянь, які описують взаємозв'язки параметрів перетворювача;

- розроблено спосіб визначення струмів компенсації для умов несиметрії та несиносоїдальності напруг мережі живлення шляхом поєднання миттєвих та інтегральних підходів до розрахунку цих струмів, показано доцільність використання усереднених (інтегральних) та фільтрованих значень миттєвих величин, що застосовуються для розрахунку струмів компенсації.

Розроблені способи та алгоритми застосовано при побудові систем керування перетворювачами і компенсаторами на їх основі, що пройшли експериментальну перевірку та впровадження на підприємствах «Кнауф Гіпс Київ», НВП «КЕП», що підтверджено відповідними актами впровадження та застосування.

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати, які виносяться на захист, належать авторові особисто. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать: в [1, 3, 4, 19] – розробка методів керування МП з розширеним діапазоном регулювання вхідної реактивної потужності, запропоновано нові методи керування, виконано математичне моделювання алгоритмів роботи МП, запропоновано спосіб просторово-векторного керування паралельним активним фільтром безвідносно до топології його перетворювача, запропоновано використання силової схеми МП як автономного паралельного активного фільтра, отримання нових методів прямого розрахунку струмів компенсації з мінімізованим числом математичних операцій; в [5, 14-16] – дослідження впливу різних способів керування на показники якості вихідних параметрів перетворювачів (як МП, так і АІН), побудова математичних моделей з метою дослідження пульсацій моменту асинхронних двигунів; в [6, 13] – математичне моделювання запропонованих способів керування МП з використанням методу сингулярного розкладання матриць; в [7-9] – розробка принципів

побудови систем керування МП на основі просторово-векторних підходів з використанням сучасних DSP-мікроконтролерів та програмованих логічних інтегральних схем, схемо-технічне моделювання; в [10-12] – моделювання роботи МП в нижній частині діапазону регулювання, практична реалізація способів компенсації «мертвого часу» при використанні векторних підходів; в [17, 18, 20] математичне моделювання процесів керування МП для електроприводу.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи і результати досліджень доповідались та обговорювались на науково-технічних конференціях, а саме: міжнародних науково-технічних конференціях "Силовая электроника та енергоефективність" (Алушта, 2005, 2007-2011, 2013 рр.); міжнародних науково-технічних конференціях "Проблеми сучасної електротехніки" (Київ, 2004, 2006, 2008, 2012 рр.); міжнародних науково-технічних конференціях "Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика" (2006, 2007, 2011, 2012, 2013 рр.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 21 наукову працю, в тому числі 15 статей у наукових фахових виданнях (з них 3 – у виданнях, які входять до наукометричної бази SCOPUS), 6 тез доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку. Загальний обсяг становить 197 сторінок, у тому числі 162 сторінки основного тексту, 99 рисунків, 8 таблиць, список використаних джерел з 159 найменувань, 1 додаток.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і задачі дисертаційної роботи, описано об'єкт, предмет і методи дослідження. Викладено наукову новизну і практичне значення результатів досліджень, визначено особистий внесок автора, наведено дані про зв'язок роботи з науковими програмами, апробацію результатів роботи, публікації та впровадження.

В **першому розділі** розглянуто та проаналізовано сучасні методи керування матричними перетворювачами, що спрямовані на розширення діапазону регулювання вхідного реактивного струму з забезпеченням максимально можливого значення вихідної напруги. Матричне представлення схем перетворювача та математична інтерпретація його керуючих функцій у вигляді матриць взаємодоповнюються та ідентифікують приналежність до перетворювачів матричного типу (рис. 1). У порівнянні з іншими типами перетворювачів частоти МП забезпечує низку переваг, що особливо відчутно реалізуються при його роботі у складі електроприводів з високодинамічними режимами роботи (часті реверси, частотне гальмування з рекуперацією енергії) та регулюванням вхідного коефіцієнта потужності. Розглянуто критерії систематизації методів керування матричними перетворювачами, такі як: кратність модуляції, поділ методів широтно-імпульсної модуляції на скалярні та векторні, можливість формування близького до одиниці вхідного коефіцієнта потужності та, як окремий клас, таких, що формують регульований вхідний коефіцієнт потужності для активної компенсації небажаних складових

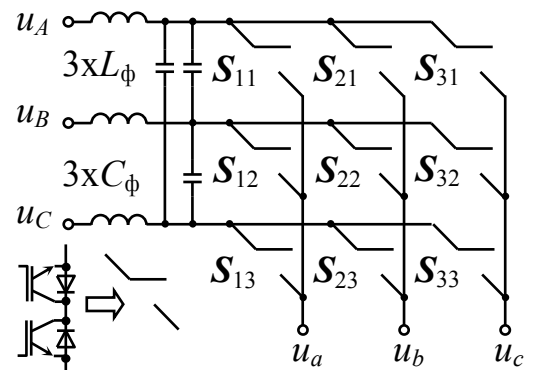


Рис. 1. Матричний перетворювач

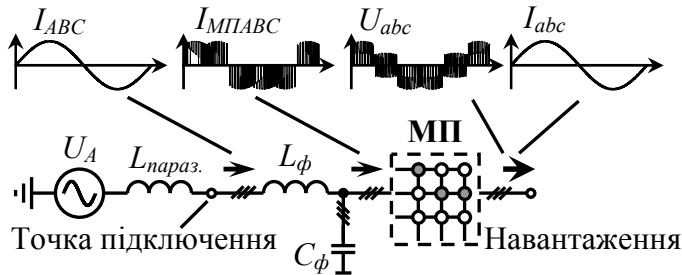


Рис. 2. Енергетичні процеси в системі «мережа-матричний перетворювач-навантаження»

пруг мережі живлення. Показано нові напрямки в дослідженнях і розробках матричних перетворювачів, які отримали нові схемотехнічні рішення, а також алгоритми, спрямовані на спрощення систем керування (рис. 3). Розглянуто варіанти зменшення

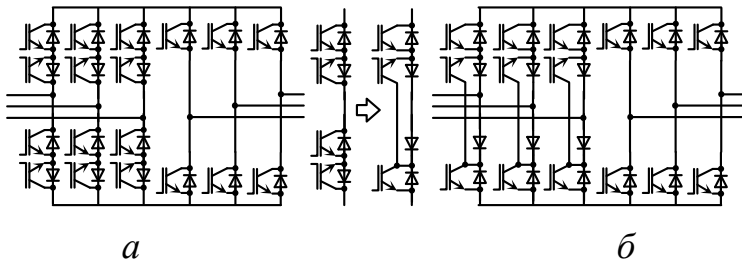


Рис. 3. Двоступеневі МП: а – традиційний МП, б – МП зі зменшеною кількістю транзисторів

метод керування МП, заснований на екстремальному розташуванні керуючих функцій, вимагає значного об'єму математичних операцій. Наявність розширеного діапазону регулювання вхідного реактивного струму матричного перетворювача, що працює в складі електроприводу, може бути використана для задач компенсації складових потужності в конкретній локальній ланці мережі. Показано можливість застосування силової схеми МП в складі активного компенсатора складових потужності. Існуючі методи визначення струмів компенсації активних фільтрів, засновані на використанні сучасних теорій миттєвих потужностей, вимагають послідовного перетворення миттєвих значень електричних параметрів в різні координатні системи, що ускладнює їх практичну реалізацію в реальному часі і спонукає до розробки стратегії безпосереднього визначення струмів компенсації. Методи розрахунку та регулювання компенсаційних струмів активних фільтрів мають вузьке призначення (а саме для систем, побудованих на основі АІН), в зв'язку з чим використання інших силових топологій цими методами не передбачається. Показано необхідність створення методів регулювання на основі просторово-векторних уявлень, що виключають прив'язку до конкретної силової топології активних фільтрів, для узагальнення підходу до керування компенсаторами. Сформульовано основні наукові задачі роботи, які полягають у створенні нових та удосконаленні існуючих методів керування МП та реалізації безпечної комутації струму з використанням комплексних підходів, що враховують силову топологію перетворювачів та вибір методів модуляції.

Другий розділ присвячено дослідженню методів модуляції для визначення загальних закономірностей їх побудови при формуванні вихідної напруги та підвищенні значення вхідної реактивної потужності МП до максимально можливого для заданої робочої точки.

потужності. Блок-схему системи «мережа-МП-навантаження» показано на рис. 2. Збільшення діапазону регулювання вхідного реактивного струму МП є важливою задачею підвищення ефективності функціонування систем з МП завдяки забезпеченню електромагнітної сумісності систем «мережа живлення – матричний перетворювач», зокрема в умовах несиметрії напруг мережі живлення. Прямий

Розглянуто метод керування МП, заснований на концепції сингулярного розкладання матриць (*Singular Value Decomposition - SVD*). При її застосуванні всі величини на вході та виході МП перетворюються з системи координат abc в систему координат $\alpha\beta 0$. *SVD*-перетворення вкладеної матриці утворює матриці, представлені ортонормованими векторами, що обертаються з вхідною та вихідною частотами МП, та матрицю власних векторів. Побудований на цій основі алгоритм керування має неповний діапазон регулювання вхідного реактивного струму. Головний недолік такого способу керування полягає у неможливості його реалізації в умовах несиметрії напруг мережі живлення. Для цих умов запропоновано використання модифікованого перетворення Парка, елементи матриці якого розраховуються із застосуванням миттєвих значень напруг мережі живлення без кутової синхронізації. Матриця відносних тривалостей розраховується наступним чином:

$$M_{abc} = K^T \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & 0 \\ g_{21} & g_{22} & 0 \\ c'_1 & c'_2 & 1 \end{bmatrix} K, \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{out} & -\sin\theta_{out} \\ \sin\theta_{out} & \cos\theta_{out} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_d & 0 \\ 0 & q_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ind} & -v_{inq} \\ v_{inq} & v_{ind} \end{bmatrix}^T, \begin{cases} v_{ind} = v'_A \frac{v'_B}{2} - \frac{v'}{2} \\ v_{inq} = \frac{\sqrt{3}(v'_B - v'_C)}{2} \end{cases}, \begin{cases} v'_{A,B,C} = \frac{v_{A,B,C}}{\Delta} \\ \Delta = \sum v_{A,B,C}^2 \end{cases}, (1)$$

де K - оператор *Clarke*-перетворення, c'_1 , c'_2 - елементи формування нульової послідовності керуючих функцій.

