

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія

Головань Тетяна Геннадіївна

УДК 621.314.26

**ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ АВТОМАТИЗОВАНИХ
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ З МАТРИЧНИМИ
ЧАСТОТНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ**

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Автореферат магістерської роботи

Краматорськ 2020

Робота виконана на кафедрі електромеханічних систем автоматизації Донбаської державної машинобудівної академії Міністерства освіти і науки України, м. Краматорськ.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Шеремет Олексій Іванович,
Донбаська державна машинобудівна
академія, завідувач кафедри
«Електромеханічні системи
автоматизації».

Рецензент:

Захист відбудеться «22» грудня 2020 р. о 10:00 на засіданні державної екзаменаційної комісії за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» в Донбаській державній машинобудівній академії на кафедрі ЕСА за адресою: 84313, м. Краматорськ, бульвар Машинобудівників, 39, 2-й корпус, ауд. 2133.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

В даний час найбільш актуальним стає скорочення кількості етапів перетворення електричної енергії на шляху від джерела до споживача. Одним з напрямків досягнення зазначеної вище тенденції є використання перспективних схем перетворювачів частоти (ПЧ) і застосування ефективних алгоритмів для управління ними. Однією з найбільш широких областей застосування силової перетворювальної техніки є частотно-регульований електропривод змінного струму, оскільки він володіє великими потенційними можливостями оптимізації виробничих процесів, зростання продуктивності, економії трудових і енергетичних ресурсів. У більшості випадків в них використовуються дволанкові напівпровідникові ПЧ, виконані за схемами «некерований випрямляч - інвертор» і «керований випрямляч - інвертор». Перетворювачі такого типу є нелінійними приймачами електричної енергії від мережі змінного струму, які споживають в більшості випадків значну реактивну потужність, що істотно знижує їх енергетичну ефективність. Крім того, вони вносять значні спотворення в мережу живлення внаслідок низької якості вхідного струму.

Вимоги до мережі живлення постійно збільшуються, що виключає використання простих схем випрямлячів на вході ПЧ. Ці обставини стимулюють використання в їх складі вхідних фільтрів, які частково вирішують зазначені вище проблеми, але при цьому збільшують вартість і погіршують масогабаритні і динамічні показники. Тому особливої уваги заслуговують питання узгодження ПЧ з мережею живлення. Крім вимог щодо якості споживаної електроенергії, сучасні ПЧ також повинні забезпечувати можливість рекуперації енергії в мережу живлення.

Одним з перспективних напрямків зменшення споживання реактивної потужності з мережі живлення при одночасній можливості рекуперації енергії і зниження рівня вищих гармонік струму мережі є застосування схем активних ПЧ, що використовують у своїй схемі повністю керовані ключі, управління якими здійснюється релейними або імпульсно-модуляційними методами.

Зв'язок роботи з планами і темами кафедри. Робота була виконана на кафедрі електромеханічних систем автоматизації Донбаської державної машинобудівної академії відповідно до тематичного плану держбюджетної науково-дослідної роботи ДР № 0117U007402 «Розробка та дослідження електронних та електромеханічних систем перетворення електричної енергії з використанням сучасних цифрових засобів автоматизації» згідно з напрямком наукової роботи кафедри.

Актуальність дослідження стійкості автоматизованих електромеханічних систем з матричними частотними перетворювачами викликана економічною необхідністю скорочення кількості етапів перетворення електричної енергії на шляху від джерела до споживача.

Метою роботи є дослідження стійкості автоматизованих електромеханічних систем з матричними перетворювачами частоти (МПЧ).

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалися наступні **задачі**:

- виконано аналітичний огляд сучасних напівпровідникових перетворювачів;
- розроблена математична модель матричного перетворювача;
- проаналізовано загальні принципи керування матричними перетворювачами (алгоритм Алесіні-Вентаріні, оптимізований алгоритм Вентаріні, алгоритм Роя, метод непрямой просторово-векторної модуляції);
- проаналізовано поняття вектора модуляції вхідного струму;
- проаналізовано вплив неідеальності мережі живлення на якість вхідного струму;
- виконано аналіз вхідного струму при незбалансованій синусоїдальній живильній мережі;
- виконано аналіз стійкості наступних систем: з вхідним LC-фільтром, при постійній вихідній потужності, з урахуванням параметрів навантаження, з вхідним RLC-фільтром, з урахуванням параметрів навантаження;
- здійснена цифрова корекція системи керування і аналіз стійкості системи з цифровим фільтром.

