

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

**ШАПОВАЛ ІВАН АНДРІЙОВИЧ**

УДК 621.313.333.1: 62-83

**НАУКОВІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ КОМПЛЕКСІВ ГЕНЕРУВАННЯ  
ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ З ФУНКЦІЯМИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ  
ПОТУЖНОСТІ ТА АКТИВНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ НА БАЗІ МАШИНИ  
ПОДВІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Дніпро – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі перетворення та стабілізації електромагнітних процесів Інституту електродинаміки НАН України, м. Київ.

**Науковий консультант** – доктор технічних наук, професор,  
член-кореспондент НАН України  
**Михальський Валерій Михайлович**,  
Інститут електродинаміки НАН України,  
завідувач відділу перетворення та стабілізації  
електромагнітних процесів.

**Офіційні опоненти:**

- доктор технічних наук, професор  
**Чорний Олексій Петрович**,  
Кременчуцький національний університет ім.  
Михайла Остроградського МОН України,  
Директор Інституту електромеханіки,  
енергозбереження і систем керування;
- доктор технічних наук, професор  
**Островерхов Микола Якович**,  
Національний технічний університет України  
„Київський політехнічний інститут ім. Ігоря  
Сікорського” МОН України,  
завідувач кафедри теоретичної електротехніки;
- доктор технічних наук, професор  
**Щур Ігор Зенонович**,  
Національний університет "Львівська політехніка"  
МОН України, професор кафедри електроприводу і  
комп'ютеризованих електромеханічних систем  
Інституту енергетики та систем керування.

Захист відбудеться “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2019 р. о \_\_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 в Національному технічному університеті "Дніпровська політехніка" за адресою: 49005, м. Дніпро, пр. Дмитра Яворницького, 19, корпус 1, ауд. 60, тел. \_\_\_\_\_.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету "Дніпровська політехніка" за вищевказаною адресою.

Автореферат розісланий “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2019 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 08.080.07, д.т.н., проф.

В.І. Корнієнко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Поступове виснаження запасів легкодоступних дешевих енергоресурсів, постійне зростання ціни на органічне паливо і погіршення екологічних умов життя стали поштовхом для розвитку та широкого впровадження екологічно чистих поновних джерел енергії, таких як вітро-, гідро- і сонячні джерела енергії. В той же час, масове впровадження регульованих електроприводів на основі класичних перетворювачів (з некерованими діодними випрямлячами) викликає погіршення якості електроенергії мережі живлення для інших споживачів, що спричинено несинусоїдальністю споживаного такими електроприводами струму. При роботі електроприводів з некерованим діодними випрямлячами зростає вплив на мережу живлення, що позначається в зниженні коефіцієнта потужності на вході перетворювачів, коливаннях напруги в мережі і спотворенні синусоїдальної форми струму. Зниження коефіцієнта потужності збільшує реактивну потужність системи електропостачання, що призводить до додаткових втрат енергії і вимагає збільшення пропускної здатності її елементів. В електричних мережах підприємств із сучасним устаткуванням вентильні перетворювачі знаходять все ширше застосування. Питома вага нелінійних навантажень безупинно зростає. В цих умовах рівень вищих гармонік у напругах мережі нерідко досягає 10-20 %.

Низька якість електроенергії збільшує енергетичні та економічні втрати, призводить до експлуатаційних проблем виробництва і навіть перенавантаження трансформаторів. У цьому плані поєднання розосередженого генерування та функціональних можливостей активної фільтрації є одним із способів підвищення якості електроенергії та зниження прямих і непрямих експлуатаційних витрат енергосистеми.

Значний внесок у вирішення проблеми підвищення якості генерованої електроенергії внесли вітчизняні та зарубіжні вчені: Г.Г. Півняк, А.К. Шидловський, О.С. Бешта, А.Ф. Жаркін, С.О. Кудря, В.Ф. Резцов, І.В. Жежеленко, С.М. Пересада, П.Ф. Васько, Л.І. Мазуренко, О.В. Садовой, О.М. Островерхов, О.Г. Плахтина, О.П. Чорний, П.Д. Андрієнко, В.І. Сенько, Е.М. Чехет, І.З. Щур, О.С. Хватов, Р.Т. Шрейнер, А. Emanuel, J.C. Clare, F. Blaabjerg, R. Cardenas, S. Saadate, J.W. Kolar, T. Lipo і багато інших.

### **Обґрунтування вибору теми дослідження.**

Донедавна комплекси генерування електроенергії забезпечували лише можливість генерування активної потужності в електричну мережу, а коефіцієнт потужності водночас був близьким до одиниці. Вони були відділені від мережі, щоб уникнути пошкоджень, що могли виникнути після збоїв мережі, оскільки встановлена потужність була незначною, порівнюючи з енергосистемою. Компенсація реактивної потужності здійснювалася традиційними засобами, а активна фільтрація гармонічних струмів досягалася локально за допомогою активних фільтрів, розташованих поблизу нелінійних навантажень.

Ще 20 років тому потужності систем генерування електроенергії на основі альтернативних джерел, зокрема вітрових електростанцій, були незначними і їх вплив на роботу енергосистеми був мінімальним. Збільшення встановленої потужності вітроенергетичних установок показало, що відсутність стандартів підключення таких установок є загрозою для стабільності і якості електроенергії мережі. Як наслідок, вимоги для підключення вітрових електростанцій до мереж стають все суворішими.

Незважаючи на технічні проблеми, зумовлені підключенням вітроенергетичних установок до енергосистеми, і більш жорсткі вимоги, які вітроенергетичні установки зобов'язані

ні задовольняти, їх кількість, встановлена у всьому світі, постійно та швидко зростає. За прогнозами, виробництво електроенергії від сили вітру буде становити 20% від усього виробництва електроенергії до 2030 року: цей прогноз означає, що вплив вітроенергетичних установок на роботу мережі живлення стане більш значущим в майбутньому, і потребує подальшого удосконалення характеристик вітрогенераторів та їх систем керування.

Сучасні технології дозволяють керувати системами генерування електроенергії на максимальній потужності протягом більшої частини часу роботи, при цьому використовувати частину енергії ще й для додаткових функцій, які допомагають підвищити якість електроенергії. Для здійснення електромеханічного перетворення в системах генерування електроенергії існує багато технологічних альтернатив. Різні конфігурації отримуються шляхом поєднання асинхронної або синхронної машин з перетворювачами повної або часткової потужності.

Комплекси генерування електроенергії на базі машини подвійного живлення (МПЖ) дозволяють досягти високої ефективності електромеханічного перетворення енергії. Такі комплекси характеризуються тим, що цілі керування досягаються при варіації кутової швидкості в обмеженому діапазоні  $\pm 30\%$  від синхронної швидкості обертання.

Машина подвійного живлення широко застосовується як генератор електричної енергії, зокрема, у вітрогенеруючих установках середньої та високої потужності зі змінною швидкістю з перетворювачем частоти та напруги в колі ротора. Статорні обмотки МПЖ підключаються безпосередньо до мережі, а обмотки ротора живляться від двонаправленого напівпровідникового перетворювача. Таким перетворювачем може бути повністю керований реверсивний перетворювач частоти з ланкою постійного струму або матричний перетворювач, потужність якого пропорційна ковзанню. В системах генерування енергії робота за змінної швидкості валу дозволяє підвищити ефективність процесу перетворення енергії за рахунок роботи на оптимальній швидкості первинного перетворювача енергії. Наявність двох каналів керування МПЖ дає можливість, окрім керування моментом (активною потужністю), реалізувати керування реактивною потужністю статора МПЖ.

В широкому розумінні поняття якості електроенергії включає більше десяти різних критеріїв, передбачених нормативними документами. В даному дослідженні показники якості умовно зводяться до показників несинусоїдальності відповідних кривих в зв'язку з тим, що для підвищення якості електроенергії використовуються засоби і можливості керування комплексами генерування на базі МПЖ.

Вимоги нормативних документів до показників несинусоїдальності вихідної напруги напівпровідникових перетворювачів з широтно-імпульсною модуляцією в переважній більшості випадків передбачають застосування вихідних згладжуючих фільтрів у всіх вихідних фазах перетворювачів. Для живлення відповідальних споживачів часто необхідно застосовувати цілий комплект резонансних LC-фільтрів, кожен з яких розраховується на придушення однієї або декількох сусідніх гармонічних складових у спектрі вихідної напруги. Масогабаритні показники та вартість таких фільтрів збільшуються пропорційно до амплітудних значень відповідних гармонічних складових та до близькості їх розташування на шкалі частот до частоти основної гармоніки вихідної напруги. З цих причин спектральний склад кривої напруги для оцінки несинусоїдальності має не менше значення, ніж коефіцієнт гармонік цієї напруги.

Покращення гармонічного складу вихідного струму перетворювачів частоти (ПЧ) при

роботі в складі систем генерування дозволяє зменшити додаткові втрати в електричній машині, зменшити пульсації моменту та небажані додаткові навантаження в механічній частині системи, що здатні викликати резонансні явища та створювати акустичний шум.

З названих причин підвищення якості генерованої електроенергії засобами керування машиною подвійного живлення в складі комплексу генерування є важливою науково-прикладною проблемою, а тема досліджень, направлених на створення цих методів, 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", затверджена 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", затверджена постановою Бюро ВФТПЕ НАН України від 06.10.2009р., протокол №13, № ДР 0109U006757); "Розробка та дослідження ефективних засобів і методів керування напівпровідниковими перетворювачами та електромеханічними системами для забезпечення електромагнітної сумісності джерел електроенергії та споживачів" ("Модулятор-2", затверджена постановою Бюро ВФТПЕ НАН України від 18.11.2014р., протокол №16, № ДР 0115U002581); "Розробка, дослідження та підготовка до впровадження у виробництво енергозберігаючих багатofункціональних електроприводів з підвищеним ККД" програми «Науково-технічні основи вирішення проблем енергозбереження» ("Енергозбереження", затверджена розпорядженням Президії НАН України від 18.04.06 №239, № ДР 0107U000068); прикладних НДР: "Дослідити електромагнітні процеси та розробити алгоритми адаптивного керування системами з регуляторами напруги, струму, частоти і потужності, орієнтованими на застосування в нових електротехнологіях" ("База-П4", затверджена постановою Бюро ВФТПЕ НАН України від 23.01.2007р., протокол №1, № ДР 0107U001690); "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", затверджена постановою Бюро ВФТПЕ НАН України від 06.10.2009р., протокол №13, № ДР 0109U006889). При виконанні цих робіт автор обґрунтував напрямки досліджень, розробив основні принципи компенсації несиметрії і несинусоїдальності генерованих струмів машини подвійного живлення для підвищення якості електроенергії та був відповідальним виконавцем НДР.

**Мета і завдання досліджень.** Метою роботи є розроблення наукових основ створення комплексів генерування з функціями компенсації реактивної потужності та активної фільтрації на базі машини подвійного живлення для підвищення якості генерованої електроенергії.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі основні задачі:

- формулювання проблеми підвищення якості електроенергії комплексами генерування на базі МПЖ;
- визначення особливостей системи оцінювання якості електроенергії в системах розосередженої генерації;
- розробка стратегії компенсації несиметрії струмів, генерованих МПЖ;

- розробка стратегії компенсації несинусоїдальності струмів, генерованих МПЖ;
- розробка принципів формування вхідних струмів матричних перетворювачів роторної ланки МПЖ;
- розробка методу мінімізації втрат потужності повністю керованої МПЖ;
- дослідження можливості об'єднання ланок постійного струму перетворювачів в колах статора і ротора МПЖ;
- розробка комбінованого методу компенсації гармонічних складових струму, генерованого МПЖ;
- дослідження методу часткового послаблення складової нульової послідовності напруг трифазної чотирипровідної мережі засобами керування напівпровідниковими перетворювачами в ланці ротора МПЖ;
- розробка методу вибіркової компенсації гармонічних складових струму, генерованого МПЖ;
- експериментальні дослідження та впровадження методів керування МПЖ.

*Об'єкт дослідження* – процеси генерування електроенергії комплексами на базі машини подвійного живлення.

*Предмет дослідження* – шляхи підвищення якості електроенергії, генерованої комплексами генерування з функціями компенсації реактивної потужності та активної фільтрації.

**Методи досліджень.** Приведені в роботі результати отримано з використанням методу безперервного перетворення Лапласа для аналізу електромагнітних процесів; методу просторових векторів при аналізі запропонованих способів керування; теорії лінійних диференціальних рівнянь; гармонічного аналізу та синтезу кривих вихідних напруг напівпровідникових перетворювачів; елементів матричного числення; теорії миттєвих потужностей і методів перетворення координат при розробці стратегії формування струмів в системі "машина подвійного живлення – матричний перетворювач"; теорії просторових векторів; теорії електричних кіл; математичного та фізичного моделювання процесів генерування електроенергії.

#### **Основні наукові положення:**

- підвищення якості електроенергії в системах розосередженої генерації забезпечується застосуванням адаптивного до спотворень напруги мережі керування напівпровідниковими перетворювачами з об'єднаною ланкою постійного струму в колах статора і ротора машини подвійного живлення комплексу генерування електроенергії;
- неперервне оцінювання гармонічного складу струму нелінійного навантаження в точці загального приєднання за допомогою спостерігача гармонік забезпечує зниження коефіцієнта сумарних гармонічних спотворень шляхом керування напівпровідниковим перетворювачем в роторній ланці машини подвійного живлення.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Вперше розроблено стратегію компенсації несиметрії і несинусоїдальності струмів, генерованих машиною подвійного живлення, в умовах підключення нелінійних навантажень, яка полягає в компенсації реактивної потужності засобами керування МПЖ та активній фільтрації струму з використанням можливостей напівпровідникового перетворювача в роторній ланці, що дало змогу забезпечити генерування синусоїдальних і симетричних струмів та компенсацію пульсацій активної і реактивної потужностей.

2. Розроблено нові принципи формування вхідних струмів матричних перетворювачів роторної ланки машини подвійного живлення, що полягають в динамічній модуляції за рахунок вибору напрямку просторового вектора вхідного струму з використанням симетричної складової зворотної послідовності цього струму та дають змогу підвищити показники якості споживаного струму шляхом керування його реактивною складовою.

3. Розроблено новий метод керування машиною подвійного живлення з одночасним керуванням по колах статора і ротора, який для ефективного відпрацювання заданого моменту використовує надлишковість координат керування, що дало змогу забезпечити мінімізацію втрат потужності.

4. Вперше встановлено, що застосування керованої об'єднаної ланки постійного струму перетворювачів в статорі і роторі машини подвійного живлення в складі комплексу генерування електроенергії забезпечує адаптивність цього комплексу до спотворень мережі і підвищити якість генерованої електроенергії.

5. Створено новий комбінований метод компенсації гармонічних складових струму, генерованого машиною подвійного живлення, який полягає в об'єднанні компенсаційних впливів МПЖ і напівпровідникового перетворювача в роторній ланці на підвищення якості генерованої електроенергії та дає змогу виконати вимоги забезпечення електромагнітної сумісності у разі приєднання нелінійних навантажень до точки загального приєднання.

6. Вперше розроблено стратегію керування напівпровідниковими перетворювачами в ланці ротора машини подвійного живлення з функціями паралельної активної фільтрації, при якій вектор вхідного миттєвого струму підтримується пропорційним вектору миттєвих фазних напруг з частковим послабленням складової нульової послідовності напруг трифазної чотирипровідної мережі, що дає змогу зменшити потужність втрат в з'єднувальних силових кабелях системи генерування електроенергії.

7. Удосконалено метод вибіркової компенсації гармонічних складових струму, генерованого машиною подвійного живлення, який, на відміну від відомих, застосовує спостерігач гармонік струму, що забезпечує асимптотичне оцінювання будь-якої заданої кількості гармонік і дозволяє здійснити компенсацію домінуючих гармонічних складових.

**Обґрунтованість та достовірність** результатів дисертації підтверджується: коректністю постановки наукових задач з використанням відомих положень теорії миттєвої потужності і методів перетворення координат при розробці стратегії формування струмів в системах генерування електроенергії; їх збігом з результатами експериментальних досліджень та узгодженістю з відомими теоретичними результатами в граничних випадках; позитивним досвідом апробації результатів дисертаційної роботи.

#### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Визначено умови для ефективної компенсації несиметрії і несинусоїдальності генерованих струмів машини подвійного живлення.

2. Визначено властивості структурних елементів комплексів генерування електроенергії на базі машини подвійного живлення і розроблено рекомендації з налаштування їхніх параметрів.

3. Розроблено програмне забезпечення, що дозволяє здійснити практичну реалізацію методів керування машиною подвійного живлення на базі цифрового сигнального процесора.

4. Розроблено і проведено експериментальну перевірку матричних перетворювачів в

ланці ротора машини подвійного живлення із застосуванням для керування ними поєднання цифрових сигнальних процесорів і програмованих логічних матриць.

5. Створено структури моделей для фізичного моделювання комплексу генерування на основі машини подвійного живлення.

6. Розроблений алгоритм керування напівпровідниковим перетворювачем в ланці ротора МПЖ з функціями паралельної активної фільтрації знайшов практичне застосування при створенні дослідного зразка МПЖ.

7. Отримані результати впроваджено у навчальному процесі кафедри відновлюваних джерел енергії Національного технічного університету України "Національний технічний університет імені Ігоря Сікорського".