Досліджено способи керування МП з використанням екстремальних положень просторових векторів керуючих функцій, що спрямовані на визначення та реалізацію максимально можливої вхідної реактивної потужності. Для цього використано векторне трактування керуючих функцій МП (рис. 4) та аналітичне представлення їх у вигляді прямої, зворотної і нульової симетричних складових:

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} \begin{cases} s_{kh} \in \{0,1\} \\ s_{1h} + s_{2h} + s_{3h} = 1, \end{cases}, M = \text{Ave}_{T_M}\{S\} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix},$$

$$\bar{m}_h = \frac{2}{3}(\bar{a}^0 m_{1h} + \bar{a}^1 m_{2h} + \bar{a}^2 m_{3h}), \begin{cases} 0 \leq m_{kh} \leq 1, k, h = 1, 2, 3 \\ m_{1h} + m_{2h} + m_{3h} = 1 \end{cases}, (2)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{m}_1 \\ \bar{m}_2 \\ \bar{m}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{m}_d \\ \bar{m}_i \\ \bar{m}_0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \bar{m}_d \\ \bar{m}_i \\ \bar{m}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{m}_1 \\ \bar{m}_2 \\ \bar{m}_3 \end{bmatrix}, \bar{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}. (3)$$

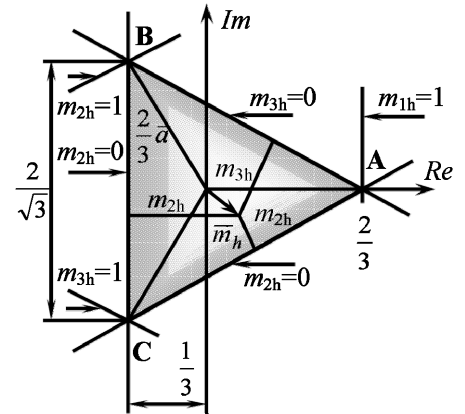


Рис. 4. Векторне представлення керуючих функцій

За допомогою симетричних складових є можливість отримати вирази, що описують зв'язок між усередненими значеннями виключно за допомогою просторових векторів:

$$\begin{cases} \bar{u}_{out} = 3(\bar{m}_d \bar{u}_{in}^* + \bar{m}_i^* \bar{u}_{in})/2, & \bar{m}_d = (q_d + j(b+v))e^{-j\varphi_{out}} e^{j(\alpha_{in} + \alpha_{out})}/3, & \bar{u}_{out} = \hat{u}_{in} q_d e^{j\alpha_{out}}, \\ \bar{i}_{in} = 3(\bar{m}_d \bar{i}_{out}^* + \bar{m}_i \bar{i}_{out})/2, & \bar{m}_i = (q_d + j(b-v))e^{j\varphi_{out}} e^{j(\alpha_{in} - \alpha_{out})}/3, & \bar{i}_{in} = \hat{i}_{out} e^{j\alpha_{in}} (q_d \cos\varphi_{out} - jb). \end{cases} (4)$$

Під екстремальними положеннями для векторів керуючих функцій мається на увазі розташування кінців векторів на границях обмежуючого трикутника (тобто кінці векторів розміщуються на сторонах трикутника та в його кутах). Для отримання параметра v та m_0 розраховуються 24 можливі стани екстремальних положень та перевіряється їх відповідність шляхом розрахунку відносних тривалостей застосування стаціонарних станів. При апаратній реалізації така побудова алгоритму приводить до значних ускладнень, оскільки вимагає великої кількості обчислень для пошуку рішень. Запропоновано спосіб оптимізації розрахунку відносних тривалостей використання

стаціонарних станів, який забезпечив формування гладких керуючих функцій та дозволив отримати високі показники якості електроенергії на вході та виході МП при зменшенні кількості комутацій ключів.

При створенні нових способів керування МП пріоритетними є такі, що вимагають найменшої кількості операцій для їх реалізації та обчислення відносних тривалостей використання стаціонарних станів. Отримано нові аналітичні співвідношення, які встановлюють залежності енергетичних параметрів МП від вибраних коефіцієнтів у явному вигляді з чітким фізичним змістом. Вирази, що визначають симетричні складові для способу *SVD* і запропонованих способів формування реактивної складової вхідного струму по відношенню до повного струму та з незалежним формуванням вхідного реактивного струму МП з активної та реактивної складових вихідного струму, представлені так:

$$\begin{cases} \bar{m}_d = \frac{1}{3}(q_d - q_q)e^{j(\alpha_{in} + \alpha_{out})} \\ \bar{m}_i = \frac{1}{3}(q_d + q_q)e^{j(\alpha_{in} - \alpha_{out})} \end{cases}, \begin{cases} \bar{m}_d = \frac{1}{3}(q_d + jbe^{-j\varphi_{out}})e^{j(\alpha_{in} + \alpha_{out})} \\ \bar{m}_i = \frac{1}{3}(q_d + jbe^{j\varphi_{out}})e^{j(\alpha_{in} - \alpha_{out})} \end{cases}, \begin{cases} \bar{m}_d = \frac{1}{3}(q_d - q_q + jb_q \cos \varphi_{out} e^{-j\varphi_{out}})e^{j(\alpha_{in} + \alpha_{out})} \\ \bar{m}_i = \frac{1}{3}(q_d + q_q + jb_q \cos \varphi_{out} e^{j\varphi_{out}})e^{j(\alpha_{in} - \alpha_{out})} \end{cases}. \quad (5)$$

Розширено межі регулювання вхідного реактивного струму МП для методу *SVD*:

$$\begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{out} & -\sin \alpha_{out} \\ \sin \alpha_{out} & \cos \alpha_{out} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_d & b \cos \varphi_{out} \\ 0 & -b \sin \varphi_{out} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha_{in} & -\sin \alpha_{in} \\ \sin \alpha_{in} & \cos \alpha_{in} \end{bmatrix}^T. \quad (6)$$

Виконано аналітичні дослідження, які показали як ідентичність, так і розбіжності різних підходів до керування вхідним реактивним струмом МП. Математичні співвідношення для методу керування, що використовує екстремальне розташування векторів керуючих функцій, отримано у матричній формі, яка застосовується в *SVD*:

$$\begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{out} & -\sin \alpha_{out} \\ \sin \alpha_{out} & \cos \alpha_{out} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_d & (v \sin \varphi_{out} + b \cos \varphi_{out}) \\ 0 & (v \cos \varphi_{out} - b \sin \varphi_{out}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha_{in} & -\sin \alpha_{in} \\ \sin \alpha_{in} & \cos \alpha_{in} \end{bmatrix}^T. \quad (7)$$

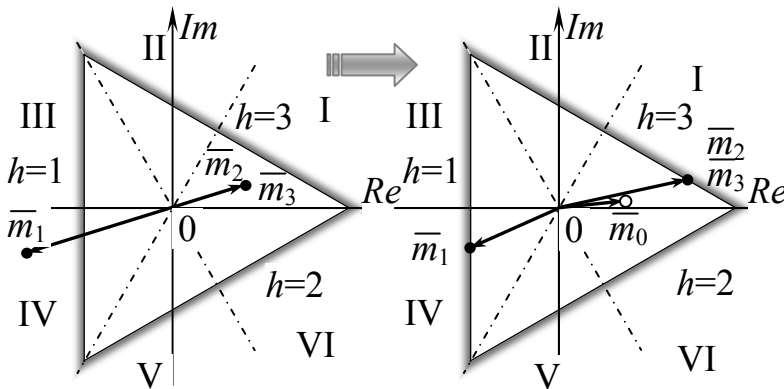


Рис. 5. Формування нульової послідовності керуючих функцій

терій примусового розташування крайніх точок триножника (рис. 5) на сторонах обмежуючого трикутника. Запропоновано підходи до розрахунку вектора нульової послідовності керуючих функцій, які дозволяють реалізувати максимально можливий діапазон регулювання вихідної напруги та вхідного реактивного струму. На першому етапі розраховуються відносні тривалості керування ключами МП з використанням ненульових складових керуючих функцій за виразами (5) – (7). З отриманих відносних тривалостей m_{hk} , які відповідають перпендикулярам до сторін обмежуючого трикутника (рис. 5), розраховується вектор лінійного переміщення триножника па-

Представлені методи керування МП були неповними без визначення нульової послідовності керуючих функцій. Нульова послідовність керуючих функцій не впливає на усереднені значення вихідних параметрів перетворювача, але відтворюється у вигляді підмодуляції вихідної напруги МП. З точки зору реалізації отриманих усереднених тривалостей використання ключів МП доречним є кри-

