

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Козія Володимира Богдановича

«Покращення характеристик безредукторних приводів на основі синхронного двигуна з постійними магнітами та електронним комутатором»,
представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Актуальність теми. Як відомо, безредукторні електроприводи (БЕП) порівняно із традиційними редукторними електроприводами здатні забезпечити підвищення надійності та енергетичної ефективності механізмів, а для високоточних електроприводів – зменшення похибок регулювання. У БЕП механічна редукція швидкості замінюється електромагнітною, а це визначає збільшення габаритів двигуна за рахунок багатополосної конструкції машини.

Синхронні машини з постійними магнітами (СМПМ) є перспективними для використання у БЕП, оскільки здатні забезпечити високу енергетичну ефективність при порівняно високому повітряному проміжку. Виділяють два класи задач, пов'язаних із використанням систем прямого приводу: розроблення систем дискретної комутації обмоток на основі сигналів від точкових давачів кутового положення ротора (ДКПР), які можна реалізувати на основі відносно простих і недорогих технічних засобів, а також систем комутації обмоток для високоточних механізмів, які характеризуються вимогами щодо зменшення пульсацій моменту і вимагають використання неперервних ДКПР.

Разом з тим, особливості поведінки СМПМ у БЕП, зумовлені їх багатополосною конструкцією, є ще недостатньо вивченими і описаними у літературі. Підсумовуючи, можна сказати, що вивчення особливостей комутації обмоток якоря СМПМ, які використовуються у БЕП і зумовлені їх особливостями власне для такого типу систем, є *актуальною* задачею.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що на основі одержаних аналітичних виразів, основні параметри, енергетичні та масогабаритні показники багатополосної СМПМ для БЕП можна порівняти із параметрами та показниками базової двополосної СМПМ для електроприводів традиційного компонування (з редуктором). Це дає змогу проаналізувати особливості БЕП та використати ці особливості при побудові системи керування.

Розроблений метод дискретної комутації обмоток якоря СМПМ на основі точкових ДКПР, який названо квазісинусоїдною (КС) комутацією, забезпечує формування синусоїдального закону зміни щільностей ШІМ фазних напруг, що дає змогу знизити рівень пульсацій електромагнітного моменту порівняно з традиційними методами, а при квазіоптимальному регулюванні кута узагальненого вектора напруги якоря у функції миттєвої вхідної потужності, дозволяє зменшити електричні втрати енергії в якорі.

Розроблений спосіб опрацювання е.р.с. інформаційної трифазної обмотки якоря з використанням прийомів вирізання та усереднення дозволяє визначати кутове положення ротора та кутову швидкість СМПМ із високою завадостійкістю та низькою чутливістю до кутових, амплітудних похибок та гармонічних відхилень від синусоїдальності.

Практична цінність роботи полягає в тому, що розроблені системи комутації обмоток є перспективними для використання у БЕП на основі СМПМ. Зокрема, системи дискретної комутації можуть використовуватись для БЕП широкого призначення, а системи неперервної комутації перспективні до використання у системах слідкування чи наведення.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації. Ступінь обґрунтованості одержаних у дисертації наукових положень і висновків підтверджується виконанням досліджень із застосуванням фундаментальних положень теорії електричних машин, автоматизованого електропривода і теорії автоматичного керування.

Основні наукові положення і висновки дисертаційної роботи підтверджено результатами комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень на макетних зразках БЕП.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності. Дисертація складається із вступу, 5 розділів та висновків, додатку на 3 сторінках і 118 назв використаної літератури на 12 сторінках. Обсяг роботи – 204 сторінок друкованого тексту, в тому числі основний текст на 146 сторінок; містить 99 рисунків, 6 таблиць.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і задачі досліджень, викладено наукову новизну і практичну цінність одержаних результатів, наведено дані про публікації та апробацію матеріалів досліджень, результати впровадження.

У *першому розділі* на основі аналізу особливостей редукторних та безредукторних електроприводів визначено перспективні сфери їх застосування у робототехніці, системах наведення та слідкування різноманітного призначення, у приводах різних транспортних засобів, вітроелектричних установках, ліфтах, і т. д. Проаналізувавши основні типи електричних машин для БЕП, зроблено висновок про те, що для таких систем через низку причин найбільше підходить СМПМ. На основі аналізу способів комутації обмоток якоря СМПМ зроблено висновок по сфері їх застосування. За підсумком проведеного аналізу сформульовано завдання дослідження.

Висновки базуються на основі аналізу низки джерел, як вітчизняних, так і у міжнародних визнаних журналах високого рівня, що підтверджує знайомство дисертанта із сучасними тенденціями і є додатковим доказом актуальності вибраної теми.