8. Результати роботи використано в Національному технічному університеті України "Національний технічний університет імені Ігоря Сікорського" та Інституті електродинаміки НАН України при виконанні другого етапу НДР "Комплексні системи енергозабезпечення автономних об'єктів на базі використання відновлюваних джерел енергії" (ДР 0117U004325), НДР "Розробка та дослідження ефективних засобів і методів керування напівпровідниковими перетворювачами та електромеханічними системами для забезпечення електромагнітної сумісності джерел електроенергії та споживачів", "Модулятор-2" (№ ДР 0115U002581).

**Особистий внесок здобувача.** Дисертація є самостійно виконаною науковою роботою, в якій викладено авторський підхід до обґрунтування теоретичних засад створення нових методів підвищення якості генерованої електроенергії засобами керування машиною подвійного живлення; розробки математичних моделей системи генерування електроенергії з МПЖ; розробки стратегії зниження несиметрії та несинусоїдальності струмів в системі генерування електроенергії на основі машини подвійного живлення в умовах підключення нелінійних навантажень. Внесок автора в роботи, опубліковані у співавторстві, конкретизовано в списку публікацій.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи і результати досліджень доповідалися і обговорювалися на двадцяти чотирьох міжнародних та одній українській конференціях, зокрема: міжнародних науково-технічних конференціях «Силова електроніка і енергоефективність» (Алушта, 2004-2012 рр.); міжнародних науково-технічних конференціях "Проблеми сучасної електротехніки" (Київ, 2004, 2006, 2008, 2010 рр.); міжнародних науково-технічних конференціях "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика" (Харків, 2004-2013 рр.); науково-практичній конференції "Нетрадиційні і поновлювальні джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні" (Львів, 2005 р.); міжнародних науково-технічних конференціях "11th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC'2004" (Riga, Latvia, 2004 p.), "13th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC'2008" (Poznan, Poland), "IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE" (Cambridge, United Kingdom); міжнародних науково-технічних конференціях 1nd, 2nd and 3rd IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS-2014, IEPS-2016 та IEPS-2018) (Kyiv, Ukraine, 2014, 2016, Kharkiv, Ukraine, 2018), IEEE International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2013, 2015-2018) (Kyiv, Ukraine).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 53 наукових праці, в тому числі одну монографію, 31 статтю у наукових фахових виданнях (з яких 14 публікації відображено



в міжнародній наукометричній базі Scopus), 11 тез доповідей на міжнародних та українських науково-технічних конференціях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із змісту, переліку умовних скорочень, вступу, 6 розділів, висновків, списку використаної літератури із 215 найменувань та 2-х додатків. Загальний обсяг роботи становить 335 сторінок, у тому числі 278 сторінок основного тексту, 115 рисунків, 12 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

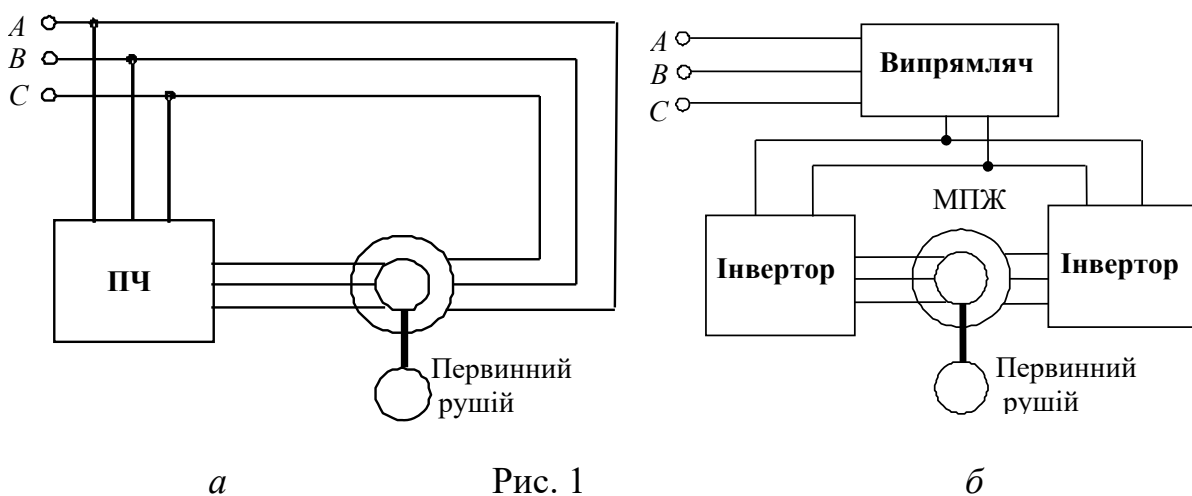
У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету та задачі наукових досліджень, наведено дані про зв'язок роботи з науковими програмами, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено дані про їх апробацію, публікацію та впровадження.

У **першому розділі** проведено аналіз існуючих методів підвищення якості електроенергії в системах генерування на основі машини подвійного живлення, обґрунтовано доцільність розвитку теорії керування машиною подвійного живлення шляхом створення нових методів компенсації реактивної потужності та активної фільтрації.

Сучасні технології керування дозволяють експлуатувати системи генерування електроенергії (СГЕ), зокрема вітроелектростанції (ВЕС), нижче максимальної потужності протягом більшої частини часу, забезпечуючи при цьому виконання допоміжних завдань для мережі.

Запропоноване використання СГЕ має багато практичних реалізацій, оскільки кількість нелінійних навантажень (НН), підключених до мережі, постійно зростає, що призводить до великих значень гармонічних складових струмів, що протікають в мережі. СГЕ, що досліджується в даній роботі, ґрунтується на технології МПЖ, оскільки це найбільш поширена конфігурація для сучасних систем генерування.

Для побудови системи генерування електроенергії прийнято за основу дві базові структури МПЖ: класична з двонаправленим ПЧ в колі ротора (рис. 1 а) та повністю керована з інверторами в колах статора та ротора і спільним випрямлячем з двонаправленим потоком енергії (рис. 1 б).



Слід зазначити, що джерела розосередженої генерації (РГ) під час їх паралельної роботи з розподільною мережею являють собою джерела змінного струму. Тому доцільно при розгляді питань забезпечення належної якості напруги розглядати і нормувати їх параметри не в термінах гармонік вихідної напруги (що припустимо при автономній роботі), а в термінах гармонік струму.

Зміни в стандартах якості параметрів мережі, внесені останніми роками, вимагають від вітроелектростанцій активної участі у регулюванні напруги. Таке регулювання здійснюється шляхом керування реактивною потужністю, що обмінюється між вітрогенератором і мережею, для виконання цього завдання існують різні методики. Важливою умовою виконання вимог до якості напруги є обмеження рівнів емісії збурень, які передаються в електричні мережі від генеруючих об'єктів та навантажень споживачів.

Показники допустимих рівнів емісії збурень можуть бути виражені тільки в термінах напруги збурення в точці загального приєднання (ТЗП) до мережі. Параметри емісії збурень виробник устаткування зазвичай задає в значеннях струму, на підставі яких споживач повинен розрахувати очікувані показники якості напруги в ТЗП. Вихідними даними для цього має бути імпеданс мережі, наявний рівень збурень і характер навантаження, яке вже є підключеним до мережі.

В результаті проведення аналізу сучасних міжнародних стандартів у галузі забезпечення ЕМС і якості напруги в мережах з джерелами РГ встановлено, що в теперешній час для об'єктів РГ малої потужності (мікрогенераторів) не розроблено єдиної методики проведення вимірювань кількісних характеристик, що стосуються саме показників якості генерованої енергії. На сьогодні зазначені стандарти мають посилання на виконання вимог діючої ЕМС Директиви і гармонізованих стандартів до неї, що стосуються лише низьковольтного обладнання зі струмом менше 75 А на фазу. В той же час згадані гармонізовані стандарти з емісії гармонік струму і флікеру свого часу було розроблено для енергоспоживаючих навантажень, а не для генеруючих пристроїв. Крім того встановлено, що для об'єктів вітроенергетики великої потужності стандартом EN 61400-21 визначено методику вимірювання та оцінки показників якості енергії, а також принципи встановлення граничних норм для зазначених показників, але не визначено їх конкретні значення.

На основі аналізу існуючих методів підвищення якості електроенергії в системах генерування електроенергії з використанням машини подвійного живлення обґрунтовано доцільність розвитку теорії керування машиною подвійного живлення шляхом створення нових методів компенсації реактивної потужності та активної фільтрації.

Порівняльний аналіз конфігурацій систем генерування електроенергії зі змінною швидкістю обертання валу приводного рушія показав, що одним з найбільш ефективних є варіант СГЕ на основі МПЖ, що забезпечує незалежне регулювання активної і реактивної потужності. У порівнянні з іншими системами генерування електроенергії МПЖ має меншу встановлену потужність перетворювача в колі ротора.

Проведений аналіз підтвердив важливість проблеми формування вхідних струмів перетворювачів кола ротора МПЖ у разі несиметрії та несинусоїдальності напруг мережі.

Встановлено, що для розробки методу компенсації гармонічних складових струму, генерованого МПЖ, в трифазній чотирипровідній мережі необхідно створити математичну модель СГЕ з керуванням перетворювачем в колі ротора з функціями активної фільтрації.

**У другому розділі** розроблено і досліджено метод керування електромагнітним моментом системи генерування електроенергії на базі повністю керованої МПЖ за умови одночасного керування по колах статора та ротора.

В роботі прийнято, що вісь  $d$  системи координат  $dq$  збігається з вектором головного магнітного потоку  $\psi_m$ , тобто :

$$\psi_{md} = |\psi_m|, \psi_{mq} \equiv 0. \quad (1)$$

Рівняння (1) відомі як умова точної орієнтації обертової системи координат  $dq$  вздовж вектора головного магнітного потоку.

Варто відзначити, що вектор головного магнітного потоку  $\vec{\psi}_m$  в МПЖ безпосередньо не вимірюється, тому можлива лише асимптотична орієнтація по полю головного магнітного потоку машини, тобто

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \psi_{md} = |\psi|, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \psi_{mq} = 0. \quad (2)$$

Зважаючи на прийняту орієнтацію обертової системи координат  $dq$ , визначено похибки відпрацювання проекцій вектора головного магнітного потоку у вигляді:

$$\tilde{\psi}_{md} = \psi_{md} - \psi^*, \quad \tilde{\psi}_{mq} = \psi_{mq}. \quad (3)$$

З рівнянь (3) очевидно, що умова  $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi}_{mq} = 0$  визначає асимптотичну орієнтацію за вектором головного магнітного потоку МПЖ, а умова  $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi}_{md} = 0$  – асимптотичне відпрацювання модуля головного магнітного потоку, тобто  $\lim_{t \rightarrow \infty} \psi_{md} = |\psi_m|$ .

Умовою орієнтації системи координат  $dq$  вздовж вектора головного магнітного потоку є:

$$i_{1q} = -i_{2q}. \quad (4)$$

Розглядаючи  $i_{2d}^*$  як керуючу дію, спроектовано регулятор головного магнітного потоку у вигляді

$$i_{2d}^* = \frac{1}{L_m} \psi_m^* - k_{\psi} \tilde{\psi}_{md} - x_{\psi}, \quad \dot{x}_{\psi} = k_{\psi i} \tilde{\psi}_{md}, \quad (5)$$

де  $k_{\psi}$ ,  $k_{\psi i}$  – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складової ПІ регулятора головного магнітного потоку.

Регулятори проекцій струмів  $i_{1d}$  та  $i_{2d}$  сформовано у вигляді

$$\begin{aligned} u_{1d} &= -\omega_k L_{1\sigma} i_{1q} + \dot{\psi}_m^* - k_{id} \tilde{i}_{1d} - x_{1d}, \\ u_{2d} &= r_2 i_{2d}^* + L_{2\sigma} \dot{i}_{2d}^* - \omega_k L_{2\sigma} i_{2q} + \dot{\psi}_m^* - k_{id} \tilde{i}_{2d} - x_{2d}, \\ \dot{x}_{1d} &= k_{iid} \tilde{i}_{1d}, \quad \dot{x}_{2d} = k_{iid} \tilde{i}_{2d}, \end{aligned} \quad (6)$$

де  $k_{id}$  та  $k_{iid}$  – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складової ПІ регуляторів проекцій струмів.

Спроектовано алгоритм векторного керування електромагнітним моментом МПЖ, для цього сформуємо задане значення проекції струму статора МПЖ по осі  $q$  як:

$$i_{1q}^* = \frac{2}{3} \frac{M^*}{p_n \psi^*}. \quad (7)$$

В реальній МПЖ єдиними вхідними величинами керування є вектор напруг статора  $\vec{u}_1 = (u_{1d}, u_{1q})^T$  та вектор напруг ротора  $\vec{u}_2 = (u_{2d}, u_{2q})^T$ , тому вихідні величини регуляторів потоку та моменту в (5) та (7) можуть бути лише бажаними траєкторіями  $(i_{1d}^*, i_{2d}^*, i_{1q}^*, i_{2q}^*)$  струмів  $(i_{1d}, i_{2d}, i_{1q}, i_{2q})$ .

Рівняння динаміки струмів статора та ротора МПЖ:

$$\begin{aligned}
u_{1d} &= -\omega_k L_{1\sigma} i_{1q} + \frac{d}{dt} \psi_m^* - k_{id} \tilde{i}_{1d} - v_{1d}, & u_{2d} &= -\omega_2 L_{2\sigma} i_{2q} + \frac{d}{dt} \psi_m^* - k_{id} \tilde{i}_{2d} - v_{2d}, \\
u_{1q} &= r_1 i_{1q}^* + L_{1\sigma} \frac{d}{dt} i_{1q}^* + \omega_k \psi_m^* - k_{iq} \tilde{i}_{1q} - v_{1q}, & u_{2q} &= \omega_2 L_{2\sigma} i_{2d} + \omega_2 \psi_m^* - k_{iq} \tilde{i}_{2q} - v_{2q},
\end{aligned} \tag{8}$$

де  $k_{id} > 0, k_{iq} > 0$  – пропорційні коефіцієнти регуляторів струму;  $v_{1d}, v_{1q}, v_{2d}$  та  $v_{2q}$  – компоненти інтегральної дії, що дорівнюють:

$$\frac{d}{dt} v_{1d} = k_{iid} \tilde{i}_{1d}, \quad \frac{d}{dt} v_{1q} = k_{iiq} \tilde{i}_{1q}, \quad \frac{d}{dt} v_{2d} = k_{iid} \tilde{i}_{2d}, \quad \frac{d}{dt} v_{2q} = k_{iiq} \tilde{i}_{2q}, \tag{9}$$

де  $k_{iid} > 0, k_{iiq} > 0$  – коефіцієнти інтегральних складових регуляторів струму.

Представлений алгоритм керування реалізує так зване "ортогональне керування", при якому підтримується сталість головного магнітного потоку і ортогональність векторів струму статора і магнітного потоку.

Побудовано алгоритм керування МПЖ з двома ПЧ, який забезпечує мінімізацію втрат в міді і сталі. Втрати в міді безпосередньо залежать від струму, що протікає по обмотках, який, в свою чергу, залежить від навантаження на валу двигуна. Втрати в сталі залежать від магнітних властивостей матеріалів, що використовуються, величини магнітного потоку і частоти обертання електромагнітного поля статора і ротора.

Отримано регулятор головного магнітного потоку з керуючими діями по статору і ротору:

$$i_{1d}^* = \frac{\psi_m^*}{L_m} \frac{r_2}{r_1 + r_2} - k_\psi \tilde{\psi}_{md} - x_\psi, \quad i_{2d}^* = \frac{\psi_m^*}{L_m} \frac{r_1}{r_1 + r_2} - k_\psi \tilde{\psi}_{md} - x_\psi. \tag{10}$$

При стабілізації величини модуля потокозчеплення на заданому рівні втрати в сталі будуть залежати від значення частоти обертання електромагнітного поля статора і ротора. Мінімізуємо втрати в сталі при заданій частоті обертання. При зустрічному обертанні полів необхідну швидкість обертання ротора  $\omega$  можна отримати при менших значеннях  $\omega_1$  і  $\omega_2$ , тобто при менших втратах. Отримаємо

$$\omega_1 = -\omega_2 = \omega/2. \tag{11}$$

Для системи з двома перетворювачами частота обертання електромагнітного поля статора і ротора дорівнює  $\omega/2$  і, відповідно, втрати в сталі будуть менші, ніж для систем МПЖ з перетворювачем тільки в колі ротора.

Функціональну схему розробленої системи керування МПЖ наведено на рис. 2.

В пакеті прикладних програм Matlab\Simulink побудовано математичну модель електропривода МПЖ. При моделюванні була використана МПЖ з такими параметрами: потужність  $P=1,4$  кВт, число пар полюсів  $p_n=3$ ,  $J=0,2$  кгм<sup>2</sup>,  $L_1=L_2=0,317$  Гн,  $L_m=0,3$  Гн,  $R_1=4,5$  Ом,  $R_2=7,4$  Ом. Пропорційні та інтегральні коефіцієнти регуляторів головного магнітного потоку та швидкості:  $k_\psi = 100$ ,  $k_{\psi i} = 5000$ ,  $k_\omega = 50$ ,  $k_{\omega i} = 1250$ . Пропорційні та інтегральні коефіцієнти регуляторів струмів (РС на рис. 2):  $k_{id} = 200$ ,  $k_{iq} = 2000$ ,  $k_{iid} = 200$ ,  $k_{iiq} = 2000$ .

