

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»
Факультет енергетики та інформаційних технологій
Кафедра електротехніки, електромеханіки і електротехнологій

ДИПЛОМНА РОБОТА

на тему:

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У КОЛІ МАТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ

Виконав:

здобувач вищої освіти денної форми
навчання освітнього ступеня «Магістр»,
освітньо-професійної програми
«Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка» спеціальності 141
«Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

_____ **Валентин КУШНІР**

Керівник: кандидат технічних наук, доцент

_____ **Павло ПОТАПСЬКИЙ**

Оцінка захисту:

Національна шкала _____

Кількість балів _____ Шкала ECTS _____

Допускається до захисту:

«_____» _____ 2023 р.

Керівник проектної групи
(гарант освітньої програми)

«Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

кандидат технічних наук, доцент _____ **Ігор ГАРАСИМЧУК**

ЗМІСТ

	Ст.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	5
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ ТА МЕТОДИ КЕРУВАННЯ ..	9
1.1. Безпосередній перетворювач частоти.....	9
1.1.1. Загальні відомості про перетворювач частоти	9
1.1.2. Класифікація перетворювачів частоти	10
1.1.3. Матричний перетворювач частоти.....	16
1.2. Загальні відомості про геометричний підхід	19
1.3. Трифазний матричний перетворювач частоти	28
1.4. Системи керування	31
1.4.1. Алгоритм скалярної модуляції.....	31
1.4.2. Просторово-векторна модуляція.....	38
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ БЕЗПОСЕРЕДНЬОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ.....	43
2.1. Аналіз МПЧ за геометричним підходом	43
2.2. Розрахунок силових елементів	55
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	61
3.1. Створення алгоритму керування.....	61
3.2. Моделювання в Simulink.....	67
3.3. Створення принципової електричної схеми	76
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	79
4.1. Опис ідеї проекту	80
4.2. Технологічний аудит	82
4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	83
4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту	88
4.5. Розроблення маркетингової програми.....	88
ВИСНОВКИ	91
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	93

ВСТУП

У наш час в країнах з розвиненою промисловістю найвищу долю електроенергії споживають електроприводи різного призначення. Автоматизація виробничих процесів і вдосконалення механізмів тісно зв'язані з розвитком електроприводу, що забезпечує економію електроенергії за рахунок згладжування перехідних процесів, більш ефективних функціонуючих режимів роботи і зменшення втрат. В даний час найбільш перспективним електроприводом визнаний електропривод змінного струму з частотним регулюванням [1].

На **актуальність роботи** вказує немала кількість публікацій, в різних наукових виданнях присвячених саме тематиці керування МПЧ, як в Україні, так і за кордоном.

Також актуальною є розробка алгоритмів керування матричним перетворювачем, що дозволяють наблизити форму споживаних струмів до синусоїдальної.

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

Робота була підготовлена відповідно до науково-дослідного плану кафедри електротехніки, електромеханіки і електротехнологій, Факультету енергетики та інформаційних технологій, Закладу вищої освіти "Подільський державний університет" і належить до пріоритетних напрямків в галузі електроенергетики, а також іншими галузевими програмами, в яких представлена стратегія вдосконалення енергосистем країни.

Мета і завдання роботи. *Метою роботи* є розвиток методу керування та аналізу напівпровідникових перетворювачів за допомогою геометричного підходу та його використання для безперебійного перетворювача частоти.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

- обрання схеми для досліджуваного МПЧ;

- визначення вхідних і вихідних параметрів обраного перетворювача частоти для використання геометричного підходу;
- побудову таблиць з усіма логічними станами ключів та вхідними і вихідними параметрами при цих станах;
- аналіз роботи на підвищеній та пониженій частотах;
- визначення матриць керування при кожній частоті, виведення базових матриць керування;
- моделювання отриманої системи керування;
- створення принципової електричної схеми.

Об'єкт дослідження – електромагнітні процеси у колі матричного перетворювача частоти.

Предмет дослідження – система керування МПЧ на основі геометричного підходу, з відповідним алгоритмом керування.