паралельно до відповідної сторони трикутника у напрямку, при переміщенні за яким елемент матриці m_{h1} , m_{h2} чи m_{h3} з мінімальним значенням набуде нульового значення, тобто стане на границю обмежуючого трикутника. Реалізація матриці відносних тривалостей використання ключів МП із заданими параметрами (стосовно реактивної складової вхідного струму) здійснюється шляхом примусового розташування елементів отриманої матриці в допустимих межах завдяки функції підмодуляції. Формування цієї функції здійснюється циклічно у відповідності до поточних секторів напруги мережі живлення та співвідношень, представлених таким чином:

$$M = M_{abc} + \begin{bmatrix} \Delta m_1 & \Delta m_2 & \Delta m_3 \\ \Delta m_1 & \Delta m_2 & \Delta m_3 \\ \Delta m_1 & \Delta m_2 & \Delta m_3 \end{bmatrix}, \begin{cases} \text{Sector I, IV} \\ \Delta m_1 = -m_{h1\min} \\ \Delta m_2 = m_{h1\min} + m_{h3\min} \\ \Delta m_3 = -m_{h3\min} \end{cases}, \begin{cases} \text{Sector II, V} \\ \Delta m_1 = m_{h2\min} + m_{h3\min} \\ \Delta m_2 = -m_{h2\min} \\ \Delta m_3 = -m_{h3\min} \end{cases}, \begin{cases} \text{Sector III, VI} \\ \Delta m_1 = -m_{h1\min} \\ \Delta m_2 = -m_{h2\min} \\ \Delta m_3 = m_{h1\min} + m_{h2\min} \end{cases}, \quad (8)$$

де Δm_1 , Δm_2 , Δm_3 - мінімальні (в алгебраїчному сенсі) значення елементів m_{hk} стовбців матриці M_{abc} . В ситуаціях, при яких отримуються нереалізовані відносні тривалості, запропоновано формування додаткового модулюючого впливу (рис. 6) для переміщення керуючих функцій в допустиму область (в середину обмежуючого трикутника):

$$\begin{cases} l_1 = \min T \text{ при } \{0 < m_{1k} \leq \min T\}, \text{ інакше } l_1 = 0, \\ l_2 = \min T \text{ при } \{0 < m_{2k} \leq \min T\}, \text{ інакше } l_2 = 0, \\ l_3 = \min T \text{ при } \{0 < m_{3k} \leq \min T\}, \text{ інакше } l_3 = 0, \end{cases} \quad (9)$$

де l_1 , l_2 , l_3 - значення величин переміщень у відповідних стовпчиках матриці відносних тривалостей.

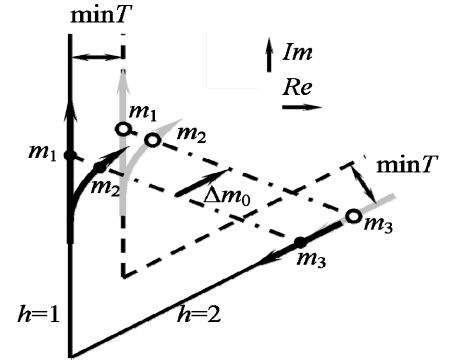


Рис. 6. Компенсація відносних тривалостей станів ключів, які неможливо реалізувати

$$M = M_{abc} + \begin{bmatrix} \Delta m_1 & \Delta m_2 & \Delta m_3 \\ \Delta m_1 & \Delta m_2 & \Delta m_3 \\ \Delta m_1 & \Delta m_2 & \Delta m_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta l m_1 & \Delta l m_2 & \Delta l m_3 \\ \Delta l m_1 & \Delta l m_2 & \Delta l m_3 \\ \Delta l m_1 & \Delta l m_2 & \Delta l m_3 \end{bmatrix}, \begin{cases} \text{Sector I, IV} \\ \Delta l m_1 = -l_1 \\ \Delta l m_2 = l_1 + l_3 \\ \Delta l m_3 = -l_3 \end{cases}, \begin{cases} \text{Sector II, V} \\ \Delta l m_1 = l_2 + l_3 \\ \Delta l m_2 = -l_2 \\ \Delta l m_3 = -l_3 \end{cases}, \begin{cases} \text{Sector III, VI} \\ \Delta l m_1 = -l_1 \\ \Delta l m_2 = -l_2 \\ \Delta l m_3 = l_1 + l_2 \end{cases}. \quad (10)$$

З використанням отриманих співвідношень було побудовано алгоритм, який шляхом почергового наближення розраховує максимально можливий діапазон передачі реактивної потужності для всіх можливих робочих точок МП. За допомогою алгоритму в декартових координатах було побудовано об'ємні поверхні (рис. 7), що задані

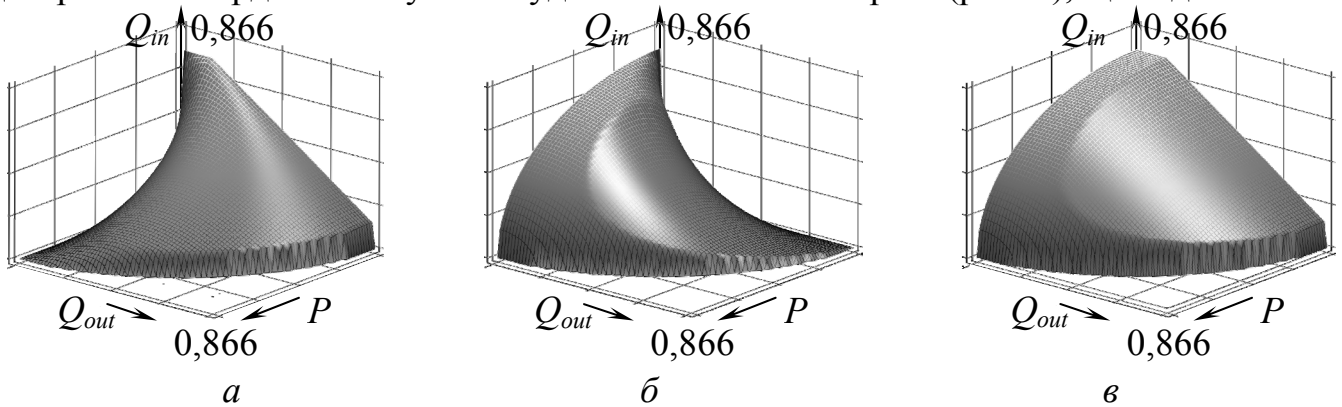


Рис. 7. Діапазони регулювання вхідного реактивного струму МП при застосуванні різних методів формування модулюючого впливу

складовими потужностей у відносних одиницях:

$$\tilde{S} = \frac{3}{2} \hat{u}_{in} \hat{i}_{out}, \tilde{P} = \frac{p}{\tilde{S}} = \frac{\hat{u}_{out} \hat{i}_{out} \cos \varphi_{out}}{\hat{u}_{in} \hat{i}_{out}} = q_d \cos \varphi_{out}, \tilde{Q}_{out} = \frac{q_{out}}{\tilde{S}} = q_d \sin \varphi_{out}, \tilde{Q}_{in} = \frac{q_{in}}{\tilde{S}} = q_d \tan \varphi_{in} \cos \varphi_{out}. \quad (11)$$

Отримані об'ємні поверхні відображають діапазон регулювання відносних значень вхідної реактивної потужності при застосуванні розглянутих в розділі методів формування модулюючого впливу при керуванні МП (рис. 7 а, б, в).

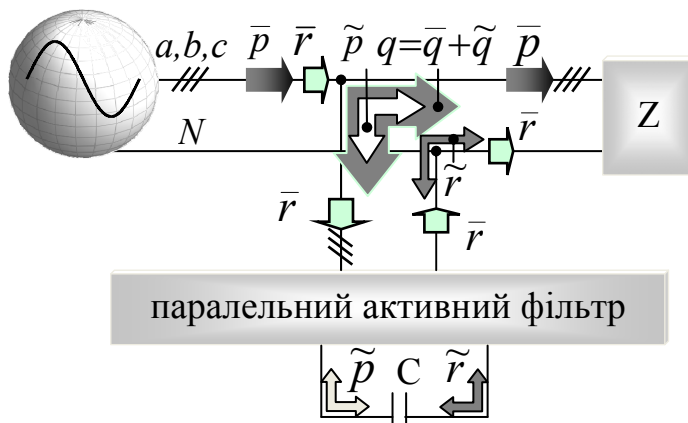


Рис. 8. Циркуляція складових миттєвої потужності в системі «мережа живлення – навантаження з паралельним активним фільтром»

У третьому розділі досліджено системи паралельних активних фільтрів (рис. 8) та способи керування ними із застосуванням просторово-векторних підходів. Результати роботи дозволили використовувати нетипові структури силових схем та поліпшити якісні показники існуючих систем. Для оцінки електромагнітних процесів з енергетичної точки зору використано розширену теорію миттєвих потужностей $p-q-r$. В даній теорії складові потужності визначено таким чином: p – миттєва активна потужність, q – миттєва реактивна потужність, r – миттєва потужність, що замикається через нульовий про-

від. Складові потужності поділено на постійні та змінні. Поява небажаних складових миттєвих потужностей обумовлена властивостями мережі та навантаження (табл. 1). Різновиди мережі розбито за трьома ознаками: симетрична синусоїдальна, несиметрична синусоїдальна, несинусоїдальна. Навантаження поділено на: симетричне та несиметричне; з нульовим проводом та без нього. Іншим критерієм для класифікації навантажень є імпедансна характеристика: чисто активна, активно-реактивна, нелінійна.