Тест з відпрацювання траєкторії заданого моменту при моделюванні має таку послідовність дій:

- 1) протягом інтервалу часу від 0 до 0,2 с за допомогою первинного рушія МПЖ розганяється до синхронної швидкості обертання ротора, що дорівнює 104,7 рад/с;
- 2) протягом інтервалу 0,25–0,5 с відбувається збудження МПЖ;

- 3) у момент часу  $t=1\text{c}$  подається завдання на відпрацювання моменту;  
 4) на інтервалі часу від 1,5 до 2,5 с швидкість первинного рушія змінюється в межах вище і нижче синхронної швидкості.

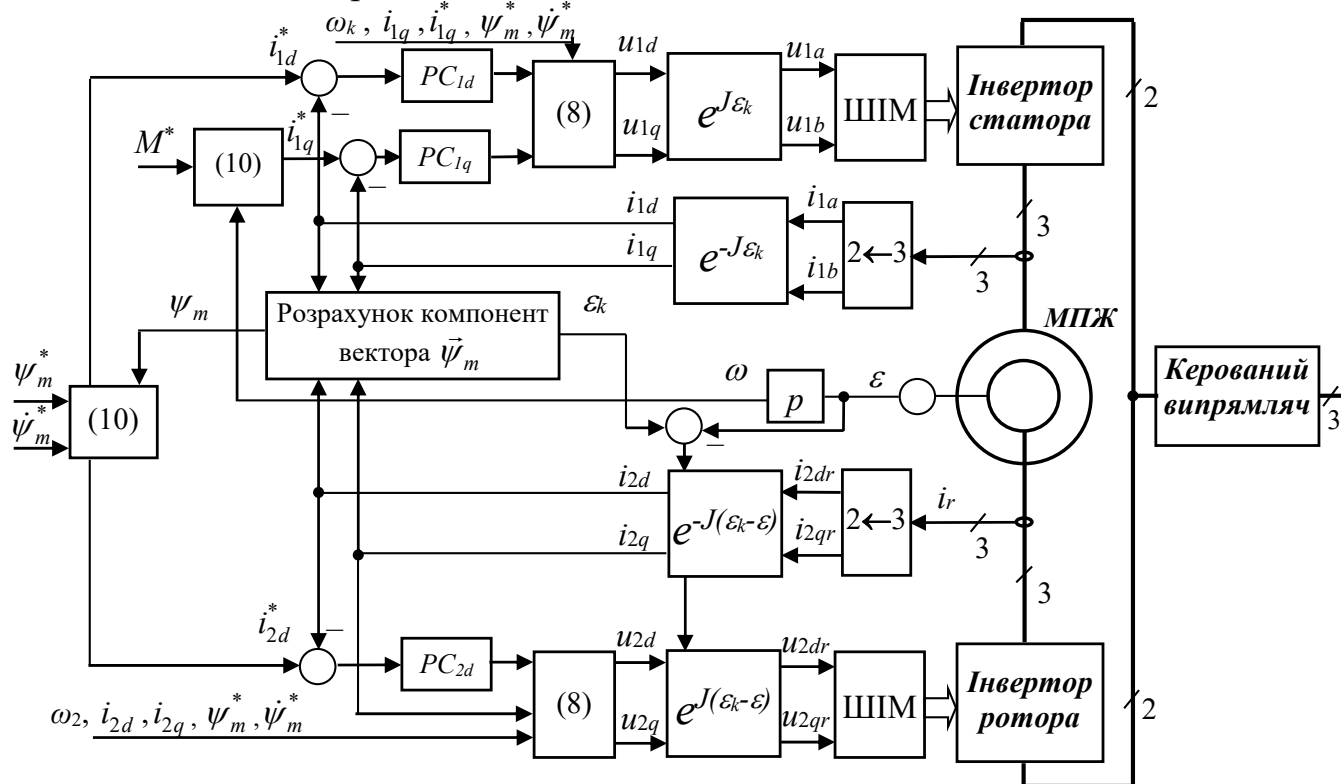


Рис. 2

Задані траєкторії швидкості первинного рушія, головного магнітного потоку, електромагнітного моменту та похибку відстеження моменту показано на рис. 3. Графіки відпрацювання струмів статора і ротора в системі координат  $(d-q)$  представлено на рис. 4, а активні і реактивні потужності – на рис. 5. Аналіз графіків перехідних процесів свідчить про те, що похибки відстеження головного магнітного потоку та електромагнітного моменту знаходяться на нульовому рівні.

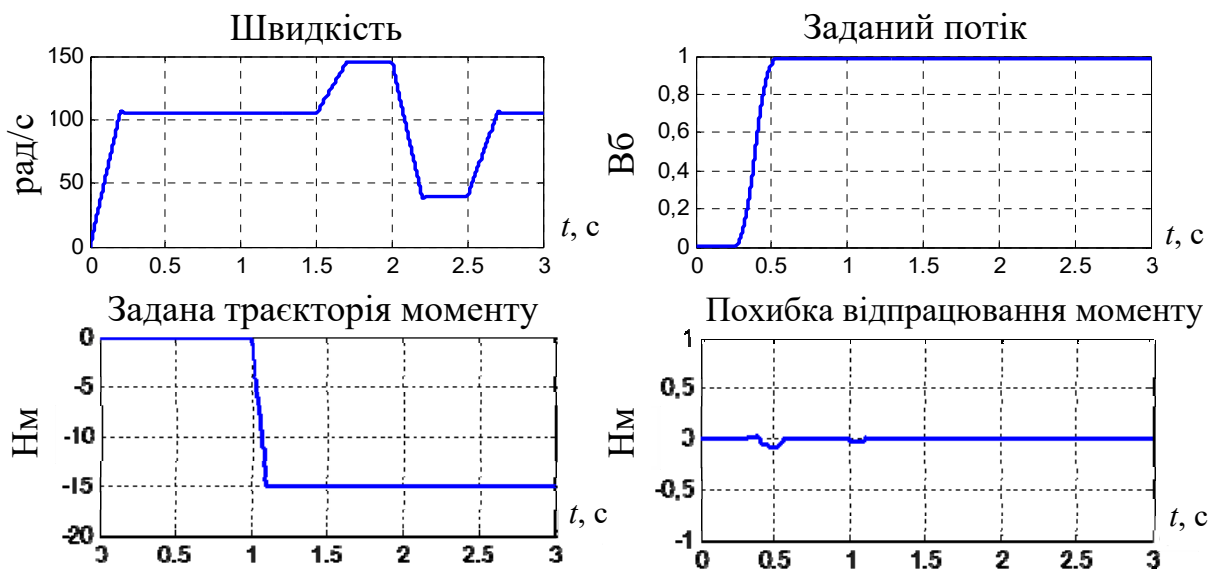


Рис. 3

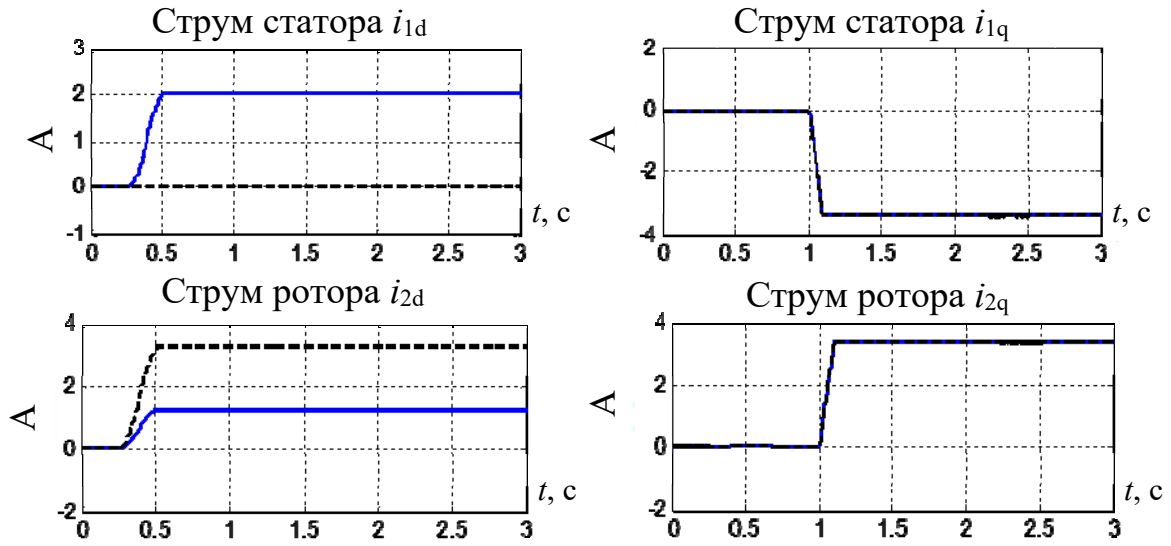


Рис. 4

Пунктирна лінія на рис. 4, 5 і 6 відповідає ортогональному керуванню повністю керованою МПЖ, а суцільна лінія відповідає керуванню з мінімізацією втрат. Аналіз графіків перехідних процесів свідчить, що похибки відпрацювання потоку та моменту достатньо малі. На рис. 6 представлено порівняння втрат в міді при ортогональному керуванні (пунктирна лінія) і при керуванні з мінімізацією втрат (суцільна лінія). При роботі з номінальним потоком і номінальним моментом МПЖ втрати в міді менші на 15% в порівнянні з ортогональним керуванням.

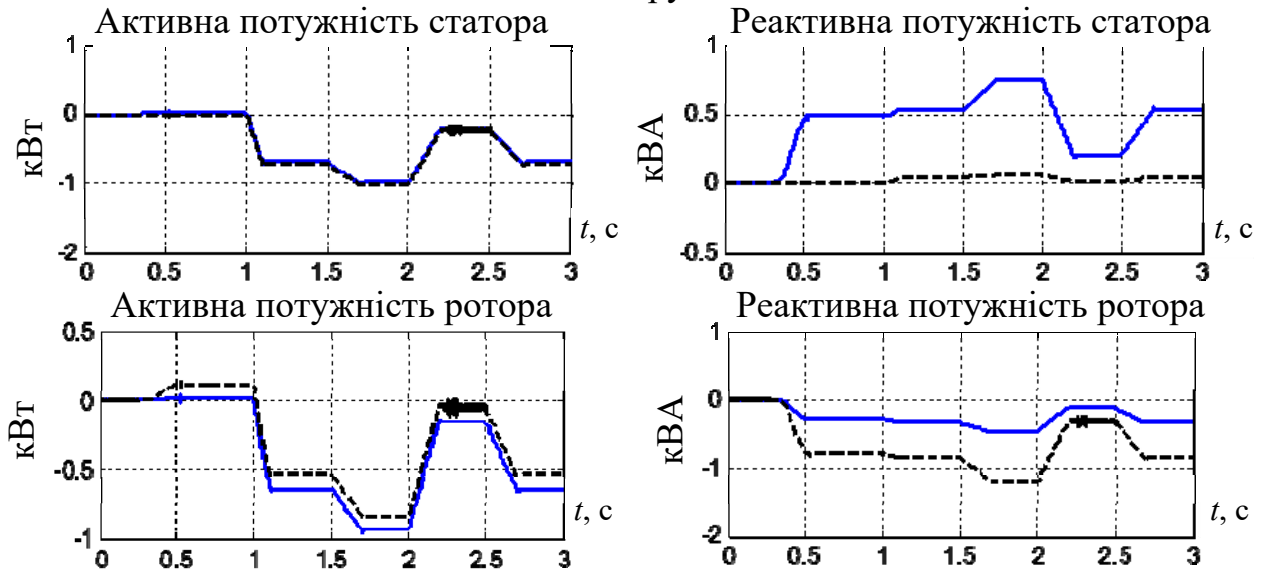


Рис. 5

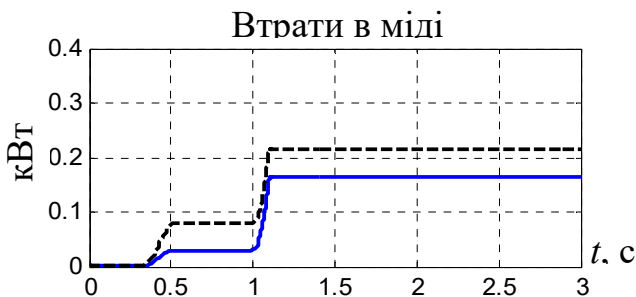


Рис. 6

Конфігурація повністю керованої МПЖ, що живиться від двох інверторів напруги в ланках статора і ротора, забезпечує додаткові ступені свободи; розподіл потужності між статором і ротором; широкий діапазон швидкостей з номінальним крутним моментом. Така конфігурація забезпечує стабільність як при нижче синхронній швидкості, так і при роботі на вище синхронній швидкості.

У третьому розділі представлено розробку методу керування вхідною реактивною потужністю як традиційних, так і двоступневих матричних перетворювачів (МП), які використовуються в ланці ротора МПЖ; аналіз процесів формування вхідних струмів МП в умовах несиметрії напруг мережі; розробку способів керування МП на загальній базі алгоритму регулювання вхідної реактивної потужності МП, які спрямовані на поліпшення якості вхідних струмів МП в умовах несиметричної і/або спотвореної системи напруг мережі.

Специфіка матричних перетворювачів, побудованих на керованих напівпровідникових приладах двосторонньої провідності, пов'язана з дискретним характером роботи ключів, що визначає дискретизацію як процесу споживання електроенергії перетворювачем від її первинного джерела, так і процесу передачі її навантаженню (ротору МПЖ). Такі дискретні процеси призводять до виникнення електромагнітних завад в електромережах і в оточуючому середовищі.

Проблеми формування синусоїдальних напруг по виходу і струмів по входу МП

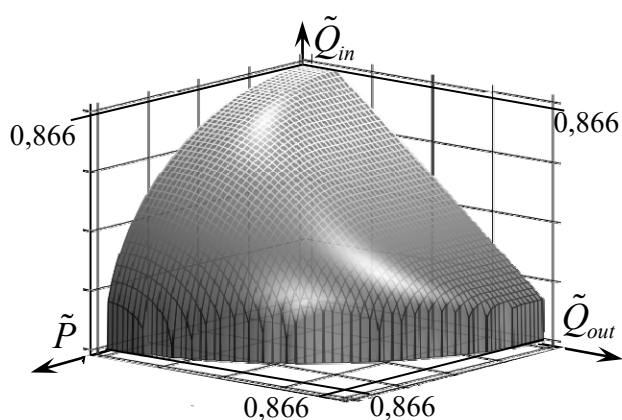


Рис. 7

Результат роботи алгоритму отримання максимальної вхідної реактивної потужності в залежності від співвідношення активної і реактивної складових потужності навантаження шляхом перебору параметрів представлено на рис. 7. Відносні потужності на

рис. 7 дорівнюють:  $\tilde{P} = q \cos \phi_{out} \frac{1}{2}$ ,  $\tilde{Q} = q \sin \phi_{out}$ ,  $\tilde{Q}_{in} = b$ , де  $q$  – коефіцієнт передачі напруги МП,  $b = q \operatorname{tg} \phi_{in} \cos \phi_{out}$  – коефіцієнт передачі перпендикулярної до вектора напруги мережі (тобто реактивної) складової вхідного струму,  $\phi_{in}$ ,  $\phi_{out}$  – зсуви фаз між векторами напруг і струмів.

На рис. 8 а показано криві миттєвих значень складових системи вихідної напруги  $u_0$ , яка сформована за рахунок складової нульової послідовності  $\bar{m}_0$  згідно з виразом

$$u_0 = \frac{1}{3}(u_a + u_b + u_c) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \bar{u}_{in} (\bar{m}_1 + \bar{m}_2 + \bar{m}_3)^* \right\} = \frac{3}{2} \operatorname{Re} \left\{ \bar{u}_{in} \bar{m}_0^* \right\},$$

і вихідних фазних напруг відносно нульової точки мережі живлення.

На рис. 8 б показано криву вхідного фазного струму, яку реалізовано за допомогою запропонованого алгоритму керування МП, до і після фільтрації. Струм має реактивну складову, тому крива струму зсунута відносно кривої вхідної фазної напруги.

Запропоновано підхід, що формалізує і значно спрощує процес формування матриці керуючих функцій МП шляхом безпосереднього завдання потрібного коефіцієнта передачі відносно реактивної складової вхідного струму МП і визначення

виникають, коли система напруг мережі несиметрична і/або спотворена.

Крім формування квазісинусоїдальних вхідних струмів перетворювача в умовах несиметрії напруг мережі дуже важливою проблемою є забезпечення нульових фазових зсувів між вхідними фазними напругами і струмами. Вирішення цієї проблеми дає змогу звести до нуля циркуляцію реактивних складових повної потужності в системі "мережа – перетворювач".

