

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія

Бакаєва Анастасія Олександрівна

УДК 621.316.722.1

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КВАЗІРЕЗОНАНСНИХ ІМПУЛЬСНИХ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ СИСТЕМ ПРЕЦИЗІЙНОГО
ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Автореферат кваліфікаційної роботи магістра

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, доцент кафедри
«Електромеханічні системи
автоматизації».

Рецензент:

Разживін О.В.

Захист відбудеться «_24» грудня 2020 р. о _11_ годині 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

Актуальність теми.

Спочатку джерела живлення електродвигунів виконувалися на основі лише безперервного регулювання, тому розрахунок їх динамічних характеристик не був пов'язаний з принциповими труднощами. Основу методів їх розрахунку становила класична теорія управління і регулювання. Безперервні (лінійні) джерела живлення розробляються і в даний час, однак, діапазон їх застосування постійно звужується через невисокі техніко-економічних характеристик.

Уже порівняно давно в якості джерел живлення для електродвигунів широко використовуються імпульсні перетворювачі, в основному на базі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Ці перетворювачі мають високий коефіцієнт корисної дії (ККД) і хороші масогабаритні показники, але в той же час вони генерують в ефір і мережу живлення значний рівень електромагнітних завад.

В даний час, при розробці джерел живлення електроприводу, питання якісної стабілізації пavidкості, електромагнітної сумісності з мережею живлення вирішуються комплексно на підставі новітніх досягнень технології виробництва силових напівпровідникових приладів і мікросхемотехніки.

Сучасний рівень елементної бази силової електроніки - потужних повністю керованих напівпровідникових приладів, магнітних матеріалів, конденсаторів - дозволяє розробляти малогабаритні і надійні ключі в інтегральному виконанні, що працюють в мегагерцовому частотному діапазоні, коли в якості фільтруючих ланцюгів виступають паразитні параметри схеми.

Реалізація можливостей сучасної елементної бази, з метою досягнення граничних характеристик джерел живлення електродвигунів, пов'язане з глибоким вивченням процесів, що протікають в їх енергетичних та інформаційних каналах з урахуванням специфіки режимів енергоперетворення, управління. Зокрема, на високих частотах зростає вплив перешкод, а також параметрів силових приладів і фільтрів на динамічні процеси в перетворювачі, що змушує шукати нові принципи побудови ключових елементів і ланцюгів зворотного зв'язку.

В останнє десятиліття в стадії інтенсивних досліджень знаходяться ключові елементи на основі квазірезонанса, перемикання яких відбувається при нульовому струмі або ж при нульовій напрузі. Використання квазірезонансних ключів значно підвищує енергетичні, динамічні і питомі характеристики джерел живлення, електромагнітну сумісність з мережею живлення. Робота таких перетворювачів на високій частоті також сприяє зменшенню пульсацій швидкості електродвигуна.

В даний час квазірезонансного перетворювачі в основному використовуються у вторинних джерелах електроживлення радіоелектронної апаратури. Аналіз вітчизняних і зарубіжних літературних джерел показав, що питанням використання квазірезонансних імпульсних перетворювачів для живлення електродвигунів приділяється дуже мало уваги, але потреба в таких дослідженнях існує.

Таким чином, постає необхідність в дослідженні динамічних процесів в квазірезонансних імпульсних перетворювачах (КРП) постійної напруги з навантаженням у вигляді двигуна з метою підвищення техніко-економічних характеристик джерел живлення для електродвигунів.

Актуальність аналізу квазірезонансних перетворювачів для систем прецизійного електроприводу викликана необхідністю підвищення якості технологічних процесів та надійності експлуатації обладнання, так і вимогою вдосконалення алгоритмів систем контролю і прогнозування теплового стану двигуна в різних режимах.

Тому розробка і дослідження квазірезонансних перетворювачів дозволить створювати більш досконалі електроприводи на базі двигунів постійного струму, які будуть мати високу конкурентоспроможність в порівнянні з іншими приводами.

