

ВІДГУК

**офіційного опонента доктора технічних наук, професора
Толочко Ольги Іванівни на дисертаційну роботу
Козія Володимира Богдановича на тему «ПОКРАЩЕННЯ
ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗРЕДУКТОРНИХ ПРИВОДІВ НА ОСНОВІ
СИНХРОННОГО ДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ ТА
ЕЛЕКТРОННИМ КОМУТАТОРОМ»,
подану в спеціалізовану вчену раду Д 35.052.02 Національного університету
«Львівська політехніка» на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук за спеціальністю
05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи**

Актуальність теми дисертації

Кваліфікаційна наукова праця «Покращення характеристик безредукторних приводів на основі синхронного двигуна з постійними магнітами та електронним комутатором» присвячена розв'язанню актуальної науково-технічної задачі вдосконалення безредукторних електроприводів (БЕП) на базі синхронних машин з постійними магнітами (СМПМ), які набувають все більшого поширення при керуванні рухом електричних транспортних засобів, механізмами верстатів та роботів-маніпуляторів, в системах наведення та слідування оптичних і радіотелескопів, авіаційної, морської, космічної та військової галузей тощо. Застосування БЕП у цих напрямках зумовлено необхідністю забезпечення високої надійності роботи приводу, високої точності позиціонування, покращення масо-габаритних показників, зниження механічних вібрацій і шуму, зумовлених наявністю зазорів у кінематичних передачах.

Особливістю СМПМ є те, що їм конструктивно можна надати різноманітних форм: від плоского диску до довгого циліндра невеликого діаметру типу «олівця». Це є передумовою для створення БЕП, в яких двигун одночасно виконує функції виконавчого органу механізму. У якості прикладів можуть слугувати мотор-колесо, мотор-різець, мотор-поворотний стіл та багато інших.

Позбавлення від редукторів потребує збільшення кількості пар полюсів для підвищення електромагнітного моменту та електромагнітної редукції швидкості. Тому актуальними є теоретичні дослідження, спрямовані на отримання закономірностей зміни основних параметрів та показників електроприводу при збільшенні кількості пар полюсів електричної машини.

Відомо, що негативним наслідком підвищення кількості полюсів є значне зменшення сталої часу кола статора, що призводить до збільшення пульсацій

струму статора та електромагнітного моменту, які погіршують плавність руху та є джерелом додаткових втрат у системі електроприводу. Внаслідок цього боротьба з пульсаціями струмів та електромагнітного моменту є актуальною задачею, яка може бути виконана різними методами.

Автор дисертації обрав один з ефективних засобів зменшення пульсацій моменту – вдосконалення методів керування електричним комутатором за умови мінімального ускладнення його конструкції. На відміну від багатьох інших робіт, він зосередився не на фільтрації існуючих вищих гармонік, а на методах запобігання їх утворення, що визначає оригінальність роботи і є передумовою її практичного використання.

Оцінка змісту дисертації

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, викладеною на 204 сторінках друкованого тексту. Вона складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаної літератури у кількості 118 джерел, 1 додатку.

У *вступі* висвітлена актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета, об'єкт, предмет, задачі та методи досліджень, визначені наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, наведені дані про структуру роботи, публікації і апробацію результатів, відомості про особистий внесок автора в наукові праці за темою дисертації.

У *першому розділі* здійснено порівняльний аналіз редукторних та безредукторних електроприводів, визначено сфери застосування БЕП, доведено доцільність застосування БЕП на базі СМПМ з синусоїдальною та трапецевидною ЕРС обертання, розглянуто різноманітні конструкції двигунів з постійними магнітами та проаналізовано їх недоліки та достоїнства. Багато уваги приділено також аналізу відомих способів комутації обмоток якоря безщіткового двигуна постійного струму (БДПС) та СМПМ з поверхневим та внутрішнім розташуванням постійних магнітів. За результатами аналітичного огляду зроблено висновки та виконано обґрунтування постановки задач дослідження.