Об'єкт дослідження – автоматизовані електромеханічні системи з матричними частотними перетворювачами.

Предмет дослідження – стійкість систем з матричними частотними перетворювачами за умови неідеальності напруги живлення та різної варіації вхідних фільтрів.

Методи досліджень. В роботі використано загальні положення та методи теорії керування, теорії електроприводу, лінійної алгебри, числові методи розв'язання диференціальних рівнянь для розрахунків параметрів частотних перетворювачів, перевірка ефективності отриманих теоретичних результатів здійснювалася засобами чисельного моделювання в програмному середовищі MATLAB з використанням сучасних засобів автоматизації математичних і інженерних розрахунків.

Наукова новизна роботи:

1. Обґрунтовані основні принципи модуляції вхідного струму МПЧ, що дозволяють компенсувати спотворення живильної мережі.
2. Проведений аналіз стійкості системи з матричним перетворювачем частоти дозволив розробити методику розрахунку параметрів вхідного фільтра з використанням методів усереднення та лінеаризації, що полегшує виконання інженерних розрахунків.
3. Запропоновано і теоретично доведено методику підвищення стійкості системи з МПЧ та розширення діапазону потужностей перетворення за рахунок включення додаткового гасячого опору паралельно індуктивності фільтра.
4. Теоретично доведено, що застосування цифрового фільтра для виділення основної гармоніки вектора вхідної напруги дозволяє істотно розширити діапазон вихідних потужностей МПЧ. За допомогою чисельного моделювання встановлено, що застосування LC-фільтра спільно з цифровим фільтром дає результат, аналогічний застосуванню RLC-фільтра.

Практична цінність роботи:

1. Розроблені імітаційні моделі системи дозволяють проводити дослідження роботи МПЧ при зміні параметрів силової схеми в режимах споживання і рекуперації, а також алгоритмів модуляції.
2. Встановлені залежності максимальної вихідної потужності МПЧ і максимального коефіцієнта передачі напруги від параметрів вхідного фільтра дозволяють оцінити стійкість системи і розрахувати практично необхідні параметри вхідного фільтра.

Наукова апробація роботи. Результати досліджень доповідались та обговорювались на наукових конференціях регіонального та міжнародного рівня: IV Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод» (16-18 квітня 2020 року), XLII Науково-технічна конференція науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів, магістрантів і студентів (23-27 листопада 2020 року).

Публікація результатів наукових досліджень. Матеріали магістерської роботи опубліковано у двох тезах доповідей регіональних та міжнародних науково-технічних конференцій і одній науковій статті у фаховому виданні «Вісник Донбаської державної машинобудівної академії» (перереєстровано – Наказ МОН України № 326 від 04.04.2018).

Особистий вклад здобувача. Усі основні результати магістерської роботи, що виносяться на захист, здобувач отримав особисто. Зокрема, – виконано аналітичний огляд сучасних напівпровідникових перетворювачів розроблена математична модель матричного перетворювача, проаналізовано загальні принципи керування матричними перетворювачами (алгоритм Алесіні-Вентаріні, оптимізований алгоритм Вентаріні, алгоритм Роя, метод непрямой просторово-векторної модуляції); проаналізовано поняття вектора модуляції вхідного струму; проаналізовано вплив неідеальності мережі живлення на якість вхідного струму; виконано аналіз вхідного струму при незбалансованій синусоїдальній живильній мережі; виконано аналіз стійкості наступних систем: з вхідним LC-фільтром, при постійній вихідній потужності, з урахуванням параметрів навантаження, з вхідним RLC-фільтром, з урахуванням параметрів навантаження; здійснена цифрова корекція системи керування і аналіз стійкості системи з цифровим фільтром.

Структура та обсяг магістерської роботи. Магістерська кваліфікаційна робота складається з вступу, п'яти розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел.

Загальний обсяг магістерської роботи становить 120 сторінок, в тому числі 25 таблиць по тексту, 33 рисунка по тексту, перелік використаних джерел із 33 найменувань на 4 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ містить обґрунтування актуальності теми дослідження, її основну мету, наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів.