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

Вибір напрямку досліджень здійснено у відповідності до Закону України від 11.07.2001 р. № 2623-III «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» та змінам до цього закону від 09.09.2010 р. № 2519-VI (2519-17), а також постанови Президії Національної Академії Наук України від 22.10.2010 р. № 294 «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки на період до 2020 року».

Робота виконана в рамках держбюджетної теми кафедри «Електромеханічні системи автоматизації» ДДМА, «Розробка та дослідження електронних та

електромеханічних систем перетворення електричної енергії з використанням сучасних цифрових засобів автоматизації».

Мета і задачі дослідження.

Метою кваліфікаційної роботи є подальший розвиток теорії і практики квазірезонансних імпульсних перетворювачів та розробка на цій основі рекомендацій щодо створення нових перетворювачів з підвищеною якістю для використання в точному електроприводі постійного струму.

Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні завдання.

- дослідження електромагнітних процесів в квазірезонансних імпульсних перетворювачах, що перемикаються при нульовому струмі (КРП-ПНТ) з навантаженням у вигляді двигуна постійного струму (ДПС);
- визначення статичних характеристик КРП-ПНТ з ДПС; знаходження пульсацій струму і швидкості двигуна постійного струму;
- визначення алгоритму роботи системи управління КРП-ПНТ, оптимальної за швидкодією;
- електронне моделювання КРП з ДПС для уточнення теоретичних результатів дослідження;
- розробка лабораторних зразків КРП-ПНТ для живлення електроприводу;
- розробка рекомендацій по областях найбільш ефективного застосування КРП в прецизійному електроприводі.

Об'єктом дослідження є квазірезонансний імпульсний перетворювач, перемикається при нульовому струмі, з навантаженням у вигляді двигуна постійного струму.

Предметом дослідження є електромагнітні процеси в квазірезонансного імпульсному перетворювачі, перемикає при нульовому струмі з двигуном постійного струму; механічні характеристики двигуна постійного струму з КРП-ПНТ, оптимізація системи управління КРП-ПНТ за швидкодією.

Методи досліджень – при вирішенні поставлених у кваліфікаційної роботи завдань використовувалися методи математичного моделювання; чисельні методи обчислень, методи теорії автоматичного керування, метод припасування по інтервалах сталості структур

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Для прецизійного електропривода існує варіант побудови силового перетворювача з квазірезонансним принципом роботи.
2. Для перетворювача можна використовувати напівпровідникові ключі з підвищеною частотою комутації та меншою потужністю.
3. Отримано модель електропривода, яка дозволяє імітувати режими роботи квазірезонансного перетворювача з ДПС та дозволяє наглядати вид перехідних процесів на силовому обладнанні.

Практичне значення отриманих результатів:

1. В роботі систематизовано інформацію що до перетворювачів для ДПС, обґрунтовані і синтезовані основні принципи керування квазірезонансними перетворювачами для застосування в прецизійному електроприводі, наприклад, для пристроїв магнітного запису.
2. В роботі показано, що керування двигуном квазірезонансним перетворювачем підвищує ККД та швидкодію електропривода.

Особистий внесок здобувача полягає у розробці методики забезпечення оптимальних параметрів керування СУ КРП ПНС.

Апробація результатів магістерської роботи. Результати досліджень обговорювались на щорічній науковій конференції студентів ДДМА, м. Краматорськ, 2019 р.

Публікація результатів наукових досліджень.

Матеріали магістерської роботи опубліковано в науковій статті у фаховому виданні «Вісник Донбаської державної машинобудівної академії» (перереєстровано – Наказ МОН України № 326 від 04.04.2018).

Структура і обсяг магістерської роботи.

Кваліфікаційна робота складається із вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг магістерської роботи становить 156 сторінок, включаючи 49 рисунків та 15 таблиць. Список використаних джерел містить 94 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У **першому розділі** виконується аналіз доцільності застосування квазірезонансних імпульсних перетворювачів в електроприводи постійного струму.