Таблиця 1

Умови виникнення небажаних складових потужності

Складові потужності			$\bar{p}$			$\bar{q}$			$\bar{r}$			$\tilde{p}$			$\tilde{q}$			$\tilde{r}$			Складові, що мінізуються
мережа			○	○	◇	○	○	◇	○	○	◇	○	○	◇	○	○	◇	○	○	◇	
навантаження																					
3-х провідна система	симетричне	R																			$\tilde{p}, \tilde{q}$
		RLC																			$\bar{q}, \tilde{p}, \tilde{q}$
		$S+RLC$																			$\bar{q}, \tilde{p}, \tilde{q}$
	несиметричне	R																			$\tilde{p}, \tilde{q}$
		RLC																			$\bar{q}, \tilde{p}, \tilde{q}$
		$S+RLC$																			$\bar{q}, \tilde{p}, \tilde{q}$
4-х провідна система	симетричне	R																			$\tilde{p}, \tilde{q}, \tilde{r}$
		RLC																			$\bar{q}, \tilde{p}, \tilde{q}, \tilde{r}$
		$S+RLC$																			$\bar{q}, \tilde{p}, \tilde{q}, \tilde{r}$
	несиметричне	R																			$\bar{q}, \tilde{p}, \tilde{q}, \tilde{r}$
		RLC																			$\bar{q}, \tilde{p}, \tilde{q}, \tilde{r}$
		$S+RLC$																			$\bar{q}, \bar{r}, \tilde{p}, \tilde{q}, \tilde{r}$

Типи навантаження позначено: «R», «RLC» та «S+RLC» (нелінійне). Символами «○» «○» та «✧» позначено характеристики мережі: «○» – симетрична синусоїдальна, «○» – несиметрична синусоїдальна, «✧» – несиметрична несинусоїдальна. Зафарбовані клітинки відповідають наявності згаданих складових потужностей за даних умов.

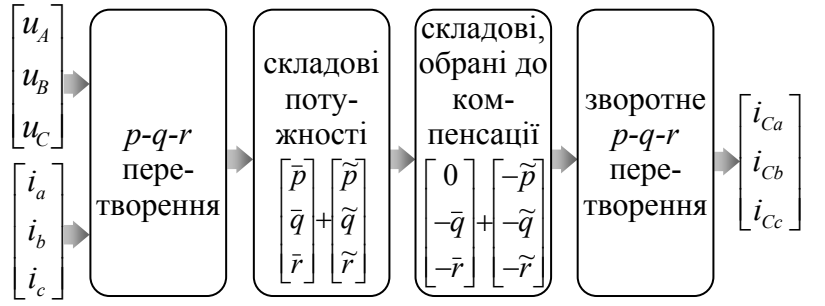


Рис. 9. Послідовність математичних перетворень при розрахунку струмів компенсації

Перетворення миттєвих значень напруг та струмів в системах $p-q-r$ координат і в зворотному напрямку з коригуванням складових потужностей в практичному застосуванні вимагають складних обчислень в реальному часі на кожному модуляційному періоді (рис. 9). Для практичного застосування актуальними є такі вирази, за якими після отримання миттєвих значень енергетичних параметрів вимірюваної системи розраховуються миттєві значення струмів компенсатора без надлишкових просторових перетворень координат. Також варто зазначити, що при розрахунку струмів компенсатора використовуються тільки складові миттєвої потужності, оперування якими забезпечує топологія його силової схеми.

За результатами аналізу даних таблиці отримано співвідношення, що відповідають варіантам реалізації компенсаторів та враховують їх можливості. Для трифазного трипровідного навантаження складові потужності $\bar{q}$ та $\tilde{q}$ є основними, що підлягають компенсації. За рахунок використання миттєвих значень виключно лінійних напруг мережі живлення повний цикл математичних перетворень при розрахунку струмів компенсатора спрощено таким чином:

$$\text{при } \hat{p} = \begin{bmatrix} 0 \\ -q \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i_{Ca} \\ i_{Cb} \\ i_{Cc} \end{bmatrix} = \frac{-1}{\Delta} \begin{bmatrix} u_{bc}^2 & u_{ca}u_{bc} & u_{ab}u_{bc} \\ u_{bc}u_{ca} & u_{ca}^2 & u_{ab}u_{ca} \\ u_{bc}u_{ab} & u_{ca}u_{ab} & u_{ab}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \quad \Delta = u_{ab}^2 + u_{bc}^2 + u_{ca}^2, \quad \begin{matrix} u_{ab} = u_A - u_B \\ u_{bc} = u_B - u_C \\ u_{ca} = u_C - u_A \end{matrix} \quad (12)$$

$$\text{при } \hat{p} = \begin{bmatrix} \Delta p - \tilde{p} \\ -q \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i_{Ca} \\ i_{Cb} \\ i_{Cc} \end{bmatrix} = \frac{-1}{\Delta} \begin{bmatrix} u_{bc}^2 & u_{ca}u_{bc} & u_{ab}u_{bc} \\ u_{bc}u_{ca} & u_{ca}^2 & u_{ab}u_{ca} \\ u_{bc}u_{ab} & u_{ca}u_{ab} & u_{ab}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{3(\Delta p - \tilde{p})}{(u_{ab} - u_{bc})^2 + (u_{bc} - u_{ca})^2 + (u_{ca} - u_{ab})^2} \begin{bmatrix} u_{ab} - u_{ca} \\ u_{bc} - u_{ab} \\ u_{ca} - u_{bc} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\text{при } \hat{p} = \begin{bmatrix} 0 \\ -q \\ -r \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i_{Ca} \\ i_{Cb} \\ i_{Cc} \end{bmatrix} = \frac{p}{u_A^2 + u_B^2 + u_C^2} \cdot \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\text{при } \hat{p} = \begin{bmatrix} \Delta p - \tilde{p} \\ -\bar{q} - \tilde{q} \\ -\bar{r} - \tilde{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{cp} - p + \Delta p \\ -q \\ -r \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i_{Ca} \\ i_{Cb} \\ i_{Cc} \end{bmatrix} = \frac{P_{cp} + \Delta p}{u_A^2 + u_B^2 + u_C^2} \cdot \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \quad (15)$$

де $P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$ - середнє значення потужності за період напруги мережі, $\tilde{p} = P_{cp} - p$ -

змінна складова активної потужності, $p = u_A \cdot i_a + u_B \cdot i_b + u_C \cdot i_c$, Δp - додаткова складова активної потужності, що використовується компенсатором для власних потреб та здійснення енергообміну мережі живлення і навантаження з буферним чи додатко-

вим джерелом електроенергії. Активна складова потужності, яку споживає компенсатор, є невід'ємною умовою функціонування активного фільтра із забезпеченням сталості напруги буферного джерела (буферної ємності). Зміна напруг буферної ємності

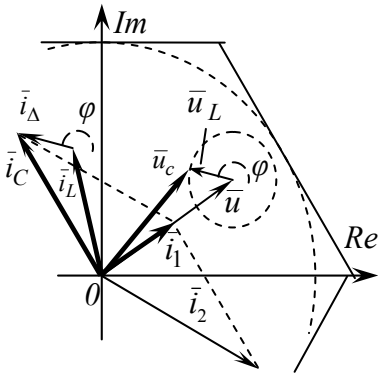


Рис. 10. Векторна діаграма запропонованого методу регулювання струмів компенсації

свідчить про споживання чи накопичення енергії в ній, саме тому для регулювання напруги буферного джерела використовується активна складова потужності.

Компенсація складових потужності в точках підключення споживачів електроенергії із застосуванням активних фільтрів здійснюється за поширеною практикою на базі АІН. Вирішення цієї задачі базується на обчисленні необхідних реактивних струмів компенсації та відпрацюванні їх з використанням релейного режиму роботи ключів в заданому коридорі струму. Використання МП для реалізації автономних систем компенсації складових миттєвої потужності до цього часу не досліджувалось, а алгоритми роботи систем на його основі не перевірялися. В роботі запропоновано регулювання струму компенсації на базі просторо-

во-векторних підходів із застосуванням просторових векторів струмів та напруг перетворювачів (рис. 10) безвідносно до топології їх силових схем. Розподіл струмів в системі «мережа живлення – навантаження» з під'єднаним паралельним компенсатором здійснюється відповідно до першого закону Кірхгофа: $\mathbf{I}_C = \mathbf{I}_1 - \mathbf{I}_2$, де $\mathbf{I}_C$ - матриця-вектор заданих струмів компенсатора, $\mathbf{I}_1$ - матриця-вектор розрахованих струмів мережі, $\mathbf{I}_2$ - матриця-вектор виміряних струмів навантаження. Використовуючи інформацію про розташування векторів заданого та реального струмів компенсатора, система керування обчислює вектор похибки $\bar{i}_\Delta = \bar{i}_C - \bar{i}_L$, кутове положення якого задає напрямок вектора керування $\bar{u}_L$, тобто вектора напруги на реакторі (рис. 10) і, тим самим, напруги компенсатора $\bar{u}_C = \bar{u} + \bar{u}_L$. Вектор вихідної напруги перетворювача формується таким чином, щоб на кожному циклі ШІМ напрямок вектора $\bar{u}_L$ співпадав з напрямком вектора похибки $\bar{i}_\Delta$. Таке розташування обумовлене тим, що вектор похибки визначає невідповідність виміряних струмів компенсатора струмам завдання. Розкладання вектора похибки по осях a, b, c визначає відхилення (з різними знаками) струмів у фазах компенсатора:

$$\begin{bmatrix} i_{Ca} \\ i_{Cb} \\ i_{Cc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{\Delta a} \\ i_{\Delta b} \\ i_{\Delta c} \end{bmatrix}, \quad \bar{u}_L = \begin{bmatrix} u_{La} \\ u_{Lb} \\ u_{Lc} \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \approx \frac{L}{T} \begin{bmatrix} i_{\Delta a} \\ i_{\Delta b} \\ i_{\Delta c} \end{bmatrix} = v \begin{bmatrix} i_{\Delta a} \\ i_{\Delta b} \\ i_{\Delta c} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

де $v = L/T$, T – інтервал часу між вимірюваннями, або тактовий період ШІМ.