У **першому розділі** здійснено аналіз загальних відомостей про сучасні напівпровідникові перетворювачі електроенергії.

На сьогоднішній день одним з найбільш перспективних електроприводів слід визнати частотно-регульований електропривод змінного струму. Застосовувані в них перетворювача частоти (ПЧ) можна розділити на дві групи:

1. Дволанкові ПЧ (ДПЧ), які здійснюють два етапи перетворення електричної енергії. Випрямляч і інвертор управляються незалежно, оскільки їх середній потік енергії однаковий. Різниця миттєвої потужності на вході і виході поглинається або віддається елементом акумулювання енергії в проміжну ланку постійного струму.

2. Безпосередні ПЧ (БПЧ), що забезпечують одноразове перетворення електричної енергії. На відміну від схем ДПЧ, схема БПЧ заміщає два етапи перетворення одним і не вимагає проміжного елемента акумулювання енергії. Самою універсальною схемою БПЧ є схема перетворювача з штучною комутацією матричного типу (МПЧ).

В даний час широкого поширення набули транзисторні ДПЧ на основі автономних інверторів напруги (АІН). Ці інвертори при наявності зворотних зв'язків за струмом перетворюються в інвертори струму (АІС), що дозволяють виконувати різні системи частотно-струмового управління двигунами змінного струму.

ДПЧ дозволяють отримувати вихідну частоту від часток Герца до декількох сотень герц. Верхня межа обмежується можливою частотою комутації силових ключів (зазвичай це 15-20 кілогерц), а нижній – якістю вихідної напруги або струму. У гармонійних складових вхідних струмів присутні гармоніки не кратні двом і трьом (тобто 5-ї, 7-ї, 11-ї і т.д. гармоніки), що викликає спотворення в мережі живлення і призводить до втрат потужності сумірних з корисною потужністю.

В даний час все більшого поширення набувають схеми БПЧ виконані на повністю керованих ключах, які можна розділити на дві групи:

– Дволанкові БПЧ. Структура ДБПЧ успадковується від розглянутих вище ДПЧ, за винятком фільтра в ланці постійного струму і застосуванням силових ключів, які володіють двобічною провідністю. Дослідженню схем ДБПЧ присвячені роботи вітчизняних і зарубіжних авторів [6 – 12].

– БПЧ матричного типу (МПЧ). Силова частина МПЧ складається з дев'яти ключів, які володіють двобічною провідністю, з'єднаних так, щоб будь-яка з трьох фаз входу А, В, С могла бути пов'язана з будь-якою з трьох фаз виходу а, b, с.

У другому розділі виконується аналіз алгоритмів скалярної модуляції.

Основне завдання модуляції полягає в необхідності отримання синусоїдальних за формою вихідної напруги і вхідних струмів. Метод просторово-векторної модуляції (в англійській літературі «space vector modulation» або SVM) був розроблений в середині 90-х років у зв'язку з розширенням можливостей систем мікропроцесорного управління і в даний час широко використовується в схемах ДПЧ. В теорії SVM ключову роль відіграє поняття просторового вектора, що представляє собою трифазну систему векторів на комплексній площині. Управління в режимі SVM дозволяє отримати в кожен період часу необхідне положення вектора на комплексній площині.

Непряма просторово-векторна модуляція для МПЧ (Indirect SVM або ISVM) була вперше запропонована в 1989 році, після того як МПЧ був представлений в еквівалентних схемах, що поєднують випрямляч і інвертор, пов'язані з допомогою віртуальної ланки постійного струму, як показано на рисунку 1.6. У цій схемі інвертор представляє стандартний 3-х фазний АІН, що складається з шести ключів $S_7 - S_{12}$. Випрямляч також є стандартним 3-х фазним мостом з шести ключів $S_7 - S_{12}$.

Випрямляч і інвертор безпосередньо пов'язані з допомогою віртуальної ланки постійного струму і спочатку забезпечують двонаправлений потік енергії в силу своєї симетричності. Такий розподіл дозволяє використовувати для управління МПЧ добре відомі алгоритми просторово-векторної модуляції для випрямної частини і інверторної частини ДПЧ.