Рішення соціальних і економічних задач нашого суспільства на сучасному етапі неможливо без повної електрифікації всіх галузей народного господарства, що передбачає, насамперед, автоматизацію і комплексну механізацію виробничих і технологічних процесів. При цьому найважливіша роль у реалізації цих завдань належить електричному приводу, що у даний час є основним видом приводу найрізноманітніших виробничих і транспортних механізмів, пристроїв водо- і газопостачання, сільського господарства, побутових пристроїв, засобів телевізійної і космічної техніки, медичного апаратури. У сучасному технічному світі технологій часто використовуються електроприводи постійного струму. Незважаючи на те, що електропривод змінного струму майже витіснив даний напрямок, практично у всіх сферах машинобудування, і не тільки, є багато пристроїв, верстатів і пристосувань, для виконання прецизійних робіт, де електропривод постійного струму буде надійніше і точніше.

Завдання кваліфікаційної роботи – вдосконалення електроприводу на основі КРП ПНС, зменшити габарити електроприводу за рахунок високої частоти перетворення, підвищити ККД, за рахунок зниження динамічних втрат потужності на силових ключах, перемикаються при нульовому струмі, знизити пульсації вихідного струму і швидкості електроприводу, поліпшити електромагнітну сумісність з мережею живлення.

Вирішення поставлених завдань дозволить створювати більш досконалі електроприводи постійного струму, які будуть мати високу конкурентоспроможність в порівнянні з іншими приводами.

У другому розділі розглядаються методи наукових досліджень, наводиться послідовність етапів побудови математичної моделі.

Дослідження має два основні рівні – емпіричний і теоретичний.

Будь-яке наукове дослідження розпочинається зі збору, систематизації та узагальнення фактів. Розрізняють факти дійсності і наукові факти. Факти дійсності – це події, явища та процеси, які відбувалися або відбуваються в реальній дійсності; вони є різними сторонами, властивостями, відношеннями досліджуваних об'єктів. Наукові факти – це відображені у свідомості дослідника факти дійсності, що перевірені, усвідомлені та зафіксовані мовою науки як емпіричні судження.

Емпіричний рівень дослідження складається з двох стадій (етапів).

На першій стадії відбувається процес отримання фактів. Використовуючи різні шляхи та прийоми, дослідник вичленовує і накопичує факти – емпіричну основу наукового дослідження.

Друга стадія передбачає первинну обробку, систематизацію та оцінку фактів у їх взаємозв'язку, тобто осмислення і жорсткий опис здобутих фактів у термінах наукової мови, їхню класифікацію та виявлення залежностей між ними.

На емпіричному рівні дослідження вирішуються такі пізнавальні завдання:

– збирання необхідного фактичного матеріалу про досліджуваний об'єкт, який є фундаментом дослідження і без яких неможливо побудувати ефективну наукову теорію;

– отримання даних про різноманітні властивості та зв'язки емпіричного об'єкта, тенденції його руху та розвитку, що сприяє формалізації знання та широкому використанню кількісних методів при побудові наукових теорій;

– розробка схем, діаграм, картограм тощо, в яких фіксується і відображається стан досліджуваного об'єкта, його структура, розвиток, динаміка поведінки;

– класифікація наукових фактів і даних, котрі в узагальненому вигляді називаються емпіричною інформацією.

У **третьому розділі** виконано аналіз електромагнітних процесів в квазірезонансному імпульсному перетворювачі з двигуном постійного струму

Для проектування імпульсних перетворювачів для електроприводу постійного струму крім усього іншого важливо знати характеристики електромагнітних процесів, що протікають в приводі. Ці процеси в значній мірі будуть впливати на енергетичні, питомі і економічні характеристики системи електроприводу. За виразами для електромагнітних процесів можна буде розрахувати необхідні параметри активних і пасивних елементів схеми перетворювача, висунути вимоги до системи управління.

В цьому розділі встановлено характер, отримані вирази і розраховані параметри електромагнітних процесів в однополуперіодним і двопівперіодним квазірезонансним імпульсним перетворювачі з перемиканням силового ключа при нульовому струмі з навантаженням у вигляді двигуна постійного струму.