Координати вектора $\bar{u}_L$ визначаються пропорційним способом за наступними виразами: $u_{L\alpha} = k \bar{i}_{\Delta\alpha} / |\bar{i}_\Delta|$, $u_{L\beta} = k \bar{i}_{\Delta\beta} / |\bar{i}_\Delta|$, де $\bar{i}_{\Delta\alpha} = \text{Re}(\bar{i}_\Delta)$, $\bar{i}_{\Delta\beta} = \text{Im}(\bar{i}_\Delta)$, $u_{L\alpha}$ та $u_{L\beta}$ - координати вектора $\bar{u}_L$ в $\alpha\beta$ координатах, k – значення модуля вектора $\bar{u}_L$, тобто радіус кола, утвореного кінцем вектора $\bar{u}_L$ (рис. 10).

Виконано математичне моделювання, яке показало справедливості припущень щодо визначення напрямку розташування вектора $\bar{u}_L$. При відхиленні вектора керування $\bar{u}_L$ від оптимального розташування відбувається перерегулювання струму компенсатора (рис. 11). Затемнені кола відповідають пересуванню кінців вектора струму

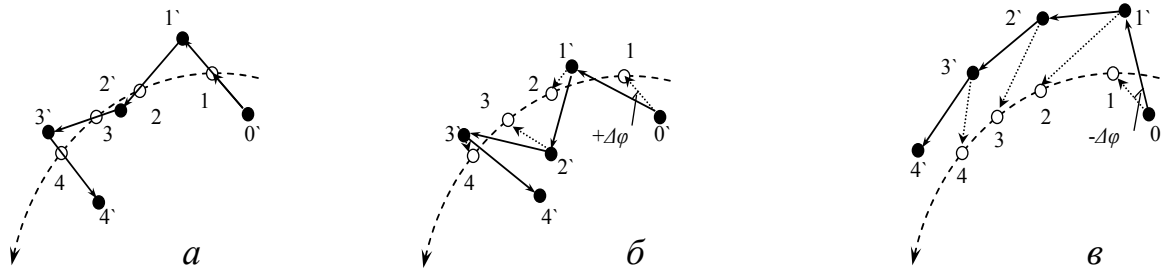


Рис. 11. Траєкторії переміщення векторів завдання, похибки та керування

компенсатора. Пунктиром позначено вектори похибки, суцільними лініями позначено напрямки векторів $\vec{u}_L$, які пропорційні елементарному переміщенню вектора струму компенсатора за цикл ШІМ. На рис. 11, а напрямки векторів керування та відхилення співпадають, а на рис. 11, б, в напрямки цих векторів відрізняються на деякі кути $+\Delta\varphi$ та $-\Delta\varphi$.

Для узгодженої роботи системи компенсації похідна струму компенсатора повинна бути більшою від похідної струмів навантаження на будь-якому часовому інтервалі: $\Delta i_C = u_L \cdot T/L > \Delta i_i$, де Δi_C - елементарний приріст струму компенсатора за цикл ШІМ, який визначений тривалістю T , u_L - напруга, прикладена до обмоток реактора, L - індуктивність реактора, Δi_i - приріст струмів навантаження за цикл ШІМ. На рис. 12 представлено графічну інтерпретацію наведеної нерівності, яка задає умови функціонування компенсатора.

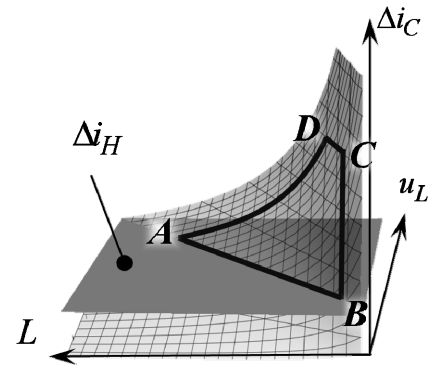


Рис. 12. Умови функціонування компенсатора

На рисунку показано перетини площин, які відповідають обмеженням, що накладаються на поверхню. В межах площин, паралельних осям $\{u_L, L\}$, введено обмеження: переріз AB за наведеною нерівністю та максимальне значення Δi_C , обмежене перерізом CD . В площині, паралельній осям $\{\Delta i_C, u_L\}$, вводиться обмеження на мінімальну індуктивність, яке показано перерізом BC . В площині, паралельній осям $\{\Delta i_C, L\}$, пролягає обмеження за максимальною напругою (переріз DA). Запропоновано топологію паралельного активного фільтра, яка полягає в застосуванні як перетворювача компенсатора автономної системи «МП-трифазний ємнісний накопичувач» та дозволяє забез-

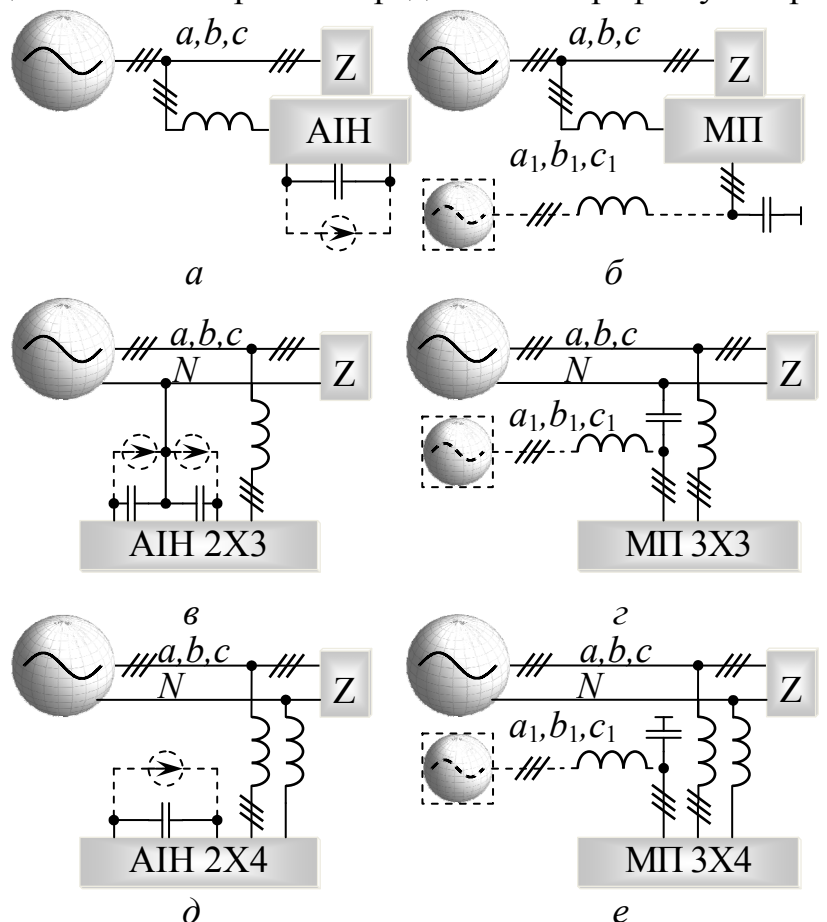


Рис. 13. Топології паралельних активних фільтрів

печити при побудові системи реалізацію принципу “All Silicon Solution”. На рис. 13, а, б показано структурні схеми компенсаторів для компенсації струмів трипровідних трифазних систем, на рис. 13, в-е – схеми для компенсації струмів чотирипровідних трифазних систем. Показано топологічну тотожність принципів паралельної компенсації при застосуванні систем з АІН та МП.

У четвертому розділі дисертації досліджено методи керування матричними перетворювачами з різними підходами до регулювання та завдання їх вихідних параметрів. Здійснено апробацію та перевірку результатів теоретичних досліджень методів керування перетворювачами частоти та напруги, верифікацію алгоритмів керування, експериментальне та математичне моделювання для отримання та порівняння показників, які характеризують енергетичні процеси за кількісними та якісними критеріями.

Розроблено ключову модель МП, яка дозволила здійснювати послідовний розрахунок вихідних параметрів: вихідної напруги, представлені ШІМ-послідовністю; вихідного струму для заданого навантаження з використанням спектральних методів; вхідного струму перетворювача із застосуванням швидкого перетворення Фур’є з відповідним масштабуванням спектру цього струму за порядком гармонічних складових. Для розрахунку вихідного струму МП масштабування спектру вихідної напруги

здійснювалось таким чином: $S_{i_i} = k_i S_{u_i}$, $S_{i_i} = \frac{S_{u_i}}{\sqrt{\cos^2 \varphi + i^2 \sin^2 \varphi}} e^{-j \arctg \left(\frac{i \sin \varphi}{\cos \varphi} \right)}$, де S_{u_i} , S_{i_i} -

спектри напруги та струму, i – номер гармоніки, φ - кут зсуву струму навантаження відносно напруги на номінальній частоті 50 Гц. Масштабування спектру вхідного струму за номерами гармонік здійснювалось таким чином: $S_{i_i} = k_i S_{i_s}$,

$k_i = e^{-j\gamma_i} / \sqrt{1 - (i/k_s)^2 + (i/k_s)^4}$, де $\gamma_i = \arctg \frac{k_s^2}{2(i^2 - k_s^2)} - \pi$ при $i \geq k_s$ або $\gamma_i = 2 \arctg \frac{k_s^2}{i^2 - k_s^2} + \frac{\pi}{2}$

при $i < k_s$; k_s - частота зрізу.