У третьому розділі здійснено дослідження стійкості автоматизованих електромеханічних систем з матричними частотними перетворювачами.

На практиці, присутність різних навантажень в мережі викликає небаланс напруг і інші спотворення. Зважаючи на відсутність проміжного акумулятора енергії в схемі МПЧ, будь-яке спотворення напруги мережі живлення відбивається на формі вхідного струму і вихідної напруги.

Проведено аналіз впливу спотворення напруги мережі живлення на якість вхідного струму МПЧ. Розглянуто та проаналізовано основні принципи модуляції вхідного струму, що дозволяють компенсувати ці спотворення.

Крім того, наявність фільтра на вході МПЧ визначає стійкість системи в залежності від алгоритму модуляції ключів. Ця проблема стає очевидною, якщо в керуванні задіяні швидкодіючі зворотні зв'язки, як наприклад, в регульованих електроприводах з трансекторним керуванням або з прямим керуванням моментом.

Проведено аналіз стабільності системи з МПЧ і вхідними LC і RLC-фільтрами пригнічення вищих гармонік струму, покликаними забезпечити електромагнітну сумісність МПЧ з мережею живлення і запобігти виникненню нестійкості, проявляється при перевищенні деякого значення споживаної МПЧ потужності. Розрахунки, проведені аналітичним методом і методом числового моделювання, дозволяють визначити відношення, що відображають максимальну вихідну потужність МПЧ як функцію параметрів мережі живлення і вхідного фільтра.

Отримано основний вираз для аналізу впливу спотворення напруги живильної мережі на якість вхідного струму. Виходячи з цього, обґрунтовані три основних принципи модуляції вхідного струму МПЧ, що дозволяють компенсувати спотворення живильної мережі. Проведено математичне моделювання для кожного випадку з урахуванням живлення від незбалансованої синусоїдальної живильної мережі.

Застосування різноманітних принципів модуляції дозволило:

- забезпечити вхідний коефіцієнт потужності МПЧ рівний одиниці в будь-який момент часу;
- знизити амплітуду непарних гармонік вхідного струму МПЧ в 2 рази.

У четвертому розділі здійснено техніко-економічне обґрунтування виконаних досліджень. Розраховано оціночні результати вкладу магістра у наукові дослідження по тематиці кваліфікаційної роботи магістра.

У п'ятому розділі наведено результати аналізу з охорони праці, а саме аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів, заходи щодо забезпечення безпечних умов праці, розглянуто дії при надзвичайних ситуаціях.

ВИСНОВКИ

В роботі виконано аналіз стійкості систем з МПЧ при роботі разом з вхідними LC або RLC-фільтрами. Для кожного з них проведено аналіз стійкості системи за Ляпуновим чисельними методами. Проведені для системи з вхідним LC-фільтром розрахунки, дозволяють визначити співвідношення, що відображають максимальну вихідну потужність МПЧ як функцію параметрів живильної мережі і вхідного фільтра. Розроблені програми для ЕОМ дозволяють оцінити стійкість системи.

Показано, що на стійкість системи впливають параметри вхідного фільтра та споживана навантаженням потужність:

– прийняті параметри вхідного LC-фільтра забезпечують максимальну вихідну потужність МПЧ рівну 300; 600 і 900 Вт для значень ємності фільтра, рівних 3,3; 6,8 і 10 мкФ відповідно;

– прийняті параметри навантаження МПЧ обмежують максимальний коефіцієнт напруги q значеннями 0,18; 0,26 і 0,32 відповідно.

Показано теоретично і доведено результатами моделювання, що включення додаткового гасячого опору паралельно індуктивності фільтра позитивно впливає на стійкість системи і значно розширює діапазон потужностей перетворення:

– прийняті параметри вхідного RLC-фільтра забезпечують максимальну вихідну потужність МПЧ рівну 9 і 11 кВт для значень гасячого опору рівних 10 і 5 Ом відповідно;

– максимальний коефіцієнт напруги обмежений значенням $q = 0,87$.