У **четвертому розділі** досліджуються характеристики квазірезонансного імпульсного перетворювача з двигуном постійного струму

Стабільність частоти обертання двигуна електроприводу є одним з найважливіших параметрів. Мається на увазі стабільність середньої швидкості за один оборот і стабільність миттєвої частоти обертання. У КРП з ДПС здійснюється частотне регулювання швидкості в широких межах. У діапазоні низьких частот пульсації швидкості зростають. Важливо визначити рівень цих пульсацій, що дозволяє оцінити точність стабілізації швидкості і жорсткість механічних характеристик електроприводу в розімкнутій і в замкнутій системах. У замкнутій системі жорстка механічна характеристика дозволяє забезпечити бажану стабільність швидкості з меншими значеннями коефіцієнта посилення, що розширює запас стійкості. На виході КРП включається резонансний контур, тому, в порівнянні з ППП, його механічна характеристика буде м'якшою, що вимагатиме збільшення коефіцієнта посилення системи для досягнення необхідної якості стабілізації швидкості.

Регульовальна характеристика в КРП за своїм характером така ж, як і в ППП, якщо розглядати її щодо скважності керуючих імпульсів. Однак в КРП

регулювання вихідної напруги здійснюється за допомогою зміни частоти керуючого сигналу. Процес регулювання частоти впливає і на енергетичні характеристики приводу, зокрема на коефіцієнт корисної дії, і коефіцієнт гармонік споживаного від мережі струму.

Ці характеристики не піддаються суворому аналітичному розрахунку через неможливість врахування впливу протидії ЕРС двигуна. В наслідок цього є спроба знайти наближене аналітичне рішення, зробивши припущення про незмінність протидії ЕРС двигуна, що відповідає режиму, коли зміна частоти і навантаження відбуваються в нескінченно малому діапазоні.

У **п'ятому розділі** здійснюється розробка нової силової частини КРПП ПНС та дослідження електропривода за допомогою системи управління, виконаної на базі мікроконтролера Arduino Uno та DDS генератора AD9850.

На підставі теоретичних і практичних результатів, отриманих в попередніх розділах, розроблено реверсивний двонапівперіодний КРПП-ПНС для електроприводу постійного струму, що працює від джерела постійної напруги. Перетворювач призначений для систем прецизійних верстатів, устаткування для позиціонування, провідного двигуна, шпинделя накопичувача на оптичних дисках і т.д.

Силову частину перетворювача, яка виконана як окремий модуль, можна використовувати і в інших областях, застосувавши відповідну систему управління.

У **шостому розділі** здійснено техніко-економічне обґрунтування виконаних досліджень. Розраховано оціночні результати вкладу магістра у наукові дослідження по кваліфікаційної роботі.

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

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішена актуальна задача поліпшення параметрів точного електроприводу постійного струму і підвищення якості електроенергії в мережі. Проведено аналіз квазірезонансних імпульсних перетворювачів з навантаженням у вигляді двигуна постійного струму і отримані нові науково обгрунтовані теоретичні і практичні результати, які є істотними для подальшого розвитку теорії імпульсних перетворювачів і розробці на їх основі нових перетворювачів підвищеної якості для використання в прецизійному електроприводі. Основні наукові і практичні результати полягають у наступному.

1. Обгрунтовано необхідність подальшого розвитку теорії та практики КРП з навантаженням у вигляді ДПТ. Отримані результати дозволяють створити нові КРП для використання в електроприводі постійного струму з метою підвищення його якісних показників.

2. Досліджено електромагнітні процеси в КРП-ПНТ з ДПТ, встановлений їх вид і характер у вигляді математичних виразів, що зв'язують між собою параметри перетворювача і двигуна. Отримані вирази дозволяють врахувати специфіку КРП-ПНТ, як ланки системи точного електроприводу постійного струму.

3. Встановлено, що під впливом протидії ЕРС якоря ДПТ у однополуперіодного КРП-ПНТ змінюється тривалість першого комутаційного інтервалу в два рази, а другого - в кілька разів, що говорить про необхідність застосування схеми контролю проходження струму ключа через нуль. У двоівперіодним КРП-ПНТ тривалість першого комутаційного інтервалу практично не залежить від протидії ЕРС якоря і в цьому випадку немає необхідності в контролі проходження струму силового ключа через нуль.