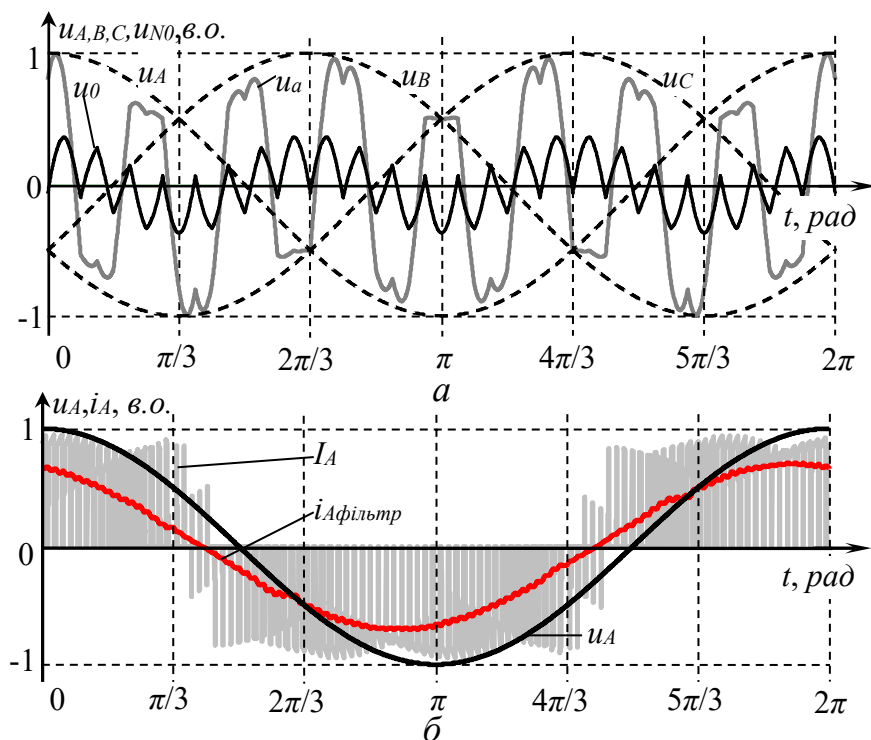


Рис. 8

користовується для формування реактивного струму на вході перетворювача, не зачіпаючи формування вихідної напруги.

Формування реактивного струму на вході МП можливе за допомогою векторів струму, що містять сектор, в якому розташовується необхідний вектор середнього на циклі ШІМ значення струму. На рис. 9 показано формування такого реактивного

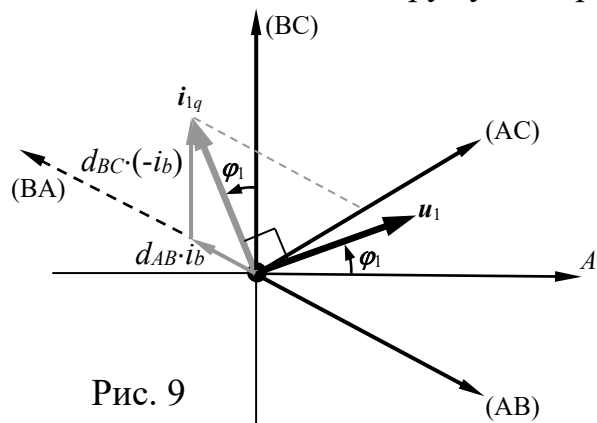


Рис. 9

струму  $i_{1q}$  за допомогою дискретних векторів (BA) і (BC). Це означає, що на другому напівциклі напруга формується з лінійних напруг мережі  $u_{AB}$  і  $u_{BC}$ .

Проведений аналіз підтверджує можливість передачі реактивної потужності матричним перетворювачем за рахунок варіювання наборів стаціонарних векторів при формуванні просторових векторів вхідного струму і вихідної напруги.

За умов несиметричної та/або спотвореної системи напруг мережі живлення формування симетричної неспотвореної системи вихідних напруг у традиційних алгоритмах керування МП супроводжується спотворенням системи вхідних струмів і появою складових на неосновній частоті, а також складових зворотних послідовностей.

Обов'язковою функцією будь-якого трифазно-трифазного перетворювача частоти є формування симетричної системи синусоїдальних вихідних напруг (струмів) із заданими частотою і амплітудою, або ж просторового вектора вихідної напруги (струму) із заданими модулем і фазою, а в кінцевому підсумку, – в забезпеченні необхідного для даного навантаження в даний момент часу споживання потужності. Відповідно до балансу потужностей миттєва активна потужність на вході і виході МП дорівнює

необхідної для реалізації цього коефіцієнта складової нульової послідовності керуючих функцій. В результаті алгоритм формування керуючих функцій МП для заданих коефіцієнтів зведено до простих математичних дій при обчисленні додаткових матриць.

Основний принцип запропонованого підходу до алгоритму передачі реактивної потужності МП зводиться до поділу, тобто декомпозиції, формування вихідної напруги і вхідного струму. З цією метою додатковий інтервал (напівцикл) ШІМ ви-



$$p_i = \frac{3}{2} \bar{u}_i \bullet \bar{i}_i = \frac{3}{4} (\bar{u}_i \bar{i}_i^* + \bar{u}_i^* \bar{i}_i) = p_o = \frac{3}{2} \bar{u}_o \bullet \bar{i}_o = \frac{3}{4} (\bar{u}_o \bar{i}_o^* + \bar{u}_o^* \bar{i}_o) = \frac{3}{2} \hat{U}_o \hat{I}_o \cos \phi_o, \quad (12)$$

де  $\bar{u}_i = \hat{U}_i(t) e^{j\theta_i(t)}$ ,  $\bar{u}_o = \hat{U}_o(t) e^{j\theta_o(t)}$ ,  $\bar{i}_i = \hat{I}_i(t) e^{j[\theta_i(t) - \phi_i(t)]}$ ,  $\bar{i}_o = \hat{I}_o(t) e^{j[\theta_o(t) - \phi_o(t)]}$  – просторові вектори вхідних і вихідних напруг і струмів, значок \* позначає комплексно сполучену величину.

На підставі (12) можна записати для вектора вхідного струму

$$\bar{i}_i = \frac{4}{3} \frac{p_o}{\bar{u}_i \bar{\gamma}^* + \bar{u}_i^* \bar{\gamma}} \bar{\gamma}, \quad (13)$$

де  $\bar{\gamma}$  – деякий опорний вектор, що збігається за напрямком з вектором вхідного струму, тобто  $\bar{\gamma} \bullet j\bar{i}_i = 0$ .

При незначних спотвореннях кривих напруги несиметричної системи може бути використана апроксимація, заснована на припущенні про лінеаризацію просторового вектора вхідної напруги МП комбінацією з двох векторів, перший з яких представлено системою симетричних складових, а другий – порівняно малим вектором спотворення. При такому припущенні вектори вхідних напруги та струму МП, а також опорний модуляційний вектор можуть бути записані як

$$\begin{cases} \bar{u}_i = \bar{U}_{ip} e^{j\omega t} + \Delta \bar{u}_i, \\ \bar{i}_i = \frac{2p_o}{3\bar{U}_{ip}^*} e^{j\omega t} + \Delta \bar{i}_i, \\ \bar{\gamma} = \bar{U}_{ip} e^{j\omega t} + \Delta \bar{\gamma}. \end{cases} \quad (14)$$

Підстановка цих векторів у (13) приводить до виразу

$$\bar{i}_i = \frac{2p_o}{3\bar{U}_{ip}^*} \left( e^{j\omega t} + \frac{\Delta \bar{\gamma} - \Delta \bar{u}_i}{\bar{U}_{ip}} - \frac{\Delta \bar{\gamma}^* + \Delta \bar{u}_i^*}{\bar{U}_{ip}^*} e^{j2\omega t} \right). \quad (15)$$

З виразу (15) можуть бути сформульовані наступні можливі стратегії модуляції:

$$\Delta \bar{\gamma} = \Delta \bar{u}_i; \quad (16)$$

$$\Delta \bar{\gamma} = -\Delta \bar{u}_i; \quad (17)$$

$$\Delta \bar{\gamma} = 0. \quad (18)$$

В останньому випадку вектор вхідного струму модулюється у фазі з прямою послідовністю основної складової вектора вхідної напруги  $\bar{U}_{ip}$ .

За допомогою викладеного аналітичного підходу на основі згаданої лінеаризації виконано узагальнений гармонічний аналіз вхідного струму МП для методів (16) – (18). З оцінки якості вхідного струму МП в умовах несиметрії і спотворень системи напруг мережі живлення при симетричному навантаженні може бути зроблено такі висновки:

- перша стратегія забезпечує мінімальне діюче значення трифазного вхідного струму;
- друга стратегія краща у випадку, коли очікується велике значення коефіцієнта несиметрії вхідних напруг і вона може повністю компенсувати гармоніки струму;
- третя стратегія приводить до зменшення коефіцієнта гармонік та може бути застосована за жорстких вимог до якості вхідного струму.

Кожна стратегія динамічної модуляції вхідного струму МП з метою наближення його форми до синусоїдальної або поліпшення його показників за окремими критері-

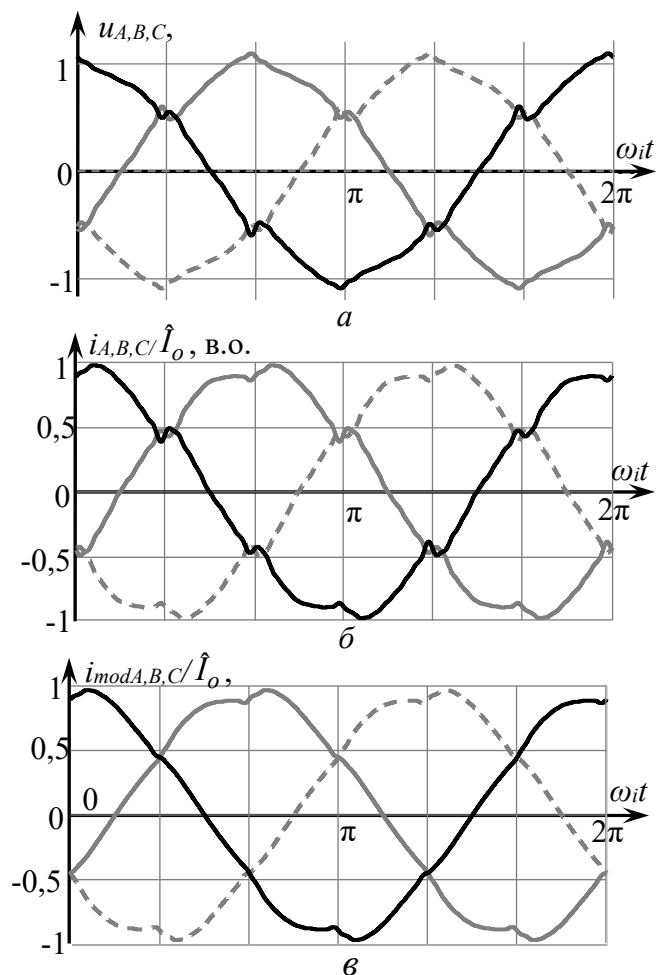


Рис. 10

діаграму гармонічного складу вхідного струму для «жорсткого» алгоритму та для алгоритму з динамічною модуляцією.

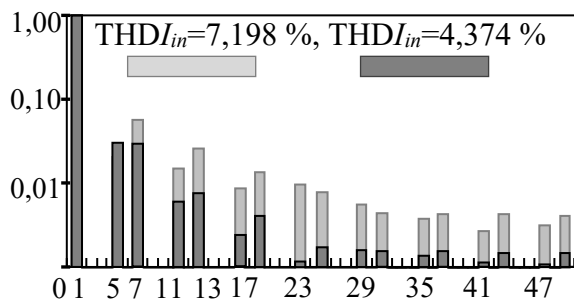


Рис. 11

їдальності напруг мережі, викликаних підключенням нелінійних навантажень до точки загального приєднання.

При несиметрії напруг мережі у статорі МПЖ виникають струми зворотної послідовності. Ці статорні струми викликають потікозчеплення зворотної послідовності статора, які обумовлюють пульсації моменту, активної і реактивної потужності.

В умовах незбалансованої мережі формування вектора вхідного струму МПЖ в колі ротора МПЖ може здійснюватися уздовж якого-небудь обраного напрямку. Цей напрямок може бути представлено опорним вектором  $\lambda$ , який називається модуляційним вектором.

При симетричному навантаженні і відкиданні високочастотних гармонічних складових, що виникають за рахунок комутацій, вихідна потужність  $p_0$  є сталою.

ями ґрунтується на припущенні, що амплітуда та фаза споживаних навантажень струмів відомі у будь-який момент часу, що використовується для зчитування інформації, тобто просторовий вектор вихідного струму МП є заданою вхідною величиною для системи керування перетворювачем та визначення параметрів керування. Інваріантною до навантаження перетворювача величиною є реактивна потужність, що споживається з мережі та регулюється у деякому діапазоні для кожної робочої точки. Робоча точка визначається співвідношенням активної і реактивної складових потужності навантаження. Отже, динамічна модуляція вхідного струму, що не позначається на навантаженні, можлива виключно шляхом модуляції його реактивної складової.

На рис. 10 *а* зображено криві напруг мережі живлення, *б* – криві спотвореного вхідного струму, *в* – криві вхідного струму з динамічною модуляцією. На рис. 11 в логарифмічному масштабі показано порівняльну діаграму гармонічного складу вхідного струму для «жорсткого» алгоритму та для алгоритму з динамічною модуляцією. Для кривих, зображених на рис. 10 *б* та *в*, розраховано сумарний коефіцієнт гармонік струму THDi.

Продемонстровано підвищення якості вхідного струму МПЖ за допомогою наведених в розділі підходів в умовах спотворення напруг мережі живлення на прикладі реального промислового об'єкту.

**В четвертому розділі** розроблено алгоритми керування МПЖ при несиметрії та несинусо-

Просторовий вектор вхідного струму дорівнює

$$\mathbf{i}_i = \frac{4}{3} \frac{p_o}{\mathbf{u}_{i\phi} \boldsymbol{\lambda}^* + \mathbf{u}_{i\phi}^* \boldsymbol{\lambda}} \boldsymbol{\lambda}. \quad (19)$$

Рівняння (19) є основним виразом, що встановлює залежність просторового вектора вхідного струму від трьох величин: вихідної потужності, просторового вектора вхідної напруги і модуляційного вектора.

Запропоновано стратегію модуляції засновану на забезпеченні нульового фазового зсуву між просторовими векторами вхідних напруги  $\mathbf{u}_{i\phi}$  і струму  $\mathbf{i}_i$  (стратегія I).

Мається на увазі, що

$$\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{u}_{i\phi}. \quad (20)$$

Просторові вектори  $\mathbf{u}_+ = U_+ e^{j\omega_1 t}$  і  $\mathbf{u}_- = U_- e^{-j\omega_1 t}$  обертаються з кутовою частотою  $\omega_1$  проти годинникової і за годинниковою стрілкою відповідно. Співвідношення між розглянутими просторовими векторами на площині ілюструє рис. 12.

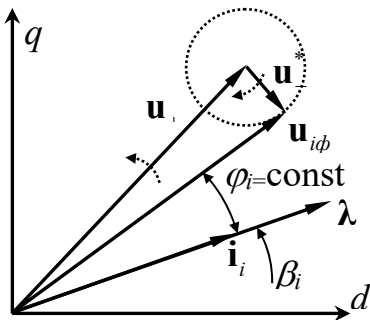


Рис. 12

Відповідно до прийнятого алгоритму зсув фаз  $\varphi_i$  між вхідними струмом і напругою підтримується постійним, а в конкретному випадку (20) –  $\varphi_i = \text{const} = 0$ .

Запропонована стратегія модуляції виключає циркуляцію реактивних складових повної вхідної потужності, але вхідний струм містить цілу низку гармонічних складових в залежності від ступеня несиметрії напруг мережі.

Стратегія динамічної модуляції фазового зсуву між вхідними струмом та напругою (стратегія II) ставить своєю метою зменшення вмісту гармонік у вхідному струмі в порівнянні з попереднім випадком.

Зменшення вмісту вищих гармонік можливе при визначенні модуляційного вектора  $\boldsymbol{\lambda}$  таким чином:

$$\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{u}_+ - \mathbf{u}_- = U_+ e^{j\omega_1 t} - U_- e^{-j\omega_1 t}. \quad (21)$$

Для такої стратегії модуляції вхідного струму співвідношення між розглянутими просторовими векторами показано на рис. 13. З нього видно, що напрямок модуляційного вектора  $\boldsymbol{\lambda}$  стосовно  $\mathbf{u}_{i\phi}$  не є постійним, тобто здійснюється динамічна модуляція величини зсуву просторового вектора вхідного струму щодо просторового вектора напруги мережі.

У цьому випадку в спектрі вхідного струму містяться тільки пряма і зворотна послідовності основної гармоніки, що забезпечує несиметричні, але синусоїдальні лінійні струми.

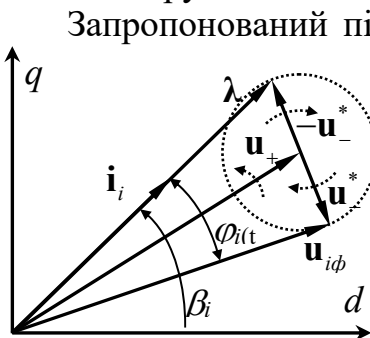


Рис. 13

Запропонований підхід до керування перетворювачем, заснований на динамічній модуляції величини фазового зсуву між просторовими векторами вхідних напруги і струму, забезпечує синусоїдальність вхідних струмів, сталість суми миттєвих активних потужностей на вході МП, але при цьому виникають фазові зсуви між вхідними напругами та відповідними струмами та, як наслідок, виникає циркуляція реактивної потужності в системі "мережа – перетворювач".