Методи дослідження. Аналітичний метод – для дослідження роботи МПЧ на пониженій та підвищеній частотах та виведення матриць переходів. Математичний метод – для доведення еквівалентності отриманих матриць та обрахунку силових елементів. Моделювання – для перевірки працездатності отриманої системи.

Наукова новизна.

1. Вперше створено систему керування МПЧ із використанням геометричного підходу для опису змінних, де за допомогою вхідного параметру обрано плечові напруги, а за вихідні параметри виступають вихідні фазні напруги та синусоїдальні струми фаз.

2. Вперше доведено еквівалентність матриць переходу з вхідних параметрів у вихідні на частотах 25 Гц та 150 Гц.

Особистий внесок здобувача полягає в самостійному огляді відповідної науково-технічної літератури, аналізі обраного МПЧ, виведення матриць переходів, розрахунку силових частини, моделюванні отриманої системи керування, створення електричної принципової схеми та написання коду програми для МК.

Апробація результатів дослідження. Основні теоретичні положення та результати магістерського дослідження доповідалися та обговорювалися на наукових, науково-технічних, науково-практичних конференціях:

1) III Всеукраїнська студентська науково-практична конференція «Ефективне використання енергії: стан і перспективи» (09 листопада 2023 року) / Заклад вищої освіти «Подільський державний університет».

Публікації. Валентин КУШНІР / дослідження трифазного матричного перетворювача частоти // III Всеукраїнська студентська науково-практична конференція «Ефективне використання енергії: стан і перспективи» (09 листопада 2023 року) / Заклад вищої освіти «Подільський державний університет». Кам'янець – Подільський. 2023.

Структура та обсяг роботи. Дипломна робота складається з чотирьох розділів (перетворювачі частоти та методи керування ними, аналіз безпосереднього перетворювача частоти, моделювання системи керування, розроблення стартап-проекту). Загальний обсяг роботи 101 сторінка, основного тексту – 97 сторінок, 57 рисунків, 32 таблиці, додатки та список використаних джерел.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У першому розділі було розглянуто принцип роботи і можливі типи перетворювачів частоти, серед яких виділено МПЧ. Розглянуто геометричний підхід для аналізу напівпровідникових перетворювачів на двох окремих прикладах коли за вихідні параметри обирались напруги на навантаженнях та струми фаз. Обрано схему досліджуваного БПЧ. За вхідні параметри обрано – плечові напруги, за вихідні – напруги на навантаженнях та струми фаз. Розглянуто можливі системи керування, серед яких виділено непряму просторово-векторну модуляцію.

У ході виконання другого розділу наглядно продемонстровано реалізування геометричного підходу під конкретне завдання. Побудовано таблицю з усіма логічно-можливими станами ключів та відповідними вхідними і вихідними параметрами при цих станах. Проведено аналіз на підвищеній та пониженій частотах (побудова відповідних часових діаграм, таблиць станів, виведення матриць переходів до напруг і до струмів). За допомогою елементарних перетворень над матрицями було доведено еквівалентність матриць переходів при різних частотах та обрано загальні матриці переходів. По обрахованій напрузі пробою колектор-емітер та максимальному струму колектора обрано модуль BSM100GB60DLCHOSA1 ($U_{ке} = 600\text{В}$, $I_{к} = 130\text{А}$), що повністю задовольняє потреби завдання.

У третьому розділі створено алгоритм для реалізації керування МПЧ за допомогою геометричного підходу на основі непрямой просторово-векторної модуляції. В якості мікроконтролера обрано ATmega328p та написано код для його програмування. За допомогою логічних блоків у Matlab Simulink змодельовано досліджувану систему керування. Як результат отримано часові діаграми напруг та струмів, що відповідають теоретичним. Побудовано принципову електричну схему досліджуваного МПЧ, з використанням МК, дешифратора та трьох датчиків напруги.