Другий розділ присвячено порівняльному розрахунку основних параметрів та показників роботи СМПМ при рівності потужності та осьової довжини з різною кількістю пар полюсів. Одержано вирази у відносних одиницях у порівнянні з базовою двополюсною СМПМ. Зроблено висновки

стосовно особливостей багатополосної СМПМ для систем прямого приводу, які мають бути враховані при розробці відповідних систем керування. Зокрема, це зменшення електромагнітної сталої часу обмотки якоря, що приводить до збільшення пульсацій струму, і відповідно, електромагнітного моменту; незначне зростання електромеханічної сталої часу, що дозволяє забезпечити високу швидкодію регулювання кутової швидкості; при цьому, як показано, маси редукторного та БЕП в цілому співмірні.

У *третьому розділі* досліджено та проаналізовано показники традиційних систем електронної дискретної комутації у порівнянні з розробленими системами для СМПМ з синусоїдальною та трапецевидною е.р.с. Зокрема, запропоновано системи низкопульсаційних ШПМ, які дозволяють знизити пульсації струму якоря та електромагнітного моменту; запропоновано системи КС комутації, призначені для роботи з дискретними ДКПР, які дають широкі можливості для побудови систем керування простими засобами, при цьому забезпечуючи суттєве підвищення енергетичних характеристик; показано, що перспективною для БЕП є двоякірна СМПМ із кутовим зміщенням якорів, рівним половині дискрети встановлення точкових ДКПР, яка забезпечує суттєве зниження пульсацій електромагнітного моменту.

Четвертий розділ присвячено розробці системи неперервної комутації обмоток якоря СМПМ в БЕП, що є перспективною для об'єктів, для яких важливі точність позиціонування, слідкування, стабільність обертання з інфранизькими швидкостями, а також забезпечення високих рівнів кутових швидкостей і прискорень в інших режимах. Пропонується розміщення на якорі трифазної інформаційної обмотки, яка виконує роль неперервного ДКПР. Розроблений алгоритм обробки вихідних напруг інформаційних обмоток, який є досить гнучким для побудови різних алгоритмічних варіацій. Запропоновано прийоми вирізання та усереднення, які дають змогу суттєво знизити рівень відносної похибки визначеної кутової швидкості.

У п'ятому розділі наводяться результати експериментальних досліджень, а також описано розробки систем прямого приводу, у яких знайшли застосування результати дисертаційного дослідження, зокрема, камери спостереження, башти бронетранспортера, приводу мотор-коліс роботизованого комплексу, а також інших, які використовувались для науково-дослідних робіт у Національному університеті «Львівська політехніка».

Текст дисертації викладено грамотною технічною мовою, логічно і послідовно. Стиль викладу – системний і доказовий.

У цілому дисертація є завершеною науковою роботою, що відповідає паспорту спеціальності 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях. Результати дисертаційної роботи викладено у 14 наукових працях: 7 статей у фахових виданнях України з технічних наук, 1 стаття в науковому періодичному виданні іншої держави, 3 статті у збірниках наукових праць, 2 матеріали міжнародних конференцій (серед яких 1 індексовано в наукометричній базі Scopus), 1 патент України на корисну модель. Публікації та їх зміст відповідають темі дисертації, у повній мірі відображають її наукові положення, практичні результати і висновки; підтверджують оприлюднення всіх результатів досліджень.

Текст автореферату відповідає змісту дисертації, відображає одержані у ній основні положення, результати та висновки.

Важливість одержаних у дисертаційній роботі результатів для науки та практики полягає у вирішенні актуальної науково-прикладної задачі розробки систем електронної комутації СМПМ для їх використання у БЕП із врахуванням тих особливостей, які визначаються багатополюсною конструкцією машини.

Практичне значення роботи підтверджується також використанням її результатів у низці держбюджетних та госпдоговірних науково-дослідних робіт.

Недоліки та зауваження по роботі.

1. У висновках до другого розділу на с. 87 за №3 вказано, що значне зниження електромагнітної сталої часу обмотки якоря у багатополісній СМПМ «дозволяє у низці випадків взагалі обійтися без контуру регулювання струмів», хоча у тексті розділу про це не йдеться.

2. На с. 99 описано, що «Аналіз показав, що найбільший внесок у пульсацію моменту вносить стрімке зниження лінійного струму, коли після закривання чергового транзистора він змушений замикатися через зворотні діоди інвертора і конденсатор ланки постійної напруги U_{dc} ». Однак, у тексті інформацію про проведений аналіз не наведено.