4. Проаналізовано вплив КРП-ПНТ на статичні характеристики ДПС. Встановлено, що при використанні КРП-ПНТ для живлення ДПС імпульсні механічні характеристики останнього нелінійні і м'якше ніж у ШИП з ДПС, де

аналогічні характеристики лінійні. Особливо це проявляється в діапазоні малих навантажень. З двухполуперіодним КРП-ПНТ механічні характеристики жорсткіше, ніж з однополуперіодним КРП-ПНТ, а рівень пульсацій швидкості ДПС менше і слабо залежить від навантаження.

5. Доведено ефективність оптимізації системи управління КРП-ПНТ по швидкодії. Розраховані відповідні рівні і моменти перемикання керуючого впливу.

6. Обґрунтовано доцільність використання КРП-ПНТ в прецизійному електроприводі і розроблені відповідні рекомендації. При цьому, за порівняно з ШП, поліпшується електромагнітна сумісність з живильної мережею, забезпечується менший рівень перешкод і більш високі енергетичні і масогабаритні показники.

АНОТАЦІЯ

Бакаєва А.О. Розробка та дослідження квазірезонансних імпульсних перетворювачів для систем прецизійного електроприводу постійного струму.

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

Магістерська робота складається із вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг магістерської роботи становить 156 сторінки, включаючи 49 рисунків та 15 таблиць. Список використаних джерел містить 94 найменувань.

Метою кваліфікаційної роботи є подальший розвиток теорії і практики квазірезонансних імпульсних перетворювачів та розробка на цій основі рекомендацій щодо створення нових перетворювачів з підвищеною якістю для використання в прецизійному електроприводі постійного струму.

Основні наукові та практичні результати магістерської роботи:

1. В роботі систематизовано інформацію що до перетворювачів для ДПС, обґрунтовані і синтезовані основні принципи керування квазірезонансними перетворювачами для застосування в прецизійному електроприводі.

3. Отримано модель електропривода, яка дозволяє досліджувати режими роботи квазірезонансного перетворювача з ДПС та дозволяє наглядати вид перехідних процесів на силовому обладнанні.

3. Виконано дослідження електромеханічної системи.

4. В роботі показано, що керування двигуном квазірезонансним перетворювачем підвищує ККД та швидкодію електропривода.

Ключові слова: ПРЕЦИЗІЙНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, ДВИГУН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ, КВАЗІРЕЗОНАНСНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

ANNOTATION

Bakaeva A.O. Development and research of quasi-resonant pulse converters for precision DC electric drive systems.

Master's thesis in specialty 141 - "Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics", Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, 2020.

The master's thesis consists of an introduction, seven sections, general conclusions, a list of sources used. The total volume of the master's thesis is 156 pages, including 49 figures and 15 tables. The list of used sources contains 94 names.

The purpose of the qualification work is the further development of the theory and practice of quasi-resonant pulse converters and the development on this basis of recommendations for the creation of new converters with improved quality for use in precision DC drive.

The main scientific and practical results of the master's work:

1. The information on converters for DPS is systematized in the work, the basic principles of control of quasi-resonant converters for application in the precision electric drive are substantiated and synthesized.

3. An electric drive model is obtained, which allows to study the modes of operation of a quasi-resonant converter with DPS and allows to observe the type of transients on the power equipment.

3. The study of the electromechanical system is performed.

4. The paper shows that controlling the motor with a quasi-resonant converter increases the efficiency and speed of the electric drive.

Keywords: PRECISION ELECTRIC DRIVE, DC MOTOR, QUASI-RESONANCE CONVERTER, ELECTRICAL CIRCUIT, ENERGY EFFICIENCY

Бакаєва Анастасія Олександрівна

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КВАЗІРЕЗОНАНСНИХ ІМПУЛЬСНИХ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ СИСТЕМ ПРЕЦИЗІЙНОГО
ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

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