На основі розробленої математичної моделі системи гене-

рування електроенергії з МПЖ виконано математичне моделювання роботи МПЖ з алгоритмами компенсації гармонік і реактивної потужності за умови підключення до ТЗП діодного випрямляча та тиристорного перетворювача. При цьому роторний інвертор в роторній ланці МПЖ забезпечує генерування максимальної вихідної активної потужності і мінімізацію гармонічних складових у струмі статора, а мережевий інвертор – плавне регулювання напруги в ланці постійного струму і споживання синусоїдального вхідного струму.

Основний алгоритм керування МПЖ спрямований на отримання максимальної потужності при змінних швидкостях вітру. Схема керування швидкістю містить в собі внутрішній швидкий контур, який керує струмом ротора, а також зовнішній повільний контур, що забезпечує завдання для керування струмом за віссю  $q$ . Подібна структура використовується для регулювання реактивної потужності.

На виході регулятора швидкості заданий момент перетворюється на сигнал струму:

$$i_{2q}^* = \frac{2M_e}{3p_n\psi_1}. \quad (22)$$

Заданий струм за віссю  $d$  задається регулятором реактивної потужності. Реактивна потужність може бути виражена в системі координат  $(d-q)$  так

$$q_1 = 3\omega_1\psi_1 i_{1d} = 3\omega_1\psi_1 \left( \frac{\psi_1}{L_M} - i_{2d} \right), \quad (23)$$

де  $L_M$  – індуктивність намагнічування.

З (23) отримаємо

$$i_{2d}^* = \frac{\psi_1}{L_M} - \frac{q_1}{\omega_1}. \quad (24)$$

Мережевий інвертор підтримує задану напругу в ланці постійного струму. Подібно роторному інвертору, для мережевого інвертора використовуються два контури із зовнішнім контуром для керування напругою і внутрішнім контуром для керування струмом. Контур керування струмом реалізується в системі координат  $(d-q)$ , синхронізований з напругою мережі.

Величина завдання реактивної потужності для її компенсації в точці загального підключення (ТЗП) розраховується із застосуванням миттєвих значень напруг та струмів, що вимірюються в реальному часі. Миттєва реактивна потужність розраховується як векторний добуток векторів напруги та струму

$$\vec{q} = \begin{Bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{Bmatrix} = \vec{u} \times \vec{i} = \begin{Bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_b i_c - u_c i_b \\ u_c i_a - u_a i_c \\ u_a i_b - u_b i_a \end{Bmatrix},$$

де  $u_{a,b,c}, i_{a,b,c}$  - миттєві фазні напруги та струми. У трифазній трипровідній мережі вираження миттєвої реактивної потужності раціонально записати так:

$$q_{NLL} = -q = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_a u_{ab} + i_b u_{cb} + i_c u_{ab}). \quad (25)$$

Побудовано алгоритм керування МПЖ, який забезпечує селективну компенсацію гармонік струму мережі у разі підключення нелінійного навантаження до ТЗП.

У цьому випадку задані струми ротора  $i_{2d}^*$  і  $i_{2q}^*$  складаються з суми двох частин:  $i_{2d1}^*$ ,

$i_{2q1}$  – складові на основній частоті ( $h = 1$ ), які формуються вищезгаданими ПІ-регуляторами;  $i_{2dh}$ ,  $i_{2qh}$  – містять гармонічні компоненти ( $h \neq 1$ )

$$\begin{aligned} i_{2d}^* &= i_{2d1} + i_{2dh}, \\ i_{2q}^* &= i_{2q1} + i_{2qh}. \end{aligned} \quad (26)$$

Активна фільтрація за допомогою роторного інвертора МПЖ означає, що в статорі формуються трифазні гармонічні струми. Вони рівні за величиною і знаходяться в протилежній фазі відносно гармонічних струмів нелінійного навантаження:

$$\begin{aligned} i_{2dh} &= -i_{dh}, \\ i_{2qh} &= -i_{qh}. \end{aligned} \quad (27)$$

Для оцінки гармонічних складових відносно струмів використано спостерігач вищих гармонік, який забезпечує асимптотичне оцінювання всіх  $N$  гармонік або будь-яку задану їх кількість з властивостями селективності.

Функціональну блок-схема запропонованої системи керування МПЖ представлено на рис. 14.

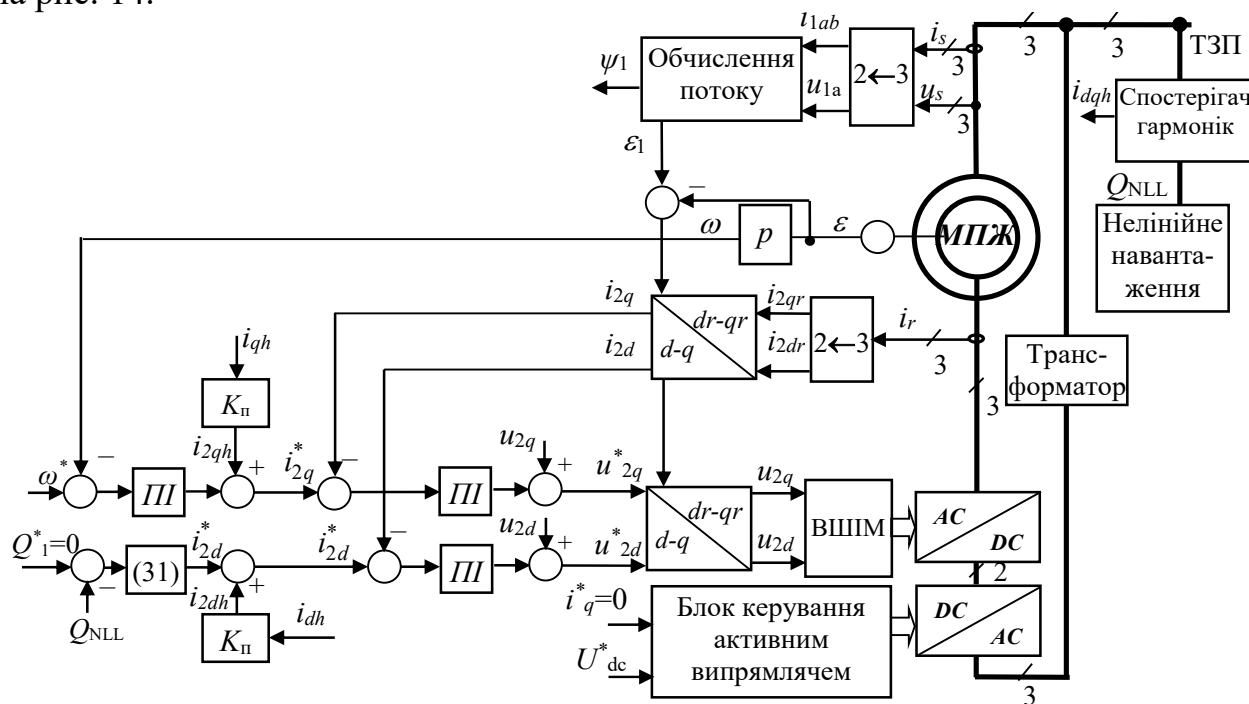


Рис. 14

У пакеті прикладних програм Matlab\Simulink з підключеним середовищем Plescs побудовано математичну модель системи генерування електроенергії на основі МПЖ. Під час моделювання було використано МПЖ із такими параметрами: потужність  $P=2$  МВт, число пар полюсів  $p_n=2$ ,  $J=75$  кгм<sup>2</sup>,  $L_1=0,00012$  Гн,  $L_2=0,00005$  Гн,  $L_m=0,0029$  Гн,  $R_1=0,022$  Ом,  $R_2=0,0018$  Ом. Статор МПЖ підключається безпосередньо до мережі 690В, а роторний перетворювач живиться напругою 480 В через трансформатор. У точці загального приєднання до мережі також підключаються почергово діодний випрямляч і тиристорний перетворювач, які складають нелінійне навантаження на рис. 14.

На рис. 15 показано результат відпрацювання алгоритму активної фільтрації у випадку підключення діодного випрямляча до ТЗП. На рис. 15 а, б показано криві струму і напруги фази А МПЖ й мережі до та після початку компенсації гармонік в момент часу

$t=2$  с. Гармонічний склад струму мережі до і після початку компенсації гармонік показано на рис. 15 *в* і *г* відповідно.

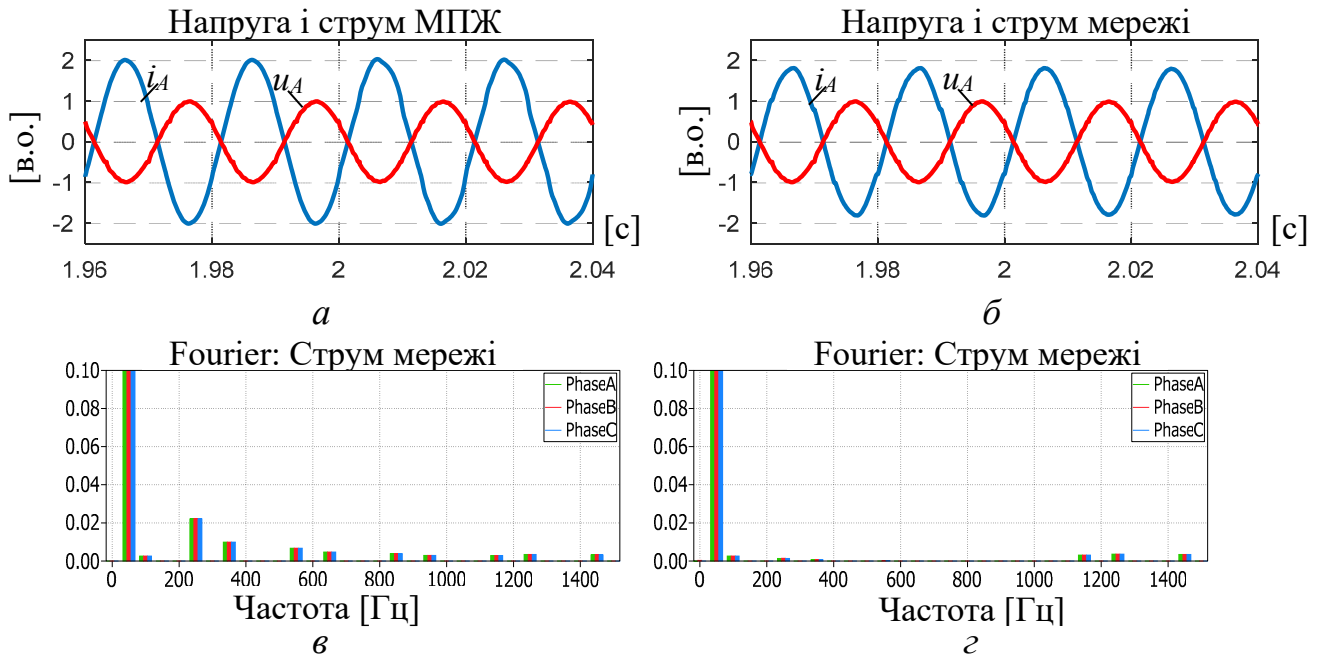


Рис. 15

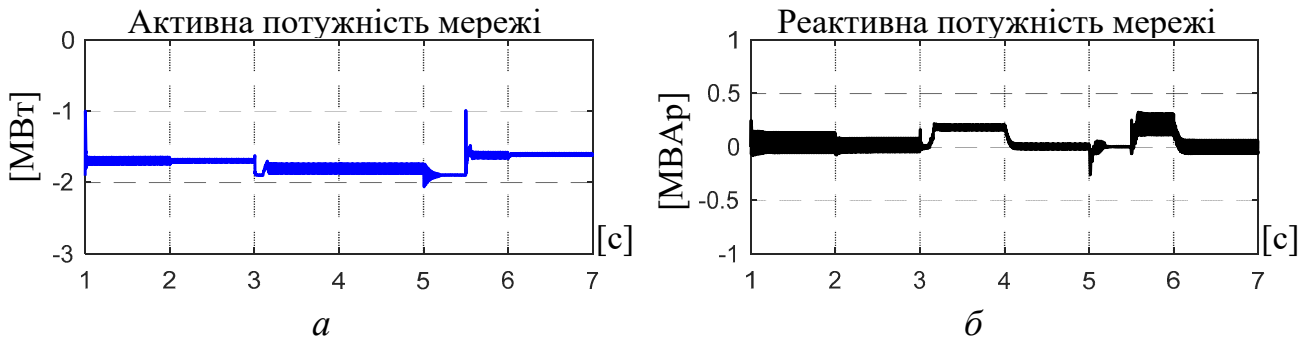


Рис. 16

На рис. 16 показано результат відпрацювання алгоритму компенсації реактивної потужності за умови підключення тиристорного перетворювача до ТЗП. Активна й реактивна потужності мережі на всьому інтервалі часу представлено на рис. 16 *а* і *б* відповідно.

Результати моделювання показали ефективність запропонованої системи для компенсації як реактивної потужності, так і спотворення струму, що підтверджується вибірковою фільтрацією п'ятої, сьомої, одинадцятої, тринадцятої, сімнадцятої та дев'ятнадцятої (найбільш домінуючих) гармонік.

У п'ятому розділі розглянуто стратегії розрахунків струмів компенсації мережевого перетворювача в колі ротора МПЖ із різною топологією для мінімізації небажаних складових потужності (рис. 17). Також досліджено роботу мережевого перетворювача в ланці ротора

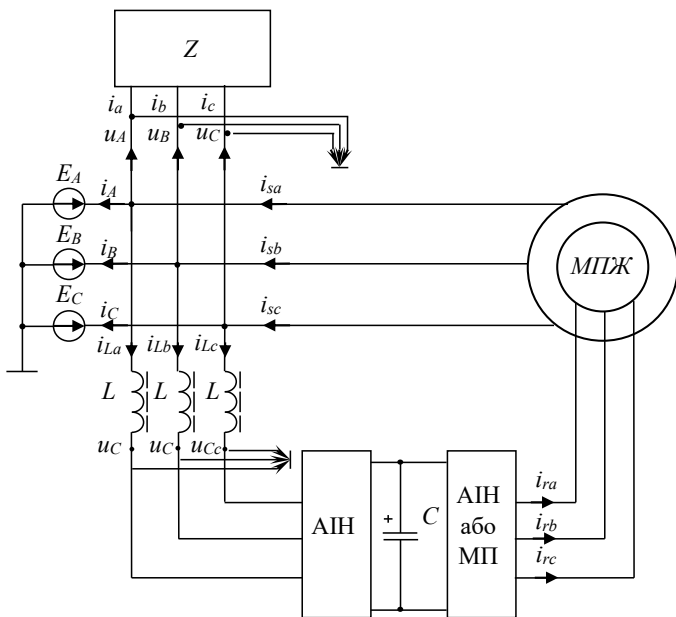


Рис. 17

МПЖ із властивостями активних фільтрів та способів керування ними із застосуванням просторово-векторних підходів, що забезпечить поліпшення якісних показників генерованої електроенергії.

Із застосуванням  $p$ - $q$ - $r$  теорії миттєвої потужності та з врахуванням топологічних відмінностей між трифазними трипровідними і чотирипровідними системами (з накопичувачем енергії або без нього) розроблено стратегію розрахунку компенсаційних струмів мережевого перетворювача в колі ротора МПЖ. Розрахунок компенсаційних струмів мережевого перетворювача повинен здійснюватися відповідно до можливостей його силової схеми, але доцільним є застосування топологій, які здійснюють фільтрацію всіх небажаних складових миттєвої потужності.

Розрахунок струму, який може компенсувати небажані складові потужності, здійснюється шляхом зворотного  $p$ - $q$ - $r$  перетворення складових потужності, взятих із від'ємним знаком. У загальному випадку струми компенсації в системі координат  $p$ - $q$ - $r$  розраховуються так:

$$\begin{bmatrix} i_{Cp} \\ i_{Cq} \\ i_{Cr} \end{bmatrix} = \frac{1}{u_p} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot (-\hat{\mathbf{p}}) = \frac{1}{u_p} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta p - \tilde{p} \\ -\bar{q} - \tilde{q} \\ -\bar{r} - \tilde{r} \end{bmatrix}, \quad (28)$$

де  $\Delta p$  – деяка частина активної потужності, яку може споживати чи віддавати мережевий перетворювач. Вона використовується буферним джерелом (ємнісний накопичувач) для врахування активних втрат. Крім того, цей параметр використовується як регульована змінна, що впливає на рівень напруг буферного джерела;  $\tilde{p} = p - P_{cp}$ , де

$P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$  – середнє значення активної потужності на періоді частоти мережі,

$p = u_A \cdot i_a + u_B \cdot i_b + u_C \cdot i_c$ . Після цього здійснюється подальше зворотне перетворення для отримання струмів компенсації в системі координат  $\alpha\beta\theta$ . За допомогою зворотного перетворення Кларк отримуємо необхідні фазні струми компенсації  $i_{Ca}$ ,  $i_{Cb}$ ,  $i_{Cc}$ .