Показано, що застосування цифрового фільтра для виділення основної гармоніки вектора вхідної напруги дозволяє істотно розширити діапазон вихідних потужностей МПЧ. За допомогою чисельного моделювання встановлено, що застосування LC-фільтра спільно з цифровим фільтром дає результат, аналогічний застосуванню RLC-фільтра:

– значення сталої часу цифрового фільтра $\tau = 0,326$ мс дозволяє досягти максимального теоретичного значення коефіцієнта передачі напруги $q = 0,87$.

Варто зауважити, що значення сталої часу може бути збільшене ще значніше, для гарантування стійкості системи в будь-якому режимі експлуатації, проте це зменшує швидкодію для компенсації можливих збурень вхідної напруги.

Проведене імітаційне моделювання в повній мірі підтверджує виконані аналітичні розрахунки, тому можна зробити висновок, що запропонований підхід щодо аналізу стійкості є вірним.

АНОТАЦІЯ

Головань Т. Г. Дослідження стійкості автоматизованих електромеханічних систем з матричними частотними перетворювачами.

Магістерська робота за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, 2020.

Магістерська кваліфікаційна робота складається з вступу, п'яти розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел.

Загальний обсяг магістерської роботи становить 120 сторінок, в тому числі 25 таблиць по тексту, 33 рисунка по тексту, перелік використаних джерел із 33 найменувань на 4 сторінках.

Основні наукові результати магістерської роботи:

1. Обґрунтовані основні принципи модуляції вхідного струму матричного перетворювача частоти, що дозволяють компенсувати спотворення живильної мережі.

2. Проведений аналіз стійкості системи з матричним перетворювачем частоти дозволив розробити методику розрахунку параметрів вхідного фільтра з використанням методів усереднення та лінеаризації, що полегшує виконання інженерних розрахунків.

3. Запропоновано і теоретично доведено методику підвищення стійкості системи з матричним перетворювачем частоти та розширення діапазону потужностей перетворення за рахунок включення додаткового гасячого опору паралельно індуктивності фільтра.

4. Теоретично доведено, що застосування цифрового фільтра для виділення основної гармоніки вектора вхідної напруги дозволяє істотно розширити діапазон вихідних потужностей матричного перетворювача частоти. За допомогою чисельного моделювання встановлено, що застосування LC-фільтра спільно з цифровим фільтром дає результат, аналогічний застосуванню RLC-фільтра.

Ключові слова: МАТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, АВТОНОМНИЙ ІНВЕРТОР НАПРУГИ, СКАЛЯРНА МОДУЛЯЦІЯ, ПРОСТОРОВО-ВЕКТОРНА МОДУЛЯЦІЯ

ANNOTATION

Golovan T. G. Automated electromechanical systems stability with matrix frequency converters research.

Master's thesis in specialty 141 – "Electricity, Electrical Engineering and Electromechanics", Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk, 2020.

The master's thesis consists of an introduction, five sections, general conclusions, a list of sources used.

The total volume of the master's work is 120 pages, including 25 tables on the text, 33 figures on the text, the list of the used sources from 33 names on 4 pages.

The main scientific results of the master's thesis:

1. The basic principles of modulation of the input current of the matrix frequency converter are substantiated, which allow to compensate the distortion of the power supply network.

2. The analysis of the stability of the system with a matrix frequency converter allowed developing a method of calculating the parameters of the input filter using the methods of averaging and linearization, which facilitates the implementation of engineering calculations.

3. The method of increasing the stability of the system with a matrix frequency converter and expanding the range of conversion powers by including additional quenching resistance in parallel with the inductance of the filter is proposed and theoretically proved.

4. It is theoretically proved that the use of a digital filter to select the fundamental harmonic of the input voltage vector can significantly expand the range of output powers of the matrix frequency converter. Using numerical simulations, it was found that the use of LC-filter in conjunction with a digital filter gives a result similar to the use of RLC-filter.

Keywords: MATRIX FREQUENCY CONVERTER, AUTONOMOUS VOLTAGE INVERTER, SCALAR MODULATION, SPATIAL-VECTOR MODULATION

Головань Тетяна Геннадіївна

**ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ АВТОМАТИЗОВАНИХ
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ З МАТРИЧНИМИ
ЧАСТОТНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ**

Підп. до друку

Формат 60×90/16

Офсетний друк

Умов. друк. арк. – 0,58

Тираж 1 прим.

Замовлення №

ДДМА, 84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72