Порядок дій при моделюванні процесів МП наведено на рис. 14. На поточному циклі ШІМ реалізуються стаціонарні стани, які розраховані на попередньому циклі, а паралельно з цим вимірюються поточні значення вхідної напруги та вихідного струму і розраховуються стаціонарні стани, які будуть реалізовані на наступному циклі модуляції. Здійснено порівняння показників якості вихідних параметрів МП при застосуванні різних варіантів методу екстремального розташування керуючих функцій, яке показало, що підвищення ступеня гладкості модулюючих функцій керування

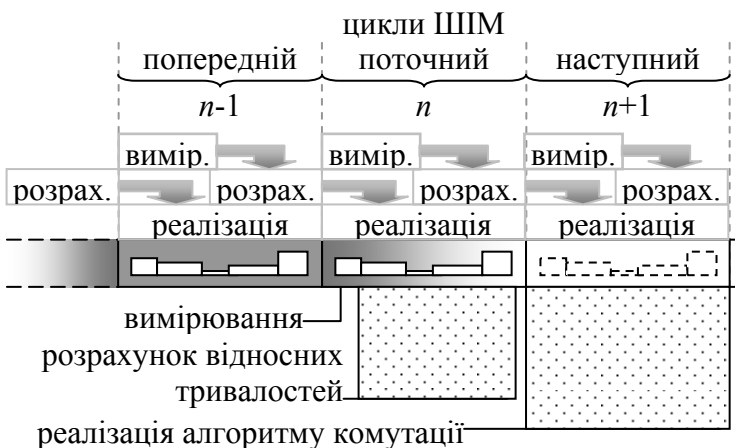


Рис. 14. Реалізація алгоритму керування МП

ключами перетворювача забезпечує відповідне підвищення показників якості електроенергії (вихідних напруги і струму та вхідного струму МП). Досліджено пульсації моменту асинхронного двигуна (АД) з короткозамкненим ротором при керуванні від матричного перетворювача з розширеним діапазоном регулювання вхідної реактивної потужності.

Виконано експериментальні дослідження імітаційної фізичної моделі компенсатора, зібраного на базі МП

(рис. 15). Для керування матричним перетворювачем та загального моніторингу системи використано станцію прототипного тестування dSPACE, яка забезпечує оперативну зміну режимів роботи в реальному часі. Вимірювання енергетичних параметрів компенсатора також здійснювалось за допомогою станції dSPACE. Виміряні миттєві значення напруг та струмів компенсатора використовувались безпосередньо в процесі регулювання параметрів роботи, а також для візуалізації енергетичних процесів в системі. Використання МП із застосуванням просторово-векторних підходів забезпечило формування струмів компенсації з достатньою точністю та стабільністю їх відпрацювання.

Наведено результати експериментальних досліджень активного фільтра на базі АІН, що проводились на підприємстві ТОВ «Кнауф Гіпс Київ». В якості нелінійного навантаження використано перетворювач частоти потужністю 110 кВА, виконаний за топологією "некерований випрямляч – ланка постійного струму з ємнісним накопичувачем – автономний інвертор напруги", при його роботі в складі електропривода млина гіпсу.

В умовах нелінійного споживання струму некерованим випрямлячем з ємнісним накопичувачем струми мережі містять широкий спектр гармонічних складових, що в реальних умовах спричиняє спотворення напруг мережі у точках підключення споживачів. На рис. 16 показано часові діаграми лінійної і фазної напруг мережі, а також споживаного з мережі струму: рис. 16, а – для режиму роботи без компенсації; рис. 16, б – для режиму роботи з активним компенсатором. При застосуванні компенсатора в даних умовах струми нелінійного навантаження компенсуються таким чином, що результуючі струми мережі набувають близької до синусоїдальної форми і спектр їх гармонічних спотворень зміщується до значень частоти ШІМ. Завдяки цьому в точці підключення нелінійного навантаження компенсується його вплив на напругу мережі живлення, що підтверджується результатами моніторингу

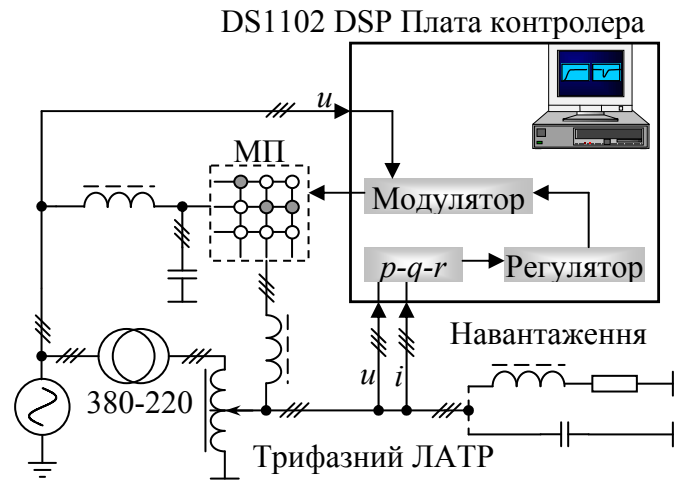


Рис. 15. Імітаційна фізична модель компенсатора

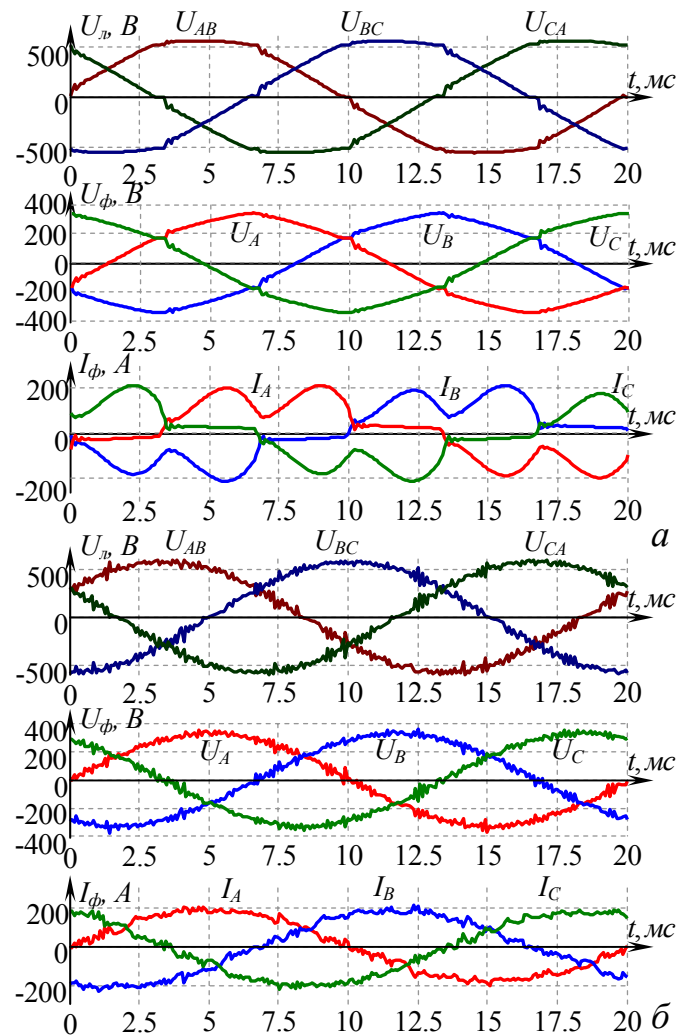


Рис. 16. Часові діаграми лінійних і фазних напруг мережі, а також споживаного з мережі струму

кривих миттєвих значень напруг та струмів. На рис. 16, б відображено незначні спотворення напруг та струму на частоті модуляції силових ключів компенсатора. Для зазначених умов проведено вимірювання струму навантаження та мережі з метою дослідження спектрального складу цих струмів. Наведена серія експериментальних досліджень активного компенсатора виконувалась із застосуванням станції прототипного тестування dSPACE, при цьому робота системи керування базувалась на прямих методах розрахунку струмів компенсації та просторово-векторних принципах їх регулювання. Запропоновані підходи дозволили забезпечити споживання з мережі струму, близького за формою до синусоїдального з коефіцієнтом нелінійних спотворень не більшим 8% (рис. 16, б).

У **додатках** представлено документи, що підтверджують практичне використання результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальну наукову задачу створення нових та удосконалення існуючих методів керування, які забезпечують розширення діапазону регулювання вхідного реактивного струму матричних перетворювачів, спрямоване на підвищення ефективності активної компенсації небажаних складових потужності.

Основні наукові та практичні результати полягають у наступному:

1. На основі виконаного аналізу стану досліджень методів керування матричними перетворювачами обґрунтовано доцільність створення нових та удосконалення існуючих методів розширення діапазону регулювання вхідного реактивного струму з метою підвищення ефективності компенсації складових потужності при застосуванні МП як пристроїв перетворення параметрів електроенергії і як активних компенсаторів небажаних складових потужності.

2. Показано можливості передачі реактивної енергії з виходу на вхід як в традиційних, так і в двоступеневих МП за рахунок варіацій наборів стаціонарних станів ключів при формуванні просторових векторів вхідного струму та вихідної напруги.

3. Встановлено, що використання модифікованого перетворення Парка, яке враховує ступінь несиметрії мережі живлення для визначення відносних тривалостей використання стаціонарних станів ключів МП при керуванні із застосуванням концепції сингулярного розкладання матриць, забезпечує формування вхідного реактивного струму, адаптивне до умов несиметрії напруг мережі.