Трифазне чотирипровідне навантаження створює умови для появи більшості небажаних складових, усунення яких вимагає застосування топології мережевого перетворювача із примусовим формуванням струмів у нульовому проводі. Компенсацію складової  $\bar{r}$  можливо здійснити без використання накопичувача енергії, у той час як компенсація складової  $\tilde{r}$  можлива лише за наявності такого накопичувача. У разі відсутності буферного накопичувача компенсація струму нульової послідовності відбуватиметься завдяки формуванню несинусоїдального струму мережі так, щоб утримувався баланс миттєвої активної потужності, споживаної з мережі:

$$\hat{\mathbf{p}} = \begin{bmatrix} 0 \\ -q \\ -r \end{bmatrix}, \text{ звідки } \begin{bmatrix} i_{Ca} \\ i_{Cb} \\ i_{Cc} \end{bmatrix} = \frac{p}{u_A^2 + u_B^2 + u_C^2} \cdot \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (29)$$

Так, для ситуації, коли необхідно компенсувати всі небажані складові потужності з використанням топології мережевого перетворювача, який має потенціальний зв'язок із нульовим проводом у чотирипровідній трифазній системі, алгоритм розрахунку струмів компенсатора загалом можливо спростити до більш компактного вигляду з використанням тільки необхідних миттєвих значень фазних напруг та струмів:

$$\hat{\mathbf{p}} = \begin{bmatrix} \Delta p - \tilde{p} \\ -\bar{q} - \tilde{q} \\ -\bar{r} - \tilde{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{cp} - p + \Delta p \\ -q \\ -r \end{bmatrix}, \text{ звідки } \begin{bmatrix} i_{Ca} \\ i_{Cb} \\ i_{Cc} \end{bmatrix} = \frac{P_{cp} + \Delta p}{u_A^2 + u_B^2 + u_C^2} \cdot \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (30)$$

Розроблено стратегію керування для мінімізації потужності втрат в трифазній чотирипровідній мережі при формуванні за допомогою мережевого інвертора (МІ) з функціями активного фільтра струмів джерела пропорційними вектору фазної напруги з частковим послабленням складової нульової послідовності.

Миттєве значення потужності втрат в силовому кабелі

$$p_r = \frac{p^2 r [v_{\alpha\beta}^2 + (1 - \sigma)^2 v_0^2 \sigma_r^{-1}]}{[v_{\alpha\beta}^2 + (1 - \sigma)v_0^2]}, \quad (31)$$

де

$$\sigma_r = r / (3r_n + r) - \quad (32)$$

параметр, що характеризує співвідношення між активними опорами фазних проводів та проводі нейтралі.

Дослідження виразу (31) на екстремум за  $\sigma$  дає оптимальне значення коефіцієнта послаблення складової нульової послідовності за критерієм мінімізації миттєвої потужності втрат в силовому кабелі:

$$\sigma_0 = 1 - \sigma_r = 1 - r / (3r_n + r) = 3r_n / (3r_n + r) = r_n / (r_n + r/3). \quad (33)$$

При цьому значенні коефіцієнта послаблення миттєва потужність втрат набуває мінімального значення

$$p_{rMIN} = \frac{p^2 r (v_{\alpha\beta}^2 + (1 - \sigma_0)^2 v_0^2 \sigma_r^{-1})}{[v_{\alpha\beta}^2 + (1 - \sigma_0)v_0^2]^2} = \frac{p^2 r}{v_{\alpha\beta}^2 + \sigma_r v_0^2}. \quad (34)$$

Аналіз виразу (33) показав, що оптимальне значення коефіцієнта послаблення  $\sigma_0$  визначається лише співвідношенням питомих активних опорів фазних проводів та нейтралі, тобто для кожної марки чотирипровідного силового кабелю трифазної мережі існує своє оптимальне значення  $\sigma_0 = 1 - \sigma_r$ , що забезпечує мінімальну миттєву потужність втрат. Крім того, при будь-яких співвідношеннях між  $r$  та  $r_n$   $0 < \sigma_0 < 1$ , тобто стратегія керування при частковому послабленні складової нульової послідовності дає переваги за потужністю миттєвих втрат у порівнянні зі стратегіями керування як при повному збереженні складової нульової послідовності ( $\sigma = 0$ ), так і при повному її видаленні ( $\sigma = 1$ ).

При мінімізації середнього значення потужності втрат вектор миттєвих значень струмів трифазного джерела визначається виразом

$$\mathbf{i}_d = G \mathbf{v}_\sigma, \quad (35)$$

де значення коефіцієнта  $G$  знаходиться з умови рівності нулю середньої активної потужності активного фільтра

$$\frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{v}^T \mathbf{i}_\phi dt = 0, \quad (36)$$

де  $T$  – період напруги мережі живлення.

Провівши аналогічні викладки з урахуванням вимоги (36), в кінцевому підсумку отримаємо:



$$G = \frac{P}{V_{\alpha\beta}^2 + (1 - \sigma)V_0^2}, \quad (37)$$

де  $P = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{v}^T \mathbf{i}_H dt$  – середня потужність навантаження;  $V_{\alpha\beta}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T v_{\alpha\beta}^2 dt$ ;  
 $V_0^2 = \frac{1}{T} \int_0^T v_0^2 dt = \frac{1}{3T} \int_0^T v_+^2 dt$ .

Структурну схему МІ з функціями активного фільтра з системою керування, що реалізовує запропоновану стратегію, наведено на рис. 18.



Рис. 18

Силовая частина МІ приєднана паралельно нелінійному навантаженню безпосередньо в точках його підключення до мережі живлення через чотирипровідний кабель. Система керування за допомогою датчиків струму та напруги в блоках відповідних вимірювачів формує сигнали узагальнених векторів миттєвих значень напруги та струму навантаження. На виході блоку формування опорної напруги відповідно до заданого значення коефіцієнта  $\sigma$  формується вектор фазної напруги з частковим послабленням складової нульової послідовності і подається на один із входів формувача скалярного коефіцієнта пропорційності  $g$  або  $G$ , значення яких розраховуються за формулами  $g = \frac{P}{v_{\alpha\beta}^2 + (1 - \sigma)v_0^2}$  або (37) та виключають споживання миттєвої або інтегральної активної потужності паралельним активним фільтром, в залежності від обраного режиму компенсації (миттєвий/інтегральний).

У шостому розділі наведено результати експериментальних досліджень комплексу генерування електроенергії з функціями компенсації реактивної потужності та активної фільтрації на базі МПЖ.

Для підтвердження результатів, отриманих аналітично і шляхом моделювання, про-

ведено експериментальні дослідження комплексу генерування електроенергії на основі МПЖ з використанням асинхронної машини з фазним ротором з такими номінальними параметрами: потужність 7,5 кВт; струм 17,5 А; напруга 380 В; швидкість 1460 об/хв; опір статора  $R_1 = 0,45$  Ом; опір ротора  $R_2 = 0,2$  Ом; індуктивність статора  $L_1 = 0,161$  Гн; індуктивність ротора  $L_2 = 0,095$  Гн; взаємна індуктивність  $L_m = 0,088$  Гн; число пар полюсів  $p = 2$ ; момент інерції  $J = 0,09$  кг·м<sup>2</sup>.

Тестування алгоритмів керування проводилося з використанням зображеного на рис. 19 експериментального стенда, що містить:

1. Асинхронний двигун з фазним ротором потужністю 7,5 кВт, який живиться від експериментального зразка матричного перетворювача з частотою комутації 12,5 кГц.

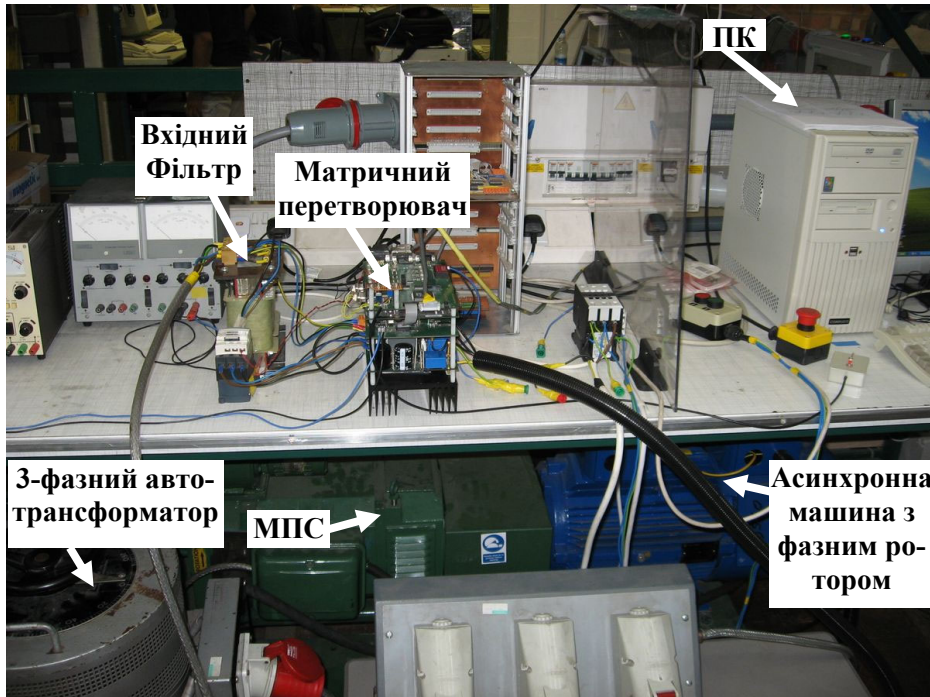


Рис. 19

2. Машину постійного струму, що може працювати як у режимі регулювання моменту, так і регулювання швидкості, та використовується для стабілізації швидкості обертання ротора МПЖ при роботі її в режимі генератора.

3. Контролер реального часу на базі цифрового сигнального процесора (TMS320C6711), підключеного до шини персонального комп'ютера.

4. Для вимірювання

аналогових сигналів застосовано датчі струму і напруги LEM.

5. Для вимірювання швидкості і кутового положення використовується фотоімпульсний датчик швидкості з розподільною здатністю 2500 імпульсів/об.

6. Персональний комп'ютер (ПК) для програмування і реалізації функцій автоматизації, віртуального осцилографа і інтерфейсу оператора.

Силову схему матричного перетворювача розроблено на базі модуля EUPEC FM35R12KE3. Для формування вхідного синусоїдального струму МП використано відповідний вхідний LC-фільтр, що містить у собі три ємності по 2 мкФ і три дроселі по 1 мГн.

Керування МП здійснювалося з використанням цифрового сигнального процесора (DSP) TMS320C6711 і програмованої логічної матриці (Actel ProASIC A500K050).

Осцилограми вхідних струмів статора МПЖ і вхідних струмів МП та їх спектри представлено на рис. 20 і 21.

На рис. 22 представлено перехідні процеси під час регулювання реактивної потужності МПЖ (відпрацювання заданої траєкторії для реактивної складової струму статора) із заданою величиною моменту.

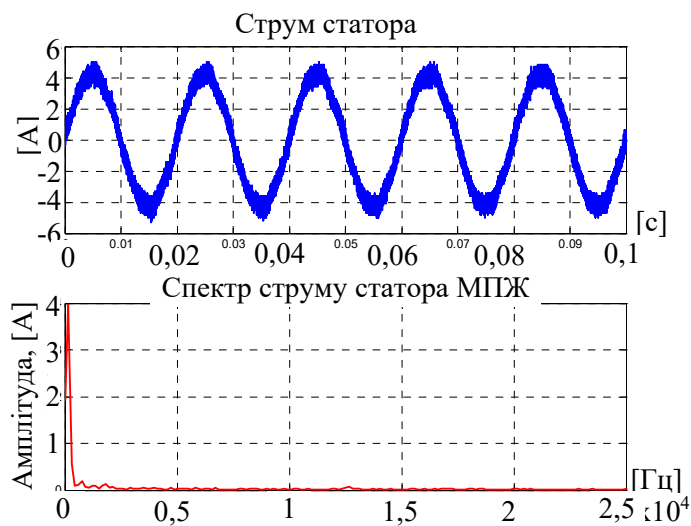


Рис. 20

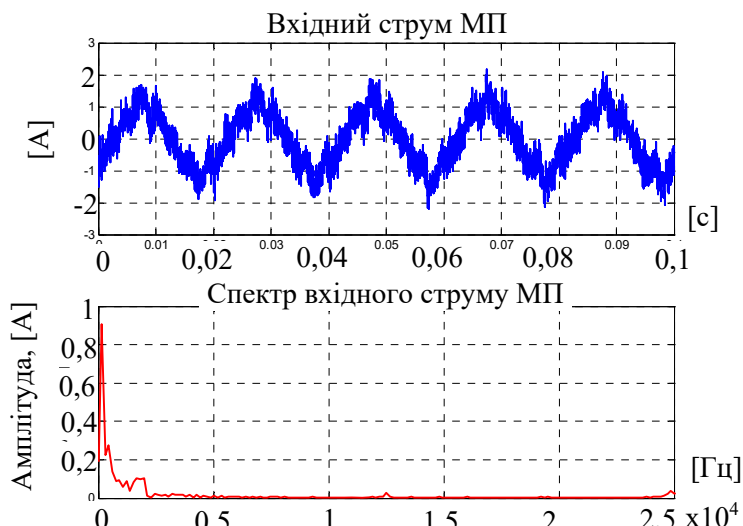


Рис. 21

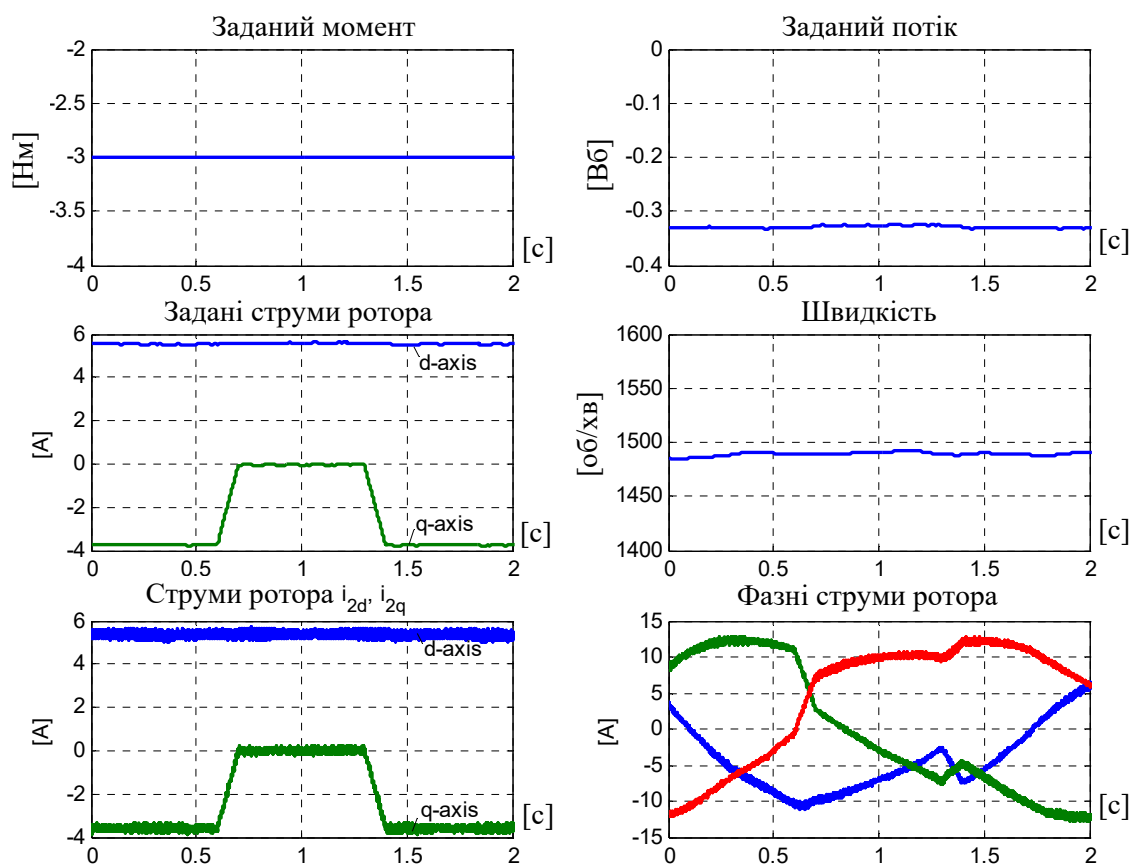


Рис. 22

Створені програмні алгоритми у рамках мікропроцесорних систем на базі контролерів як з фіксованою, так і з плаваючою комами, для організації керування машиною подвійного живлення є придатними для вискоєфективного застосування в електромеханічних комплексах генерування електроенергії.

Застосування ПЛМ в системах керування машиною подвійного живлення дозволило значно зменшити час оптимізації схем керування за рахунок можливості багатократного перепрограмування без внесення змін до електричної принципової схеми.

**У додатках** наведено перелік публікацій автора за темою дисертації, акти впровадження та використання результатів роботи.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-прикладну проблему підвищення якості генерованої електроенергії засобами керування машиною подвійного живлення в складі комплексу генерування. Отримані результати в сукупності є науковою основою для побудови комплексів генерування електроенергії з функціями компенсації реактивної потужності та активної фільтрації.