У *другому розділі* виконано аналіз впливу кількості полюсів СМПМ на такі параметри БЕП як активний опір, індуктивність та стала часу якірного кола, ККД та коефіцієнт потужності, жорсткість механічної характеристики, момент інерції, маса та електромеханічна стала часу приводу. В результаті знайдено аналітичні залежності між відповідними параметрами редукторного електроприводу з однією парою полюсів та БЕП з багатополусною СМПМ при однаковій індукції магнітного потоку в повітряному проміжку порівнюваних двигунів. Для знайдених залежностей характерно те, що вони потребують

знання невеликої кількості конструктивних параметрів електричних машин та кінематичних передач. В результаті досліджень не тільки підтверджено відомі результати про зменшення індуктивності та електромагнітної сталої часу статора, підвищення активного опору статора та зниження ККД і підвищення $\cos \varphi$, але й отримані нові, іноді несподівані результати про значне збільшення жорсткості механічної характеристики і не значне (у порівнянні зі зміною моменту інерції) зростання електромеханічної сталої часу приводу, що при відсутності редуктора приводить до передачі пульсацій обертального моменту безпосередньо до об'єкта керування. За результатами досліджень у цьому розділі зроблено ще два важливих висновки: по-перше, не зважаючи на зростання маси і габаритів багатополусної машини, сумарна маса БЕП співмірна з масою високошвидкісного двигуна з механічним редуктором, муфтою та елементами кріплення; по-друге, багатосекційність обмотки статора дає можливість установки додаткових вимірювальних обмоток або точкових давачів положення. Ці висновки дали імпульс для продовження роботи в обраному раніше напрямку

Третій розділ дисертаційної роботи присвячено дослідженню систем дискретної електронної комутації обмоток якоря багатополусних СМППМ з трапецоїдальною та синусоїдальною ЕРС у складі безредукторного електроприводу. При виконанні досліджень автор дисертації варіював кути комутації та алгоритми широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). В результаті було підтверджено ефективність застосування ШІМ з подвоєною кількістю ключів (6 замість 3-х традиційних), яка полягає у зменшенні пульсацій моменту і спотворення кривих струму на 30-50%. Розвитком цих досліджень є запропонований у дисертації так званий квазісинусоїдальний метод комутації обмоток з 12 базовими векторами фазної напруги, що дозволило знизити коливання моменту та швидкості двигуна у 5-7 разів. Керування двигуном шляхом формування модуля вектору напруги та кута випередження цього вектору відносно вектору ЕРС автор цілком обґрунтовано назвав полярним способом керування.

У **четвертому розділі** запропоновано давач кутового положення та кутової швидкості ротора на базі трифазної інформаційної обмотки, яка при взаємодії з полюсами СМППМ виконуватиме функції тихохідного синхронного тахогенератора. Ефективна робота такого давача можлива тільки при наявності високоякісного алгоритму обробки його фазних напруг. Розробці такого алгоритму і перевірці його працездатності і якості методом віртуального фізичного моделювання присвячена значна частина четвертого розділу.

П'ятий розділ дисертації присвячено експериментальним дослідженням, спрямованим на підтвердження отриманих теоретичних результатів, а також

розробці безконтактних електроприводів для виконання наукових досліджень у різних галузях знань, де потрібне супер точне позиціонування виконавчого органу на малих швидкостях.

Основні наукові положення та практичні результати досліджень адекватно відображені у 7 пунктах **загальних висновків**.

У цілому структура, обсяг та оформлення дисертації відповідають чинним вимогам, які ставляться до дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

Наукова новизна отриманих в дисертації результатів

1. Вперше отримано аналітичні залежності основних параметрів і показників безредукторних електроприводів на основі багатополюсних СМПМ від кількості полюсів, що дозволило запропонувати заходи щодо їх удосконалення.
2. Для електроприводів з синусоїдальною ЕРС обертання розроблено новий метод дискретної комутації обмоток якоря двигуна, який передбачає дискретну зміну за синусоїдальним законом шпаруватості ШІМ фазних напруг, що дало змогу знизити пульсації електромагнітного моменту.
3. Удосконалено метод комутації обмоток якоря двигуна шляхом збільшення кількості опорних векторів фазної напруги і регулювання кута узагальненого вектора напруги якоря в функції миттєвої електричної потужності привода, що зменшило електричні втрати енергії в якорі.
4. Розроблено новий спосіб обробки ЕРС трифазної інформаційної обмотки якоря з метою визначення кутового положення та кутової швидкості СМПМ, який відрізняється проведенням обчислень за трьома каналами та наявністю операцій вирізання в часових залежностях каналів результатів з найбільшими похибками, а також усереднення інформації по каналах, що забезпечує високу завадостійкість та низьку чутливість системи до похибок вимірювання і наявності вищих гармонік.