4. Визначені залежності показників якості вихідної напруги, вхідного струму та величини пульсацій електромагнітного моменту двигунів, які живляться від МП, показали, що підвищення ступеня гладкості модулюючих функцій керування ключами перетворювача забезпечує відповідне підвищення показників якості електроенергії та зменшення пульсацій моменту. При застосуванні методу з екстремальним розташуванням керуючих функцій перехід від довільного вибору екстремальних положень до систематизованого вибору з мінімальним відхиленням дозволив знизити значення нормованого зваженого коефіцієнта сумарних гармонічних спотворень $WTHD_0$ вихідної напруги перетворювача майже в чотири рази (від $\approx 0,39\%$ до $\approx 0,11\%$), а вхідного струму – в два рази (від $\approx 0,55\%$ до $\approx 0,28\%$). Середньоквадратичне відхилення значень пульсацій електромагнітного моменту двигуна, що живиться від МП, при такому переході також зменшується приблизно в два рази (від $\approx 0,88$ Нм до $\approx 0,45$ Нм).

5. Встановлено, що метод пропорційно-векторного керування силовим перетво-

рювачем паралельного активного фільтра при реалізації його з застосуванням довільних топологій силових схем фільтрів дозволяє регулювати довжину елементарних переміщень кінця вектора струму на циклах модуляції, що забезпечує регулювання динамічних показників компенсації та задану якість споживаного з мережі струму.

6. Для трансферних рівнянь, що встановлюють залежності між вхідними та вихідними параметрами перетворювача, отримано узагальнюючі розв'язки, які показали тотожність методів керування МП, спрямованих на розширення діапазону регулювання вхідного реактивного струму, при оперуванні ступенями свободи прямої та зворотної послідовностей керуючих функцій, та визначили розбіжності цих методів при формуванні нульової послідовності керуючих функцій.

7. Визначено, що одночасне використання миттєвих та інтегральних способів розрахунку струмів компенсатора дозволяє усунути всі небажані складові потужності та забезпечити компенсацію з оптимальним поєднанням значень пульсацій складових потужності і показників несинусоїдальності струмів мережі в умовах несиметрії та несинусоїдальності напруг мережі живлення.

8. Виконано порівняльне оцінювання методів керування МП, спрямованих на розширення діапазону регулювання вхідної реактивної потужності, шляхом визначення об'ємів обмежуючих поверхонь, заданих максимальними значеннями цієї реактивної потужності для всіх можливих сполучень відносних значень активної та реактивної складових вихідної потужності. Визначено, що максимальний об'єм (у відносних одиницях) забезпечує метод, що використовує повний вихідний струм при формуванні вхідного реактивного струму, $-0,261$ (відн. од.)³, метод, що використовує тільки реактивну складову, дозволяє отримати об'єм $0,155$ (відн. од.)³, а метод, який використовує активну складову, $-$ об'єм $0,175$ (відн. од.)³.

9. Достовірність та обґрунтованість теоретичних положень, висновків і рекомендацій підтверджено результатами моделювання і експериментальними дослідженнями. Отримані результати знайшли практичне застосування при побудові систем керування перетворювачами і компенсаторами на їх основі, що пройшли експериментальну перевірку та випробування на підприємствах «Кнауф Гіпс Київ», НВП «КЕП», що підтверджено відповідними актами впровадження та застосування.

Результати роботи запропоновано для подальшого впровадження на підприємствах електротехнічного профілю Міністерства промислової політики України.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Чопик В.В. Просторово-векторне керування паралельними активними фільтрами / В.В. Чопик, В.М. Михальський, С.Й. Поліщук, В.М. Соболев, І.А. Шаповал // Технічна електродинаміка. – 2013. – №4. – С. 34–41.

2. Чопик В.В. Розширення діапазону регулювання вхідної реактивної потужності матричного перетворювача при застосуванні в складі паралельного активного фільтра / В.В. Чопик // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. Спец. вып. – 2013. – Т.1. – №8(114). – С.141–145.

3. Михальський В.М. Керування матричним перетворювачем з використанням екстремальних положень просторових векторів керуючих функцій / В.М. Михальський, В.М. Соболев, В.В. Чопик, І.А. Шаповал // Технічна електродинаміка. – 2012. –

№6. – С.27–37.

4. Михальський В.М. Розширення діапазону регулювання вхідної реактивної потужності матричних перетворювачів засобами керування / В.М. Михальський, В.М. Соболев, І.А. Шаповал, В.В. Чопик // Технічна електродинаміка. – 2012. – №2. – С.53–54.

5. Михальський В.М. Алгоритми керування матричними перетворювачами з розширеним діапазоном регулювання вхідної реактивної потужності та їх вплив на пульсації електромагнітного моменту асинхронних двигунів / В.М. Михальський, В.М. Соболев, В.В.Чопик, І.А. Шаповал // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Темат. вип. "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика". – 2012. – № 03/2012(19) – С. 421–424.

6. Михальський В.М. Управление матричными преобразователями с использованием метода сингулярного разложения при несимметрии напряжений питающей сети / В.М. Михальский, В.Н. Соболев, В.В. Чопик, И.А. Шаповал // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2011. – Ч.2. – С. 113–120.

7. Мисак Т.В. Застосування програмованих логічних інтегральних схем в системах керування матричними перетворювачами / Т.В. Мисак, В.М. Михальський, В.М. Соболев, Е.М. Чехет, В.В. Чопик, І.А. Шаповал // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2005. – Ч.1. – С. 61–64.

8. Михальський В.М. Реалізація алгоритму керування матричним перетворювачем за допомогою DSP-мікроконтролера / В.М. Михальський, В.М. Соболев, Е.М. Чехет, І.А. Шаповал, В.В. Чопик // Міжвідомчий науково-технічний збірник "Електромашинобудування і електрообладнання". Темат. вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» – 2006. – С. 289–290.

9. Михальський В.М. Розробка і дослідження експериментального зразка матричного перетворювача з керуванням від DSP-мікроконтролера / В.М. Михальський, В.М. Соболев, Е.М. Чехет, В.В. Чопик, І.А. Шаповал // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2007. – Ч.1. – С. 11–14.

10. Михальський В.М. Стратегия формирования пространственного вектора выходного напряжения матричного преобразователя в нижней части диапазона регулирования электропривода переменного тока / В.М. Михальский, С.И. Полищук, В.Н.Соболев, Э.М. Чехет, И.А. Шаповал, В.В. Чопик // Зб. наук. праць Дніпродзержинського держ. техн. університету. Темат. вип. "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика". – 2007. – С. 126–131.

11. Михальський В.М. Геометрический аспект решения проблемы "мертвого времени" в преобразователях частоты с векторной широтно-импульсной модуляцией / В.М. Михальский, В.Н. Соболев, Э.М. Чехет, В.В. Чопик, И.А. Шаповал // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2008. – Ч.2. – С. 89–94.

12. Михальський В.М. Компенсация "мертвого времени" в преобразователях частоты с пространственной векторной модуляцией / В.М. Михальский, С.И. Полищук,

В.Н. Соболев, Э.М. Чехет, В.В. Чопик, И.А. Шаповал // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2008. – Ч.1. – С. 12–17.

13. Михальський В.М. Особливості формування струмів в системі "мережа живлення з несиметричними напругами – матричний перетворювач" / В.М. Михальський, В.М. Соболев, Е.М. Чехет, В.В. Чопик, І.А. Шаповал // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2009. – Ч.1. – С. 16–23.

14. Михальський В.М. Керування автономними інверторами напруги із забезпеченням максимального коефіцієнта модуляції при неспотворюючому формуванні вихідної напруги засобами модифікованої ШІМ / В.М. Михальський, В.М. Соболев, В.В. Чопик, І.А. Шаповал // Технічна електродинаміка. – 2010. – № 1. – С. 49–59.

15. Михальський В.М. Визначення гармонічного складу та показників якості вихідної напруги АІН при застосуванні для широтно-імпульсної модуляції перервних модуляційних функцій / В.М. Михальський, В.М. Соболев, В.В. Чопик, І.А. Шаповал // Технічна електродинаміка. – 2010. – № 2. – С. 41–51.

16. Михальский В.М. Пульсации электромагнитного момента асинхронного двигателя при управлении от автономного инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией / В.М. Михальский, С.М. Пересада, В.Н. Соболев, В.В. Чопик, И.А. Шаповал // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2010. – Ч.1. – С. 5–11.

17. Михальский В.М. Разработка и исследование электропривода технологического трамвая с дизель-генератором на основе полупроводникового преобразователя с широтно-импульсной модуляцией / В.М. Михальский, И.А. Шаповал, В.В. Чопик, В.В. Немирович // Вісник Нац. техн. університету «Харківський політехнічний інститут». – 2010. – № 28 – С. 256–261.

18. Михальський В.М. Машина подвійного живлення з двоступеневим матричним перетворювачем / В.М. Михальський, І.А. Шаповал, В.М. Соболев, В.В. Чопик // Електротехнічні та комп'ютерні системи. Темат. вип. "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика" – 2011. – № 03(79) – С. 307–311.

19. Михальський В.М. Способи мінімізації небажаних складових миттєвої потужності із застосуванням паралельних активних фільтрів / В.М. Михальський, С. Й. Поліщук, В.Н. Соболев, І.А. Шаповал, В.В. Чопик // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. Спец. вып. – 2013. – Т.1. – № 8(114). – С. 224–226.

20. Михальський В.М. Керування машиною подвійного живлення з матричним перетворювачем в колі ротора при несиметрії напруг мережі живлення / В.М. Михальський, В.М. Соболев, І.А. Шаповал, В.В. Чопик, А.Л. Дорошенко // Вісник Нац. техн. університету «Харківський політехнічний інститут». – 2013. – № 36(1009) – С. 248–252.

21. Чопик В.В. Розширення діапазону регулювання вхідної реактивної потужності матричного перетворювача при застосуванні в складі паралельного активного фільтра / В.В. Чопик // Праці XIX Міжнародної науково-технічної конференції "Силовая електроніка та енергоефективність", СЕЕ'2013. – Алушта (Україна). – 23-27 вер. 2013. – Секція 2. – 93S на CD-ROM.