Також розроблено стартап-проект, висновками до якого можна зазначити, що проект має: можливість ринкової комерціалізації завдяки наявному попиту, динаміці ринку, рентабельності; має перспективи впровадження з огляду на потенційні групи клієнтів, стан конкуренції; має достатньо сильних сторін та можливостей щоб вийти на ринок збуту, а також є доцільним подальша розробка проекту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сучасні перетворювачі частоти в системах електропривода : навч. посібник / М. В. Загірняк, Т. В. Коренькова, А. П. Калінов, А. І. Гладир, В. Г. Ковальчук. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – Харків: Видавництво «Точка», 2017. – 206 с.
2. Rahul Dixit, Bindeshwar Singh, Nupur Mittal Adjustable speeds drives: Review on different inverter topologies : technical journal. Sultanpur, India : International Journal of Reviews in Computing, 2012. pp. 54-66.
3. Marian P. Kazmierkowski, Leopoldo G. Franquelo, Jose Rodriguez, Marcelo A. Perez, Jose I. Leon High-Performance Motor Drives : technical journal. Venezuela : IEEE Industrial Electronicsd № 3, 2011. pp. 6-26.
4. Перетворювач частоти : Стаття про перетворювачі частоти. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Frequency_changer.
5. Сенько В.І., Трубіщин К.В., Чибеліс В.І. Інвертори і перетворювачі частоти : монографія — Київ : Видавництво Ліра-К, 2020. — 300 с.
6. Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти: Навчальний посібник / М.М.Казачковський. - Дніпропетровськ: НГА України, 2000. - 197 с.
7. Правила улаштування електроустановок : [арх. 15 березня 2020] / Міненерговугілля України. — Київ : [б. в.], 2017. — 617 с.
8. Соїч А.В. Електронна система контролю тиску в мережі водопостачання : канд. бак. : Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського . Київ, 2018. 100 с.
9. Ryan M.J., Lorenz R.D., R. De Doncker Modeling of multileg sine-wave inverters: a geometric approach : technical journal. USA : IEEE Trans. Ind. Electron., № 6, 1999. pp. 1183–1191.
10. ДСТУ 3569-97 Енергозбереження нетрадиційні та поновлювані джерела енергії. Основні положення (ГОСТ 30514-97). Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25862.

11. Жуйков В.Я., Миколаєць Д.А. Застосування геометричного підходу для трифазного силового активного фільтру : наук.-тех. журнал. Київ: Технічна електродинаміка, №5, 2018. 35–38 с.
12. Blaabjerg F., Casadei D., Klumpner C., Matteini M. Comparison of two current modulation strategies for matrix converters under unbalanced input voltage conditions : technical journal. USA : IEEE Trans. on Industrial Electronics., №2, 2002. pp. 289–295.
13. Casadei D., Serra G., Tani A. A general approach for the analysis of the input power quality in matrix converters : technical journal. Baveno, Italy : Proc. IEEE-PESC, 1996. pp. 1128–1134.
14. Casadei D., Serra G., Tani A. Reduction of the input current harmonic content in matrix converters under input/output unbalance : technical journal. , Orlando, Florida : Proc. of IEEE-IECON, 1995. pp. 457–462.
15. Casadei D., Serra G., Tani A. Reduction of the input current harmonic content in matrix converters under input/output unbalance : technical journal. USA : IEEE Trans. on Industrial Electronics, №3, 1998. pp. 401–411.
16. Nielsen P., Casadei D., Serra G., Tani A. Evaluation of the input current quality by three different modulation strategies for SVM controlled matrix converters with input voltage unbalance : technical journal. Delhi, India : Proc. of IEEE-PEDES, 1996. pp. 794–800.
17. 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 : наук.-тех. журнал. Київ : Технічна електродинаміка, №3, 2016. 33-25 с.
18. Теорія автоматичного управління: Навчальний посібник [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. ; уклад.: О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков, В.П. Бунь. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 144 с.