Практичну значущість в роботі мають розроблені в дисертації системи дискретної комутації обмоток якоря електричних машин з підвищеною частотою перемикачів та рекомендованими кутами комутації, що можуть бути використані в БЕП широкого призначення, і система керування з квазісинусоїдною комутацією обмоток якоря, апробована в таких розробках військового застосування, як камера спостереження і башта бронетранспортера та привод

мотор-коліс роботизованого комплексу. Дисертація також отримує масу практичних рекомендацій з використання та обслуговування окремих елементів досліджуваних безконтактних систем електроприводу.

Повнота викладення змісту дисертації в опублікованих працях

Всі основні наукові та прикладні результати дисертації В.Б. Козія достатньо повно відображені у 14 наукових працях, серед яких 7 статей – у фахових виданнях України, 1 стаття – в науковому періодичному виданні іншої держави, 3 статті у збірниках наукових праць, 2 матеріали міжнародних конференцій (1 індексовано в наукометричній базі Scopus), 1 патент України на корисну модель.

Зміст автореферату відповідає змісту дисертації. В авторефераті знайшли своє відображення усі нові наукові положення, що виносяться на захист, та прикладні результати, що визначають практичну значущість дисертаційної роботи.

Обґрунтованість результатів забезпечується коректною постановкою наукової задачі, адекватністю математичних моделей та застосованих методів дослідження. Про **достовірність** свідчить також добрий збіг результатів, одержаних аналітичними методами, з результатами імітаційного математичного моделювання.

Наукові положення, висновки і рекомендації, сформульовані в роботі, є достатньо обґрунтованими з наукової та технічної точки зору.

Зауваження до змісту дисертації

1. У пункті 2 наукової новизни автор зазначає, що йому вдалося знизити пульсації електромагнітного моменту до заданої величини. З такого формулювання не можливо зрозуміти, чи це будь-яка задана величина, чи на неї накладено якісь обмеження, чи її взагалі ніхто не задає і пульсації зменшуються, але до якого саме рівня – можна вяснити тільки експериментально.

2. У таблиці 1.1, де наведені основні властивості та показники редукторного і безредукторного електроприводів, характеристики цих властивостей типу «Малі-Великі», «Вища-Нижча», «Висока-Низька» слід було б замінити числовими діапазонами.

3. У розділі 2 при обґрунтуванні необхідності зміни параметрів багатополюсної СМПМ у порівнянні з базовою двополюсною машиною, автор застосовує таке збільшення діаметра її активної частини та зменшення числа активних провідників обмотки якоря на полюс, що забезпечує однакове електромагнітне навантаження порівнюваних машин. На мою думку, доцільно було б розглянути ще такий варіант: збільшити діаметр та зменшити кількість

провідників прямо пропорційно підвищенню кількості пар полюсів, а незмінність електромагнітного навантаження багатополісної машини забезпечити шляхом зменшення її осьової довжини.

4. Для математичного опису зміни масогабаритних показників приводу з багатополісною СМПМ автор обмежується лише одноступінчастим механічним редуктором з передавальним числом 6. Для порівняння з БЕП така механічна передача є занадто малою. Можна було б розглянути варіанти з дво- чи триступінчастими редукторами або планетарною передачею.

5. Для зменшення пульсацій електромагнітного моменту в сучасних приводах почали застосовувати багатофазні електричні машини, про що автор пише у розділі 1. Проте в дисертації він обмежується дослідженням лише трифазних СМПМ.

6. Для дослідження та порівняння традиційних систем дискретної комутації автор виконав комп'ютерне симулювання роботи ідеальних інверторів напруги з чисто активним симетричним навантаженням. Чи не краще було б приєднати до комутаторів досліджувані двигуни?

7. Комп'ютерні моделі на рис. 3.3, 3.4 можна було б зробити дещо компактнішими за рахунок використання матричних операцій.