При цьому отримано такі основні наукові та практичні результати.

1. На основі аналізу існуючих методів підвищення якості електроенергії в системах генерування електроенергії на основі машини подвійного живлення обґрунтовано доцільність розвитку теорії керування машиною подвійного живлення шляхом створення нових методів компенсації реактивної потужності та активної фільтрації.

2. Розроблено нову стратегію зниження несиметрії та несинусоїдальності струмів в системі генерування електроенергії на основі машини подвійного живлення в умовах підключення нелінійних навантажень. Запропоновані технічні рішення дали змогу за рахунок поєднання функцій компенсації реактивної потужності та активної фільтрації суттєво підвищити якість електроенергії в системах розосередженої генерації.

3. Побудовано математичну модель системи генерування електроенергії з МПЖ, на основі якої виконано математичне моделювання відпрацювання траєкторії заданого моменту МПЖ за умови її збудження по колу ротора при орієнтації системи координат вздовж вектора головного магнітного потоку та за умови ортогональності вектора струму статора і вектора згаданого магнітного потоку. Розвинуто метод керування комплексом генерування електроенергії на базі МПЖ, який полягає в застосуванні об'єднаної ланки постійного струму перетворювачів в статорі і роторі та дозволяє забезпечити адаптивність до спотворень мережі і підвищити якість генерованої електроенергії.

4. Досліджено два алгоритми векторного керування моментом МПЖ: ортогональне керування, при якому підтримується сталість головного магнітного потоку і ортогональність векторів струму статора й магнітного потоку та керування з мінімізацією втрат в міді, що безпосередньо залежать від струму, який протікає по обмотках і, в свою чергу, залежить від навантаження на валу, та втрат в сталі, які визначаються магнітними властивостями матеріалів, що використовуються, величиною магнітного потоку і частотою обертання електромагнітного поля статора і ротора.

5. Запропоновано підхід, що формалізує і значно спрощує процес формування матриці керуючих функцій МП шляхом безпосереднього завдання потрібного коефіцієнта передачі відносно реактивної складової вхідного струму МП і визначення необхідної для реалізації цього коефіцієнта складової нульової послідовності керуючих функцій. В результаті алгоритм формування керуючих функцій МП для заданих коефіцієнтів зведено до простих математичних дій при обчисленні додаткових матриць.

6. Підтверджено можливість передачі реактивної потужності матричним перетворювачем за рахунок варіювання наборів стаціонарних векторів при формуванні просторових векторів вхідного струму і вихідної напруги. Продемонстровано підвищення якості вхідного струму МП за допомогою наведених підходів в умовах спотворення напруг мережі живлення на прикладі реального промислового об'єкту.

7. Дослідження запропонованих підходів до компенсації впливу несиметрії напруг мережі на роботу МПЖ з МП в колі ротора дозволяє зробити висновок про те, що окремими алгоритмами керування досягаються різні цілі керування, а саме: отримання

синусоїдальних та симетричних струмів статора; виключення пульсацій реактивної потужності статора; виключення пульсацій активної потужності статора; мінімізація пульсацій електромагнітного моменту. При цьому зазначені алгоритми поліпшують сумісність системи генерування на основі МПЖ і мережі.

8. На основі розробленої математичної моделі системи генерування електроенергії з МПЖ виконано математичне моделювання роботи МПЖ з комбінованим методом компенсації гармонік і реактивної потужності за умови підключення до ТЗП діодного випрямляча та тиристорного перетворювача. При цьому інвертор в роторній ланці МПЖ забезпечує генерування максимальної вихідної активної потужності і мінімізацію гармонічних складових у струмі статора, а активний випрямляч – плавне регулювання напруги в ланці постійного струму і споживання синусоїдального вхідного струму.

9. Із застосуванням  $p-q-r$  теорії миттєвої потужності та з врахуванням топологічних відмінностей між трифазними трипровідними і чотирипровідними системами (з накопичувачем енергії або без нього) розроблено стратегію розрахунку компенсаційних струмів мережевого перетворювача в колі ротора МПЖ. Розрахунок компенсаційних струмів мережевого перетворювача повинен здійснюватись відповідно до можливостей його силової схеми, але доцільним є застосування топологій, які здійснюють фільтрацію всіх небажаних складових миттєвої потужності.

10. Запропонований алгоритм векторного керування струмами компенсації дозволяє регулювати довжину елементарних переміщень кінця вектора струму на циклі ШІМ і, тим самим, здійснювати регулювання амплітуди пульсацій струму при переході від одного циклу ШІМ до іншого. Ця можливість значно поліпшує якісні показники мережевого перетворювача, який має властивості активного фільтра, для широкого діапазону регулювання струму. Регулюючи довжину елементарних переміщень при переході від одного циклу ШІМ до іншого, мережевий перетворювач мінімізує абсолютне значення пульсацій струму мережі у всьому динамічному діапазоні регулювання.

11. Дослідження алгоритмів керування машиною подвійного живлення показало, що при застосуванні двоступеневих МП в колі ротора МПЖ гарантується відпрацювання моменту за умови стабілізації коефіцієнта потужності статора МПЖ на рівні одиниці. Таке рішення придатне для практичного застосування у системах генерування електроенергії на основі МПЖ. Топологія двоступеневих МП дозволяє модифікувати їх з метою зменшення кількості силових транзисторів, в той час як в традиційних МП варіанти побудови силової структури жорстко лімітовані; дозволяє спростити комутацію двонапрямних ключів, приєднаних безпосередньо до мережі, оскільки є можливість комутувати силові ключі при нульовому струмі.

12. Запропоновано стратегію керування мережевим інвертором з функціями активної фільтрації в чотирипровідній трифазній мережі, при застосуванні якої вектор миттєвих струмів трифазного джерела пропорційний вектору миттєвих фазних напруг з частковим послабленням складової нульової послідовності. При оптимальному значенні коефіцієнта послаблення складової нульової послідовності та значній несиметрії фазних напруг ця стратегія дає переваги за потужністю втрат у силовому кабелі до 2 разів порівняно зі стратегією керування при повному збереженні складової нульової послідовності, та до 8% – у порівнянні зі стратегією керування при повному видаленні складової нульової послідовності. Оптимальне значення коефіцієнта послаблення складової нульової послідовності вектора фазних напруг визначається лише співвідношенням пито-

мих активних опорів фазних проводів та нейтралі. Результати комп'ютерного експерименту підтверджують адекватність запропонованих співвідношень модифікованої теорії миттєвої потужності та ілюструють можливість зменшення до 23% потужності миттєвих втрат та до 15% – інтегральних втрат в лінії передачі при застосуванні запропонованої стратегії формування вектора миттєвих струмів джерела пропорційним вектору фазних напруг з оптимально послабленою складовою нульової послідовності.

13. Результати роботи використано в Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" та Інституті електродинаміки НАН України при виконанні другого етапу НДР "Комплексні системи енергозабезпечення автономних об'єктів на базі використання відновлюваних джерел енергії" (ДР 0117U004325) та НДР "Розробка та дослідження ефективних засобів і методів керування напівпровідниковими перетворювачами та електромеханічними системами для забезпечення електромагнітної сумісності джерел електроенергії та споживачів", "Модулятор-2" (№ ДР 0115U002581).

Отримані результати впроваджено у навчальному процесі кафедри відновлюваних джерел енергії Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", а також в Інституті відновлюваної енергетики НАН України при здійсненні освітньо-професійної підготовки докторів філософії у галузі знань електрична інженерія (шифр галузі 14) за спеціальності електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (код спеціальності 141) згідно з Програмою навчальної дисципліни «Процеси перетворення енергії водотоків зі змінними параметрами в електричну енергію».

Результати роботи впроваджено на таких підприємствах: алгоритм керування статормим струмом турбогенератора при створенні системи керування перетворювачем частоти для ВЕУ з аеродинамічною мультиплікацією типу ТГ-1000 (ТОВ "НДІ "Перетворювач", м. Запоріжжя); два алгоритми векторного керування моментом і комбінований метод компенсації гармонічних складових генерованого струму при дослідженні машини подвійного живлення (ТОВ "Науково-технічна фірма "ТЕМС", м. Київ); алгоритми керування машиною подвійного живлення з двоступеневим матричним перетворювачем в колі ротора при дослідженні систем генерування електроенергії (ТОВ "Євро-реконструкція", м. Київ).

14. Результати роботи рекомендуються до подальшого впровадження на підприємствах електротехнічного профілю.

## ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Монографії:*

1. Загірняк М.В., Клепіков В.Б., Ковбаса С.М., Михальський В.М., Пересада С.М., Садовой О.В., Шаповал І.А. Енергоефективні електромеханічні системи широкого технологічного призначення. Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2018. 310 с.

### *Публікації у фахових виданнях:*

2. Михальський В.М., Полищук С.И., Соболев В.Н., Чехет Э.М., Шаповал И.А. Энергетические соотношения в матричных преобразователях систем регулируемого асинхронного электропривода. *Технічна електродинаміка*. 2004. Ч.2. С.12–15. Темат. вип. «Силова електроніка та енергоефективність».

3. Чехет Е.М., Шаповал І.А. Дослідження електромеханічних систем з матрич-

ним перетворювачем за допомогою станції швидкого прототипного тестування. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*, 2005. №2(11). Ч.2. С.50–52.

4. Чехет Э.М., Соболев В.Н., Михальский В.М., Шаповал И.А., Полищук С.И. Тенденции развития матричных преобразователей для асинхронного электропривода. *Вестник НТУ "ХПИ"*, 2005. Вып. 45. С.32–37.

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

6. Chekhet E., Mikhalsky V., Sobolev V., Shapoval I. Control and commutation technique for matrix converters. *Технічна електродинаміка*. 2006. Ч.1. С. 56–67.

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

8. Михальский В.М., Полищук С.И., Соболев В.Н., Чехет Э.М., Шаповал И.А. Передача реактивной энергии в матричных преобразователях. *Технічна електродинаміка*. 2006. Ч.1. С.15–18. Темат. вип. «Силова електроніка та енергоефективність».

9. Чехет Е.М., Михальський В.М., Соболев В.М., Шаповал І.А. Матричні перетворювачі для електромеханічних систем змінного струму. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*, 2007. №1(16). Ч.2. С.76–85.

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

11. Шаповал І.А., Чехет Е.М. Керування моментом і реактивною потужністю машини подвійного живлення з матричним перетворювачем. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2008. №20. С.67–69.

12. Пересада С.М., Шаповал І.А., Михальський В.М., Соболев В.М., Чехет Е.М. Векторне керування моментом і реактивною потужністю машини подвійного живлення з матричним перетворювачем. *Вісник Національного технічного університету "ХПИ"*. 2008. №30. С.72–77.

13. Шаповал І.А. Застосування машини подвійного живлення з матричним перетворювачем для керування потужністю вітрогенераторів. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2009. №22. С.43–48.

14. Шаповал І.А. Машина подвійного живлення з матричним перетворювачем в режимах генератора і двигуна. *Технічна електродинаміка*. 2009. №3. С.20–25.

15. Ivan Shapoval, Jon Clare, Eduard Chekhet Experimental Evaluation of the Variable Speed Doubly-Fed Induction Machine with Matrix Converter. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*. 2009. No.7. P.115–119 (Наукометрична база **Scopus**).

16. Акинін К.П., Антонов О.Є., Кіреєв В.Г., Михальський В.М., Соболев В.М., Шаповал І.А. Підвищення ефективності електромеханічних та напівпровідникових перетворювачів енергії. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2009. №23. С.3–12.

17. Пересада С.М., Шаповал І.А., Михальський В.М., Соболев В.М., Чехет Е.М. Керування кутовою швидкістю машини подвійного живлення з матричним перетворювачем. *Науково-технічний журнал "Електроінформ"*. 2009. С. 111–114. Темат. вип. "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика".

18. Михальський В.М., Соболев В.М., Чехет Е.М., Чопик В.В., Шаповал І.А.

Особливості формування струмів в системі "мережа живлення з несиметричними напругами – матричний перетворювач". *Технічна електродинаміка*. 2009. Ч.1. С.16–23. Темат. вип. «Силова електроніка та енергоефективність».

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

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

21. Sharoval I.A., Clare J.C. Speed control of a matrix converter excited doubly-fed induction machine. *Технічна електродинаміка*. 2011. №3. С. 19–25.

22. Антонов О.Є., Михальський В.М., Петухов І.С., Шаповал І.А., Чопик В.В. Шляхи підвищення ефективності електромеханічних систем та напівпровідникових перетворювачів частоти з широтно-імпульсною модуляцією для керування ними. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2011. №29. С.5–17.

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

24. Антонов О.Є., Михальський В.М., Петухов І.С., Шаповал І.А., Чопик В.В. Дослідження процесів в електромеханічних та напівпровідникових перетворювачах енергії. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2012. №32. С.5–19.

25. Михальський В.М., Соколов В.М., Шаповал І.А., Чопик В.В. Розширення діапазону регулювання вхідної реактивної потужності матричних перетворювачів засобами керування. *Технічна електродинаміка*. 2012. №2. С.53–54 (Наукометрична база **Scopus**).

26. Михальський В.М., Соколов В.М., Чопик В.В., Шаповал І.А. Керування матричним перетворювачем з використанням екстремальних положень просторових векторів керуючих функцій. *Технічна електродинаміка*. 2012. №6. С.27–37 (Наукометрична база **Scopus**).

27. Поліщук С.Й., Артеменко М.Ю., Михальський В.М., Батрак Л.М., Шаповал І.А. Стратегія керування паралельним активним фільтром з частковим послабленням складової нульової послідовності напруг трифазної чотирипровідної мережі. *Технічна електродинаміка*. 2013. №3. С.12–19 (Наукометрична база **Scopus**).

28. Чопик В.В., Михальський В.М., Поліщук С.Й., Соколов В.М., Шаповал І.А. Просторово-векторне керування паралельними активними фільтрами. *Технічна електродинаміка*. 2013. №4. С.34–41 (Наукометрична база **Scopus**).

29. Михальський В.М., Поліщук С.Й., Соколов В.М., Чопик В.В., Шаповал І.А. Способи мінімізації небажаних складових миттєвої потужності із застосуванням паралельних активних фільтрів. *Енергосбереження, енергетика, енергоаудит*. Спец. вип. 2013. Т.1. №8(114). С.224–226.

30. Михальський В.М., Соколов В.М., Шаповал І.А., Чопик В.В., Дорошенко А.Л. Керування машиною подвійного живлення з матричним перетворювачем в колі ротора при несиметрії напруг мережі живлення. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. 2013. №36(1009). С.248–252.

31. Михальський В.М., Соколов В.М., Чопик В.В., Шаповал І.А. Стратегія мінімізації небажаних складових миттєвої потужності із застосуванням різних топологій паралельних активних фільтрів. *Технічна електродинаміка*. 2014. №1. С.41–50 (Наукометрична база **Scopus**).



32. Михальський В.М., Соболев В.М., Чопик В.В., Шаповал І.А. Керування вхідною реактивною потужністю матричних перетворювачів. *Технічна електродинаміка*. 2014. №3. С.33–41 (Наукометрична база **Scopus**).

33. Михальський В.М., Соболев В.М., Поліщук С.Й., Чопик В.В., Шаповал І.А. Збільшення коефіцієнта передачі напруги матричного перетворювача при ненульових фазових зсувах між напругами та струмами на вході та виході. *Энергосбережение, энергетика, энергоаудит*. Спец. вып. 2014. Т.1. №9(128). С.104–109.

34. Дорошенко А.Л., Михальський В.М., Шаповал І.А. Дослідження алгоритмів керування електромагнітним моментом машини подвійного живлення за допомогою математичного моделювання. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2014. №15(91). С. 319–322. Темат. вип. "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика".

35. Михальський В.М., Соболев В.М., Чопик В.В., Шаповал І.А. Максимізація діапазону керування матричними перетворювачами. *Технічна електродинаміка*. 2015. №1. С.7–13 (Наукометрична база **Scopus**).

36. Михальський В.М., Соболев В.М., Чопик В.В., Шаповал І.А. Поліпшення форми вхідних струмів матричних перетворювачів в умовах несиметричної та/або несинусоїдальної системи напруг мережі живлення. *Технічна електродинаміка*. 2015. №3. С.17–24 (Наукометрична база **Scopus**).

37. Михальський В.М., Соболев В.М., Чопик В.В., Шаповал І.А. Поліпшення форми вхідних струмів матричних перетворювачів в умовах симетричної синусоїдальної системи напруг мережі живлення та несиметричного навантаження. *Технічна електродинаміка*. 2016. №2. С.29–34 (Наукометрична база **Scopus**).

38. Михальський В.М., Соболев В.М., Чопик В.В., Шаповал І.А., Артеменко М.Ю. Формування вхідного струму матричного перетворювача в умовах спотворень напруги мережі живлення. *Технічна електродинаміка*. 2016. №3. С.33–35 (Наукометрична база **Scopus**).

39. Михальський В.М., Соболев В.М., Чопик В.В., Шаповал І.А. Поліпшення форми вхідних струмів матричних перетворювачів в умовах несиметричної системи напруг мережі живлення та несиметричного навантаження. *Технічна електродинаміка*. 2017. №1. С.35–43 (Наукометрична база **Scopus**).