19. Теорія автоматичного керування. Сучасна теорія керування: Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: А. О. Данькевич, В. С. Цапар – Електронні текстові дані (1 файл: 1,21 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 30 с.
20. Волох П.В., Цоколенко М.П., Ревенко Л.В., Грічаненко В.А. та ін. Довідникова книга з електроенергетики : Навчальний посібник – К.: Аграрна освіта, 2014. – 506 с. 21. 22. 23. 24. 25. 26. 27.
21. ДНАОП 0.00-1-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. – К.: Укрархбудінформ, 2001. – 117 с.
22. Електропривод: Підручник / Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко, П.І. Савченко [та інш.]; за ред. Ю.М. Лавріненка. – К.: «Ліра-К», 2009. – 504 с.
23. Електропривод: ч.1 / О.С. Марченко, Ю.М. Лавріненко, П.І. Савченко, Є.Л. Жулай; За ред. О.С. Марченка. – К.: Урожай, 2010. – 208 с.
24. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. та ін. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводами. Навч. посіб. за напрямом «Електромеханіка» / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін. – К.: Либідь, 2005. – 680 с. Ч1.
25. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. та ін. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посіб. за напрямом «Електромеханіка» / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін. – К.: Либідь, 2005. – 680 с. Ч2.
26. Булгар В.В. Теорія електроприводу: збірник задач. / ОНПУ Одеса: Поліграф, 2006 – 408 с.
27. Енергозбереження. Посібник для загальноосвітньої школи, Львів: Праховник А.В., Мельникова О.В., Конеченков А.Є., Іншеков Є.М., Дешко В.І. / Політра Друку, 2003, - 92 с.
28. Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електропривода.-К.: Кондор, 2005.-408с.

29. Системи керування електроприводами. Видання 2: Навч. посібник з дисципліни «Системи керування електроприводами» (для студентів денної і заочної форми навчання)/ – Краматорськ: ДДМА, 2018. – 225 с.

30. Косенко Р.А. Моделювання систем векторного керування асинхронним двигуном : техн. журнал. Чернігів : «Вісник», № Технічні науки, 2012. 12-17 с.

31. Соїч А.В., Миколаєць Д.А. Керування матричним перетворювачем частоти з використанням геометричного підходу : техн. журнал. Київ : Електронна та Акустична інженерія, №1, 2019. 35-38 с.

32. Соїч А.В., Миколаєць Д.А. Керування безпосереднім перетворювачем частоти за допомогою геометричного підходу : техн. журнал. Київ : Мікросистеми, електроніка та акустика, 2019.

33. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Режим доступу: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://kubg.edu.ua/images/stories/podii/2017/06_21_posylannia/dstu_8302.pdf. – Назва з екрана

34. Михальський В.М., Соболев В.М., Чопик В.В., Шаповал І.А. Розширення діапазону керування вхідної реактивною потужністю матричних перетворювачів засобами керування : техн. журнал. Київ : Технічна електродинаміка, №2, 2012. 53-54с.

35. Technical Information IGBT-module BSM 100 GB 60 DLC – опис IGBT-модулю BSM 100 GB 60 DLC CHOSA1: Eupec: 2000. 9 с.

36. Atmel 42735B 8-bit AVR Microcontrollers – datasheet complete ATmega328p: 2016. 442 p.

37. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки Структура і правила оформлення ДСТУ 3008-2015. Режим доступу: https://science.kname.edu.ua/images/dok/derzhstandart_3008_2015.pdf. – Назва з екрана.

38. Розроблення стартап-проекту : методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій URL: http://kaf-pe.kpi.ua/wp-content/uploads/2015/04/roz_startap_proektiv_met_vk.pdf.

39.Методичні рекомендації щодо виконання та оформлення кваліфікаційної роботи магістра / Т.Д.Гуцол, Л.М.Михайлова, І.Д.Гарасимчук, В.М.Дубік, О.В.Ткач, П.В.Потапський. (За загальною редакцією Михайлової Л. М.) – ПДАТУ, 2019. – 30 с.

40. Система дистанційного навчання Moodle 2.7. – «ЗВО «ПДУ»». Режим доступу: <http://pdatu.net.ua/>.– Назва з екрана.

41. Основи безпечної експлуатації електроустановок: Підручник / С. В. Панченко, О. І. Акімов, М. М. Бабаєв та ін. – Харків: УкрДУЗТ, 2021. – 149 с.

42. Електробезпека: Підручник / С. В. Панченко, О. І. Акімов, М. М. Бабаєв та ін. – Харків: УкрДУЗТ, 2018. – 295 с.

43. Жидацький В.Ц. Основи охорони праці:Підручник.-Л.:Афіша,2002.- 320 с.