3. У тексті роботи вказано, що для формування необхідних для реалізації низькопульсаційних ШІМ діаграм керуючих сигналів «довелось скористатись великою кількістю логічних операторів, наявних у середовищі Matlab/Simulink». Самі алгоритми перемикання можна оцінити із вигляду відповідних підсистем на рис. 3.10 – 3.12, однак для кращого сприйняття бажано було б описати використані алгоритми.

4. На с. 102 наведено параметри використаного для комп'ютерних моделей електромеханічного перетворювача, однак не вказано, звідки взято ці параметри.

5. На рис. 3.14 наведено комп'ютерну модель БАП з системою керування підпорядкованого типу. Можливо, самі параметри системи керування не є суттєвими, оскільки вона використовувалась тільки для виходу до усталеного режиму. Разом з тим, вважається, що опис експерименту повинен давати можливість його відтворити, тому доцільним було б навести параметри регуляторів.

6. На с. 110 вказано, що для трапецевидної форми е.р.с. «як і очікувалося, кращі результати (нижчу відносну пульсацію моменту δM) забезпечує 120° система комутації». Разом з тим, про міркування, чому ця система комутації повинна забезпечувати кращі результати, вище в тексті не йдеться.

7. Рис. 3.26 на с. 125 важко сприймається.

8. Не вказано, який фізичний зміст мають від'ємні к.к.д. у моменти часу 0,4 – 0,45 с на рис. 3.28, 3.30 (с. 128) і на рис. 3.31 (с. 130).

9. На рис. 133 описано, що “окремі дослідження показали, що максимальне зниження пульсацій сумарного електромагнітного моменту двоякірного БДПС досягається для зміщення, яке дорівнює половині дискрети встановлення точкових ДКПР”, однак бажано було б описати ці дослідження.

10. Для кращого сприйняття бажано було б на рис. 4.8 на с. 150 два графіки (а) і (б) навести в одному масштабі, що дозволило б легше їх порівнювати. На тому ж рис. 4.8, а також на рис. 4.10 (с. 152) і на рис. 4.12 (с. 153) також для покращення сприйняття доцільно було б відзначити кути $\pm\pi/3$, $\pm\pi/6$, про які йдеться в тексті.

11. На рис. 153 вказано: «Проведені теоретичні та експериментальні дослідження показали, що за допомогою спеціальних конструктивних рішень, спрямованих на забезпечення синусоїдальності вихідних напруг даного тихохідного синхронного ТГ, можна добитися за постійної кутової швидкості наявності у кривій потокозчеплення статорних обмоток 3-ї гармоніки на рівні 1% та 5-ї гармоніки на рівні 0,5% від рівня першої гармоніки». При цьому не зрозуміло, про які саме дослідження йдеться.

12. У висновку №1 до 4 розділу вказано, що «Наявність обчислювального середовища (персонального комп'ютера, мікроконтролера) дозволила розробити порівняно простий надійний алгоритм обробки вихідних напруг інформаційних обмоток синхронного тихохідного ТГ». Не зрозуміло, для чого згадується мікроконтролер, адже у розділі описано результати досліджень методом комп'ютерного моделювання.

Деякі із цих зауважень мають скоріше характер побажань. Крім того, зазначені зауваження не стосуються основних результатів та висновків дисертаційної роботи і не впливають на її загальну позитивну оцінку.

Висновок. Дисертаційна робота В. Козія «Покращення характеристик безредукторних приводів на основі синхронного двигуна з постійними магнітами та електронним комутатором» є завершеним дослідженням, в якому одержано нові науково обґрунтовані результати, що вирішують актуальну проблему розробки систем керування СМППМ, адаптованих для використання у БЕП.

Обґрунтованість наукових положень і висновків та достовірність одержаних у роботі результатів не викликають сумніву. В цілому, за актуальністю теми, обсягом та рівнем проведених досліджень, повнотою вирішення поставлених задач, новизною і ступенем обґрунтованості висновків та рекомендацій дисертаційна робота відповідає вимогам до кандидатських дисертацій, зокрема, пп. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», а її автор, Козій Володимир Богданович, безсумнівно заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

Професор кафедри електромеханіки та електроніки
Національної академії сухопутних військ
імені гетьмана Петра Сагайдачного,
кандидат технічних наук, доцент



О. Кузнецов

Підпис О. Кузнецова засвідчую

Т.В.О. заступника начальника Національної академії сухопутних військ
імені гетьмана Петра Сагайдачного з наукової роботи,
доктор технічних наук, старший науковий співробітник
полковник



В. Грабчак