8. Введений в дисертації термін «полярний спосіб керування» на мій погляд краще було б замінити терміном «векторне керування в полярній системі координат».

9. У дисертації декларується наявність спеціальних технічних і технологічних рішень, спрямованих на максимальне наближення вихідних характеристик синхронного тахогенератора до ідеальних щодо симетрії, лінійності, синусоїдальності тощо, але не конкретизовано жодного з них.

10. Наведені на рис. 5.19 осцилограми лише демонструють працездатність запропонованого алгоритму обробки трифазної ЕРС для отримання інформації про кутове положення ротора, його кутову швидкість та напрям обертання. Проте в роботі пропонуються ще прийоми «вирізання» та «усереднення» для зменшення похибок вимірювання, які в експерименті не показані.

11. У пункті 6 загальних висновків доцільно було би вказати, які значення похибок вимірювання кутового положення ротора та його кутової швидкості досягнуті при застосуванні комплексного давача.

12. У дисертації наведено багато кількісних показників, які свідчать про ефективність запропонованих науково-технічних рішень, але чомусь ці показники не включено у висновки по розділах і по роботі в цілому.

Зауваження до оформлення дисертації

1. Інколи автор невдало застосовує технічну термінологію, наприклад, синусоїдальна обмотка (стор. 22), синусоїдальні приводи (стор. 53), математична модель основних параметрів і показників (стор. 24), шумність в роботі (стор. 30), полюсна поділлка (стор. 67).

2. У блок-схемі алгоритму на рис. 4.2 блоки отримання вхідної інформації та блоки виведення вихідної інформації відповідно до існуючих стандартів повинні мати форму паралелограмів, а не прямокутників.

3. Деякі комп'ютерні моделі є мало інформативними. Їх можна було б винести в додатки. У деяких підсистемах вхідні і вихідні порти мають загальні позначення (In, Out), що не сприяє розумінню фізичних процесів, досліджуваних методом математичного та віртуального фізичного моделювання.

4. Деякі скорочення, наприклад, БВ (стор. 135) не включено до переліку умовних скорочень.

ВИСНОВОК

Аналізуючи виконані в дисертаційній роботі дослідження, отримані в ній результати та сформульовані висновки з урахуванням повноти публікацій, можна відзначити, що наведені вище зауваження не знижують цінності роботи.

Отримані в дисертації положення вірогідні та мають наукове і практичне значення.

Дисертаційна робота Козія Володимира Богдановича на тему «Покращення характеристик безредукторних приводів на основі синхронного двигуна з постійними магнітами та електронним комутатором» є закінченою науково-дослідною роботою. В ній одержано нові науково обґрунтовані результати в галузі керування безредукторними електроприводами на базі багатополюсних синхронних двигунів з постійними магнітами з трапецевидною і синусоїдальною ЕРС, які вирішують важливу науково-технічну задачу істотного зменшення пульсацій електромагнітного моменту за рахунок удосконалення методів дискретної та неперервної комутації фаз, застосування низько-пульсаційних способів широтно-імпульсної модуляції, методу квазісинусоїдальної комутації, розробки дешевого та високоточного методу вимірювання швидкості, положення та напрямку обертання ротора. Результати виконаних досліджень є суттєвим вкладом в електромеханіку, а саме, в теорію і практику керування безредукторними електроприводами змінного струму на базі СМППМ.

З аналізу роботи видно, що дисертант володіє сучасними методами теоретичних та експериментальних досліджень, має гарну математичну підготовку, володіє досвідом роботи з електронною та мікропроцесорною технікою і сучасним програмним забезпеченням.

Зміст дисертації відповідає паспорту спеціальності 05.09.03 - "Електротехнічні комплекси та системи".

За актуальністю обраної теми, обсягом та рівнем виконаних досліджень, повнотою вирішення наукових і практичних задач, новизною і ступенем обґрунтованості отриманих результатів та практичних висновків дисертаційна робота відповідає вимогам, які ставляться до кандидатських дисертацій, а її автор Козій Володимир Богданович заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи».

Професор кафедри автоматизації електромеханічних систем
та електроприводу факультету електроенерготехніки та автоматики
Національного технічного університету України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

д.т.н., професор



A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Толочко".

О.І. Толочко