АНОТАЦІЇ

Чопик В.В. Матричні перетворювачі з розширеним діапазоном регулювання вхідного реактивного струму для активної компенсації складових потужності. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії. – Інститут електродинаміки НАН України, Київ, 2014.

В дисертаційній роботі вирішено актуальну наукову задачу створення нових та удосконалення існуючих методів керування, які забезпечують розширення діапазону регулювання вхідного реактивного струму матричних перетворювачів, спрямоване на підвищення ефективності активної компенсації небажаних складових потужності.

Застосування модифікованого перетворення Парка при керуванні МП із застосуванням концепції сингулярного розкладання матриць враховує ступінь несиметрії мережі живлення при визначенні відносних тривалостей використання стаціонарних станів ключів і забезпечує формування вхідного реактивного струму, адаптивне до умов несиметрії напруг мережі.

Отримано узагальнюючі розв'язки трансферних рівнянь, що встановлюють залежності між вхідними та вихідними параметрами перетворювача, які показали тотожність методів керування МП, спрямованих на розширення діапазону регулювання вхідного реактивного струму, при оперуванні ступенями свободи прямої та зворотної послідовностей керуючих функцій та визначили розбіжності цих методів при формуванні нульової послідовності керуючих функцій.

Запропоновано пропорційно-векторний метод керування силовим перетворювачем паралельного активного фільтра, який дозволяє використовувати нетипові структури силових схем фільтрів, з регулюванням довжини елементарних переміщень кінця вектора струму на циклах модуляції для регулювання динамічних показників компенсації та забезпечення заданої якості споживаного з мережі струму.

Отримано співвідношення, які дозволяють здійснювати безпосередній розрахунок струмів компенсації з цільовим вибором необхідних складових потужності для застосування їх в компенсаторах заданої топології.

Визначено сукупність обмежень, що накладаються на умови ефективного функціонування паралельних активних фільтрів, і полягають у виборі діапазонів робочих напруг та параметрів реакторів для забезпечення необхідної динаміки регулювання та заданої якості споживаного з мережі струму.

Достовірність та обґрунтованість теоретичних положень, висновків та рекомендацій підтверджено результатами моделювання і експериментальними дослідженнями.

Ключові слова: матричний перетворювач, векторна ШІМ, вхідний струм, теорія миттєвої потужності трифазних кіл.

Чопик В.В. Матричные преобразователи с расширенным диапазоном регулирования входного реактивного тока для активной компенсации составляющих мощности. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.12 – полупроводниковые преобразователи электроэнергии. – Институт электродинамике НАН Украины, Киев, 2014.

В диссертационной работе решена актуальная научная задача создания новых и совершенствования существующих методов управления, которые обеспечивают расшире-

ние диапазона регулирования входного реактивного тока матричных преобразователей, направленное на повышение эффективности активной компенсации нежелательных составляющих мощности.

На основе проведенного анализа состояния исследований методов управления матричными преобразователями обоснована целесообразность создания новых и совершенствования существующих методов расширения диапазона регулирования входного реактивного тока с целью повышения эффективности компенсации составляющих мощности при применении МП как в качестве устройств преобразования параметров электроэнергии, так и в качестве активных компенсаторов нежелательных составляющих мощности.

Применение модифицированного преобразования Парка при управлении МП с использованием концепции сингулярного разложения матриц позволяет учитывать степень несимметрии питающей сети при определении относительных длительностей использования стационарных состояний ключей и обеспечивает формирование входного реактивного тока, адаптивное к условиям несимметрии напряжений сети.

Показано соответствие стационарных состояний МП векторам управляющих функций на комплексной плоскости и усредненным длительностям их использования, что позволило сделать вывод о возможности расширения диапазона регулирования выходных параметров МП за счет формирования модулирующего воздействия на границах области его существования.

Показано, что метод управления МП с использованием экстремальных положений пространственных векторов управляющих функций позволяет, в отличие от метода SVD и метода, использующего гибридный алгоритм, обеспечивать максимально возможный диапазон регулирования входного реактивного тока благодаря формированию этого тока с использованием всех составляющих тока нагрузки.

Предложенный способ оптимизации расчета относительных длительностей использования стационарных состояний обеспечивает формирование гладких управляющих функций, что позволяет получить высокие показатели качества электроэнергии на входе и выходе МП при уменьшении количества коммутаций ключей.

Получены обобщающие решения передаточных уравнений, устанавливающих взаимосвязь между входными и выходными параметрами преобразователя, которые показали тождественность методов управления МП, направленных на расширение диапазона регулирования входного реактивного тока, при оперировании степенями свободы прямой и обратной последовательностей управляющих функций и определили различия этих методов при формировании нулевой последовательности управляющих функций.

Выполнена сравнительная оценка методов управления МП, направленных на расширение диапазона регулирования входной реактивной мощности, путем определения объемов ограничивающих поверхностей, заданных максимальными значениями этой реактивной мощности для всех возможных сочетаний относительных значений активной и реактивной составляющих выходной мощности.

Определены зависимости показателей качества выходного напряжения, входного тока и величины пульсаций электромагнитного момента двигателей, питающихся от МП, которые показали, что повышение степени гладкости модулирующих функций управления ключами преобразователя обеспечивает соответствующее повышение показателей качества электроэнергии и уменьшение пульсаций момента.

Предложенные в работе методики расчета вектора нулевой последовательности управляющих функций позволили реализовать способы управления МП с макси-

мально возможным диапазоном регулирования выходных параметров МП при минимизации количества переключений силовых ключей на циклах модуляции.

Для реализации способов управления с максимально возможным диапазоном регулирования выходных параметров МП и минимизации количества переключений силовых ключей на циклах модуляции целесообразно использовать разработанную в диссертации новую методику расчета вектора нулевой последовательности управляющих функций.

Предложен пропорционально-векторный метод управления силовым преобразователем параллельного активного фильтра, который позволяет использовать нехарактерные структуры силовых схем фильтров, с регулированием длины элементарных перемещений конца вектора тока на циклах модуляции для регулирования динамических показателей компенсации и обеспечения заданного качества потребляемого из сети тока.

Топология параллельного активного фильтра, основанная на применении в качестве преобразователя компенсатора автономной системы «МП-трехфазный емкостный накопитель», позволяет обеспечить реализацию принципа «полностью полупроводникового решения».

Получены соотношения, позволяющие осуществить непосредственный расчет токов компенсации с целевым выбором необходимых составляющих мощности для применения их в компенсаторах определенной топологии.

Установлено, что одновременное использование мгновенных и интегральных подходов к расчету токов компенсатора позволяет устранить все нежелательные составляющие мощности и обеспечить компенсацию с оптимальным сочетанием значений пульсаций составляющих мощности и показателей несинусоидальности токов сети в условиях несимметрии и несинусоидальности напряжений сети.

Определена совокупность ограничений, накладываемых на условия эффективного функционирования параллельных активных фильтров, заключающаяся в выборе диапазонов рабочих напряжений и параметров реакторов для обеспечения необходимой динамики регулирования и заданного качества потребляемого из сети тока.

Построена физическая модель активного компенсатора с использованием матричного преобразователя, которая позволила исследовать пропорционально-векторный метод управления МП в данном применении. С применением этой модели апробированы оптимизированные методы расчета токов компенсации, адаптированные к применению в компенсаторах с использованием МП.

Достоверность и обоснованность теоретических положений, выводов и рекомендаций подтверждается результатами моделирования и экспериментальными исследованиями.

Ключевые слова: матричный преобразователь, векторная ШИМ, входной ток, теория мгновенной мощности трехфазных цепей.

Chopyk V.V. Matrix converters with extended control range of the input reactive current for active compensation of the power components. – Manuscript.

Thesis for a Candidate of Engineering Sciences degree, speciality 05.09.12 – Semiconductor converters of electrical energy. – The Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2014.

The thesis deals with the solution of actual scientific task of the creation of new control methods and improvement of existing ones which provide the extension of control range of

the matrix converter input reactive current for improving the effectiveness of active compensation of the unwanted power components.

Application of the modified Park transformation when the matrix converter is controlled with use of the singular value decomposition takes into account the degree of mains unbalance to determine the duty cycles of the nine switches and provides the input reactive current formation, adaptive to the conditions of unbalance voltage.

Generalized solutions of transfer equations that establish dependencies between input and output parameters of the converter have been obtained. They have shown the identity of MC control methods for extending the range of the input reactive current adjustment when operating with degrees of freedom of the direct and inverse symmetrical components of the duty-cycle space vectors and have determined differences of these methods during the formation of the zero sequence component.

The proportional vector control method of the power converter of shunt active filter has been proposed. It allows to use nontypical power schemes of filters with adjustable length of elementary displacements of the end of the current vector on the PWM cycle to control the dynamic performance of the compensation and to provide the desired quality of consumed current.

The relations that allow direct calculation of the compensation currents with selection of the required power components for their use in compensators of the specified topology have been obtained.

The set of constraints imposed on the conditions of the effective functioning of the shunt active filter and are to select a range of operating voltages and parameters of the reactors to provide the necessary dynamics of adjustment and specified quality of consumed current has been defined.

Reliability and validity of theoretical assumptions, conclusions and recommendations have been confirmed by simulation and experimental tests.

Keywords: matrix converter, vector PWM, input current, instantaneous power theory of three-phase circuits.

Підписано до друку	2014р. Формат 60х84/16
Папір офсетний.	Умовн.-друк. аркуш.
Обл.-вид. аркуш.	Тираж 100 прим. Замовл.

Відділ оперативної поліграфії ІЕД НАН України
03680, Київ-57, проспект Перемоги, 56.