40. Дорошенко А.Л., Михальський В.М., Шаповал І.А. Дослідження алгоритму керування швидкістю повністю керованої машини подвійного живлення. *Вісник Національного технічного університету "ХПИ"*. 2017. №27(1249). С.53–57.

41. Шаповал І.А., Михальський В.М., Дорошенко А.Л. Регулювання швидкості машини подвійного живлення з керованими перетворювачами в колах статора і ротора. *Технічна електродинаміка*. 2017. №6. С.18–25 (Наукометрична база **Scopus**).

42. Михальський В.М., Соболев В.М., Чопик В.В., Шаповал І.А. Моделювання системи генерування електроенергії на базі машини подвійного живлення з функціями активної фільтрації та компенсації реактивної потужності. *Технічна електродинаміка*. 2018. №5. С.52–56 (Наукометрична база **Scopus**).

#### *Матеріали конференцій:*

43. Shapoval I., Peresada S., Asher G. and Clare J. Torque and Reactive Power Control of Doubly-Fed Induction Machine with Matrix Converter. ISIE 2008. Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Cambridge. United Kingdom. 30 June–2 July 2008. P. 2469–2474.

44. Shapoval I., Clare J., Chekhet E. Experimental Study of a Matrix Converter Excited Doubly-Fed Induction Machine in Generation and Motoring. EPE-PEMC 2008. Proceedings of 13th International Power Electronics and Motion Control Conference. Poznan. Poland. 1–3 Sept. 2008. P. 307–312.

45. Дорошенко А.Л., Шаповал І.А. Огляд систем електропривода на базі машини подвійного живлення з різними типами перетворювачів частоти. Збірник наукових праць XI Міжнародної науково - технічної конференції молодих учених і спеціалістів «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації». Кременчук. Україна. 9–11 квітня 2013. С.41–42.

46. Дорошенко А.Л., Шаповал І.А. Дослідження алгоритмів керування електромагнітним моментом машини подвійного живлення. Збірник наукових праць XII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації». Кременчук. 10–11 квітня 2014. С. 25–26.

47. Mykhalskyi V.M., Sobolev V.M., Chopyk V.V., Polishchuk S.Y., Shapoval I.A. Matrix converter control strategy maximizing reactive power transfer. IEPS-2014. Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent and Power Systems. Kyiv. Ukraine. 2-6 June 2014. P.26–31.

48. Mykhalskyi V.M., Sobolev V.M., Chopyk V.V., Polishchuk S.Y., Shapoval I.A. Power Quality Improvement of the Matrix Converter Input Currents in the Case of Unbalanced and/or Nonsinusoidal Supply Voltages. ELNANO-2015. Proceedings of the IEEE 35th International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology. Kyiv. Ukraine. 21-24 April 2015. P. 528–533.

49. Mykhalskyi V.M., Sobolev V.M., Chopyk V.V., Polishchuk S.Y., Shapoval I.A. The Matrix Converter Input Current Formation in the Case of Unbalanced Load. IEPS-2016. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Intelligent and Power Systems. Kyiv. Ukraine. 7-11 June 2016. P.23–25.

50. Mykhalskyi V.M., Sobolev V.M., Chopyk V.V., Polishchuk S.Y., Shapoval I.A. Reduction of the Input Current Harmonic Content in Matrix Converters under Unbalance of the Input Voltages and the Load. ELNANO-2017. Proceedings of the IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology. Kyiv. Ukraine. 18-20 April 2017. P. 485–488.

51. Shapoval I.A., Mykhalskyi V.M., Doroshenko A.L., Polishchuk S.Y., Peresada S.M. Study of the Torque Control Algorithm for a Doubly-Fed Full-Controlled Induction Machine. MEES-2017. Proceedings of the International Conference on “Modern electrical and energy systems”. Kremenchuk. Ukraine. 15-17 November 2017. P. 56–59.

52. Mykhalskyi V.M., Sobolev V.M., Chopyk V.V., Polishchuk S.Y., Shapoval I.A. Vector Control for Double-Inverter-Fed Wound-Rotor Induction Machine. ELNANO-2018. Proceedings of the IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology. Kyiv. Ukraine. 24-26 April 2018. P. 552–557.

53. Shapoval I.A., Mykhalskyi V.M., Sobolev V.M., Chopyk V.V., Polishchuk S.Y. Selective Compensation of Current Harmonics in Grid-Connected Doubly-Fed Induction Generator based Wind Energy System. IEPS-2018. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Intelligent and Power Systems. Kharkiv. Ukraine. 10-14 September 2018.

Основні положення і результати, які виносяться на захист, належать авторові особисто. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать: [1, 18] – розробка стратегії формування струмів матричних перетворювачів; [2] – аналіз енергетичних співвідношень в матричних перетворювачах; [3] – розробка структури системи керування; [4] – розробка методу розрахунку відносних тривалостей станів двоступеневого матричного перетворювача; [5-7, 9, 10] – розробка алгоритмів керування матричним перетворювачем за допомогою цифрових сигнальних процесорів; [8, 25, 26, 32, 33, 47] – розробка алгоритму передачі реактивної енергії матричних перетворювачем; [11-17, 21, 43, 44] – розробка алгоритму керування МПЖ з матричним перетворювачем; [19,

20] – стратегія формування струмів; [22] – побудова алгоритму векторної ШПМ; [23, 24] – розробка алгоритму керування МПЖ з двоступеневим матричним перетворювачем; [34, 40, 45, 46] – метод керування комплексом генерування електроенергії на базі МПЖ, який полягає в застосуванні об'єднаної ланки постійного струму перетворювачів в статорі і роторі; [27-29, 31] – розробка стратегії керування напівпровідниковими перетворювачами в ланці ротора МПЖ з функціями паралельної активної фільтрації; [30] – розробка алгоритму керування МПЖ з матричним перетворювачем при несиметрії напруг мережі; [35] – алгоритм формування керуючих функцій матричних перетворювачів; [36-39, 48, 49, 50] – аналіз якості вхідного струму матричних перетворювачів; [41, 51, 52] – метод керування повністю керованою машиною подвійного живлення; [42, 53] – розробка методу вибіркової компенсації гармонічних складових генерованого струму МПЖ.

## АНОТАЦІЯ

**Шаповал І.А. Наукові основи створення комплексів генерування електроенергії з функціями компенсації реактивної потужності та активної фільтрації на базі машини подвійного живлення.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", Дніпро, 2019.

У дисертаційній роботі вирішується важлива науково-прикладна проблема підвищення якості генерованої електроенергії засобами керування машиною подвійного живлення (МПЖ).

Низька якість електроенергії збільшує енергетичні та економічні втрати, призводить до експлуатаційних проблем виробництва і перенавантаження трансформаторів. У цьому плані поєднання розосередженого генерування та функціональних можливостей активної фільтрації є одним із способів підвищення якості електроенергії та зниження прямих і непрямих експлуатаційних витрат енергосистеми.

Розроблено стратегію компенсації несиметрії і несинусоїдальності генерованих струмів машини подвійного живлення в умовах підключення нелінійних навантажень, яка полягає в компенсації реактивної потужності засобами МПЖ та активній фільтрації струму з використанням можливостей напівпровідникового перетворювача в роторній ланці, що дало змогу забезпечити високоефективну роботу комплексів генерування для поновлюваних джерел електроенергії.

Розроблено новий метод керування повністю керованою машиною подвійного живлення, який полягає у використанні надлишковості координат керування для ефективного відпрацювання заданого моменту за умови одночасного керування по колах статора і ротора, що дало змогу забезпечити мінімізацію втрат потужності.

Розроблено новий комбінований метод компенсації гармонічних складових генерованого струму машини подвійного живлення, який полягає в об'єднанні компенсаційних впливів машини подвійного живлення і напівпровідникового перетворювача в роторній ланці на підвищення якості генерованої електроенергії та дає змогу виконати вимоги забезпечення електромагнітної сумісності у разі приєднання нелінійних навантажень до точки загального підключення.

Із застосуванням р-q-г теорії миттєвої потужності та з врахуванням топологічних відмінностей між трифазними трипровідними і чотирипровідними системами розроблено стратегію розрахунку компенсаційних струмів мережевого перетворювача в колі ротора МПЖ.

Розвинуто метод вибіркової компенсації гармонічних складових генерованого струму МПЖ, який полягає у застосуванні спостерігача гармонік струму, що забезпечує асимптотичне оцінювання будь-якої заданої кількості гармонік і дозволяє здійснити компенсацію домінуючих гармонічних складових.

Розроблено програмне забезпечення, що дозволяє здійснити практичну реалізацію методів керування машиною подвійного живлення на базі цифрового сигнального процесора. Розроблено і проведено експериментальну перевірку матричних перетворювачів в ланці ротора машини подвійного живлення із застосуванням для керування ними поєднання цифрових сигнальних процесорів і програмованих логічних матриць.

Запропоновано структури моделей для фізичного моделювання комплексу генерування на основі машини подвійного живлення. Розроблений алгоритм керування напівпровідниковим перетворювачем в ланці ротора МПЖ з функціями паралельної активної фільтрації знайшов практичне застосування при створенні дослідного зразка МПЖ.

**Ключові слова:** комплекс генерування електроенергії, машина подвійного живлення, матричний перетворювач, нелінійне навантаження, несиметрія, несинусоїдальність.

## АННОТАЦИЯ

**Шаповал И.А. Научные основы создания комплексов генерирования электроэнергии с функциями компенсации реактивной мощности и активной фильтрации на базе машины двойного питания.** - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 - электротехнические комплексы и системы. - Национальный технический университет "Днепропетровская политехника", Днепр, 2019.

В диссертационной работе решается важная научно-прикладная проблема повышения качества генерируемой электроэнергии средствами управления машиной двойного питания (МДП).

Низкое качество электроэнергии увеличивает энергетические и экономические потери, приводит к эксплуатационным проблемам производства и перегрузки трансформаторов. В этом плане сочетание рассредоточенного генерирования и функциональных возможностей активной фильтрации является одним из способов повышения качества электроэнергии и снижения прямых и косвенных эксплуатационных расходов энергосистемы.

Разработана стратегия компенсации несимметрии и несинусоидальности генерируемых токов машины двойного питания в условиях подключения нелинейных нагрузок, которая заключается в компенсации реактивной мощности средствами МДП и активной фильтрации тока с использованием возможностей полупроводникового преобразователя в роторном звене, что позволило обеспечить высокоэффективную работу комплексов генерирования для возобновляемых источников электроэнергии.

Разработан новый метод управления полностью управляемой МДП, который заключается в использовании избыточности координат управления для эффективной отработки заданного момента при условии одновременного управления по цепям статора и ротора, что позволило обеспечить минимизацию потерь мощности.

Разработан новый комбинированный метод компенсации гармонических составляющих генерируемого тока МДП, который состоит в объединении компенсационных воздействий машины двойного питания и полупроводникового преобразователя в роторном звене на повышение качества вырабатываемой электроэнергии и позволяет выполнить требования обеспечения электромагнитной совместимости в случае

присоединения нелинейных нагрузок в точке общего подключения.

С применением p-q-r теории мгновенной мощности и с учетом топологических различий между трехфазными трехпроводными и четырехпроводными системами разработана стратегия расчета компенсационных токов сетевого преобразователя в цепи ротора МДП.

Развит метод выборочной компенсации гармонических составляющих генерируемого тока МДП, который заключается в применении наблюдателя гармоник тока, который обеспечивает асимптотическую оценку любого заданного количества гармоник и позволяет осуществить компенсацию доминирующих гармонических составляющих.

Разработано программное обеспечение, позволяющее осуществить практическую реализацию методов управления машиной двойного питания на базе цифрового сигнального процессора. Разработаны и проведена экспериментальная проверка работы матричных преобразователей в звене ротора машины двойного питания с применением для управления ими сочетания цифровых сигнальных процессоров и программируемых логических матриц.

Предложены структуры моделей для физического моделирования комплекса генерирования на основе машины двойного питания. Разработанный алгоритм управления полупроводниковым преобразователем в звене ротора МДП с функциями параллельной активной фильтрации нашел практическое применение при создании опытного образца МДП.

**Ключевые слова:** комплекс генерирования электроэнергии, машина двойного питания, матричный преобразователь, нелинейная нагрузка, несимметрия, несинусоидальность.

## ABSTRACT

**Shapoval I.A. Scientific bases of creation of power generation complexes with reactive power compensation and active filtering based on doubly-fed induction generator. – Manuscript.**

Thesis for a Doctor of Sciences degree of electrical engineering of speciality 05.09.03 - electrotechnical complexes and systems. – National technical university “Dnipro polytechnic”, Dnipro, 2019.

The important scientific and applied problem of improving the quality of generated electrical energy by means of doubly-fed induction generator (DFIG) control is solved in the dissertation.

Low power quality increases energy and economic losses leads to operational problems of production and even overload of transformers. In this regard, the combination of distributed power generation and active filtering capabilities is one of the ways to improve the quality of electrical energy and reduce the direct and indirect operating costs of the grid.

Modern technologies allow to control electrical energy generation systems at maximum power for most of the time, while using part of the energy for additional functions that help improve the quality of electrical energy. There are many technological alternatives to carry out electromechanical transformation in power generation systems. Different configurations are obtained by combining induction or synchronous machines with full power or partial power converters. Electric power generation complexes based on doubly-fed induction machine allow to achieve high efficiency of electromechanical energy conversion. Such complexes are characterized by the fact that the control objectives are achieved with variation of angular velocity in a limited range ( $\pm 30\%$  of synchronous speed).

A strategy for compensation of unbalanced and non-sinusoidal generated currents of DFIG in the conditions of connecting nonlinear loads. It consists in compensation of reactive power by means of DFIG and active current filtration using the capabilities of a semiconductor grid side converter. It is enabled to provide highly efficient operation of genera-

tion complexes for renewable sources of electric energy.

The control method of a power generation complex based on DFIG is developed, which consists in the application of a united dc-link of converters in a stator and a rotor. It allows to provide adaptability to distortions of the network and to improve the quality of generated electric energy.

A new method of control of a fully controlled DFIG is developed, which is to use the redundancy of the control coordinates for the effective processing of the reference torque provided that the stator and rotor circuits can be controlled simultaneously, which made it possible to minimize the loss of power.

The general basis of the considered options for improving the quality of the input currents of the matrix converter, which used as the rotor side converter of the DFIG, is the choice of the direction of the space current vector in relation to the space vector of the input voltage by one or another of the criteria that are related to the harmonic content of the voltage and the coefficient asymmetry in the presence of a negative sequence of the basic harmonic. Since all components of the input voltage and their relationship between them are functions of time, the phase shift between the space voltage and current vectors is also not constant, but changes over a period by one or another rule or algorithm. It is shown, by what signs the connection between modulation of the direction of the space vector of the input current and the direct assignment and realization of its reactive component is established.

Using the p-q-r instantaneous power theory and considering the topological differences between three-phase three- and four-wire systems, a strategy for calculating the compensating currents of the DFIG grid side converter is developed. The calculation of compensating currents of the grid side converter should be in accordance with the capabilities of its power circuit, but it is expedient to apply topologies that filter all unwanted components of instantaneous power.

The method of selective compensation of the harmonic components of the DFIG generated currents is developed, which consists in the application of the current harmonic observer, which provides asymptotic estimation of any given number of harmonics and allows to compensate for the dominant harmonic components.

The control strategy of grid side converter with functions of active filtration in a four-wire three-phase network, in which the vector of instantaneous currents of a three-phase source is proportional to the vector of instantaneous phase voltages with partial attenuation of the component of the zero-sequence, is proposed. With the optimum value of the reduction factor of the zero-sequence component and of the significant phase voltage asymmetry, this strategy gives advantages in terms of power loss in the power cable up to 2 times compared with the control strategy with full preservation of the component of the zero-sequence, and up to 8% in comparison with the control strategy at complete removal zero-sequence component.

The properties of structural elements of electric power generation complexes based on DFIG are determined and recommendations on setting their parameters are developed.

Software has been developed that allows the practical realization of DFIG control methods based on a digital signal processor. The experimental verification of matrix converters in the DFIG rotor with the use of a combination of digital signal processors and programmable logic matrices is developed and carried out.

The model structures for the physical modeling of the generation system based on the DFIG are proposed. The developed algorithm for controlling the DFIG grid side converter with active filtering functions has found practical application in creating a DFIG prototype.

**Keywords:** power generation complex, doubly-fed induction generator, matrix converter, nonlinear load, unbalance, non-sinusoidality.

**ШАПОВАЛ Іван Андрійович**

**НАУКОВІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ КОМПЛЕКСІВ ГЕНЕРУВАННЯ  
ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ З ФУНКЦІЯМИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ  
ПОТУЖНОСТІ ТА АКТИВНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ НА БАЗІ МАШИНИ  
ПОДВІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ**

(Автореферат)

Підписано до друку \_\_.\_\_.2019р. Формат 60x84/16

Умовн.-друк. аркуш. 1,89. Об.-вид. аркуш. 1,55.

Тираж 100 прим.                      Замовл. \_\_.

---

Поліграф. дільн. Інституту електродинаміки НАН України  
03680, Київ-57, проспект Перемоги, 56.