

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет «Львівська політехніка»

**Козій Володимир Богданович**

**УДК 621.4:621.318:621.316.56**

**ПОКРАЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗРЕДУКТОРНИХ  
ПРИВОДІВ НА ОСНОВІ СИНХРОННОГО ДВИГУНА З  
ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ ТА ЕЛЕКТРОННИМ  
КОМУТАТОРОМ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

**Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

Львів – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Щур Ігор Зенонович,**  
завідувач кафедри електромехатроніки і  
комп'ютеризованих електромеханічних систем  
Національного університету «Львівська політехніка»

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Толочко Ольга Іванівна,**  
професор кафедри автоматизації електромеханічних  
систем та електроприводу Національного технічного  
університету України "Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського"

кандидат технічних наук, доцент  
**Кузнєцов Олексій Олександрович,**  
професор кафедри електромеханіки та електроніки  
Національної академії сухопутних військ  
імені гетьмана Петра Сагайдачного

Захист відбудеться «18» грудня 2020 року о 10.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.02 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, ауд. 114 гол. корпусу).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий «17» листопада 2020 року.

Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради, к.т.н., доцент



В. І. Коруд

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

У більшості випадків електроприводи (ЕП) промислових механізмів будуються із застосуванням понижувальної механічної трансмісії, яка реалізується за допомогою пасової, ланцюгової або зубчастої механічної передачі (редуктора), що зумовлено необхідністю узгодження номінальних швидкостей електродвигуна і об'єкта приводу або (та) перетворення характеру руху. Механічний редуктор залишається найбільш уразливим місцем ЕП через свою низьку надійність, зумовлену додатковими обертовими частинами, зношуванням зубчастих коліс, відмовою підшипників, необхідністю обслуговування. Крім цього, для високоточних ЕП редуктор стає джерелом похибок регулювання, пов'язаних з проміжками в зачепленнях передач та скінченою їх жорсткістю, що проявляється у вигляді биття та пружних деформацій, а також шуму в роботі.

**Актуальність теми.** Безредукторні електроприводи (БЕП) становлять перспективний напрям сучасної електромеханіки, який знаходить щораз нові сфери застосування. Перевагами БЕП над традиційними редукторними приводами є підвищені надійність та енергоефективність, вища швидкодія і точність регулювання моменту і швидкості, простіша реалізація, зниження шуму. Усе це досягається завдяки вилученню механічного редуктора як проміжного силового елемента та безпосередньому з'єднанню чи навіть вбудовуванню електричної машини в об'єкт приводу. При цьому механічна редукція швидкості та відповідне підвищення моменту замінюється електромагнітною редукцією завдяки збільшенню кількості пар полюсів машини та, відповідно, її розмірів.

Для реалізації БЕП найбільше підходять електричні машини синхронного типу з постійними магнітами (ПМ), оскільки завдяки активному ротору в них забезпечуються високі енергетичні показники за порівняно великого повітряного проміжку. У безщітковому БЕП обмотки якоря двигуна перемикаються за допомогою електронного, найчастіше транзисторного, комутатора відповідно до кутового положення ротора, яке фіксується відповідним давачем. Від типу останнього та побудови систем електронної комутації обмоток якоря електричних машин з ПМ у значній мірі залежать показники якості роботи БЕП та його ціна. Для приводів низьки механізмів актуальним є розроблення способів керування, які можна реалізувати за допомогою простих засобів – недорогих мікроконтролерів та давачів кутового положення ротора (ДКПР) (точкові давачі Холла, фотоімпульсні давачі тощо), які легко розміщуються в активній частині машини. Для інших механізмів, що працюють в режимах стеження, позиціонування чи ведення на інфранизьких швидкостях, пріоритетними є завдання забезпечення гладкості моменту та швидкодії, що зумовлює використання спеціальних неперервних ДКПР та відповідних систем електронної комутації обмоток якоря синхронних машин з ПМ (СМПМ). В обох вказаних випадках безредукторна реалізація приводу та багатополюсна конструкція електричної машини змінюють параметри приводу, причому ці зміни ще не достатньо вивчені, тому досить контраверсійно відображені в літературі. Від параметрів приводу, в свою чергу, залежать вимоги до систем електронної комутації обмоток якоря, зокрема побудови ДКПР та способів і режимів роботи транзисторного комутатора, оскільки вони безпосередньо

впливають на пульсацію електромагнітного моменту та енергетичні характеристики привода. Все це зумовлює актуальність проведення спеціальних досліджень.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження проводилися в Національному університеті «Львівська політехніка» відповідно до наукового напрямку кафедри електромехатроніки і комп'ютеризованих електромеханічних систем «Сучасні технології створення та керування електромехатронних пристроїв і комп'ютеризованих електромеханічних систем». Теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи були використані в держбюджетних науково-дослідних роботах: «Електромеханотронна система перетворення енергії для безредукторних вітроустановок з вертикальною віссю обертання» (№ 0109U001155), «Комбінована система автономного електрозабезпечення на базі вітро- і фотоелектричних перетворювачів енергії» (№ 0111U001212), «Гібридні автономні вітроенергоустановки, що виробляють теплову та електричну енергії» (№ 0113U001358), а також в низці госпдоговірних науково-дослідних робіт.

**Мета роботи і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є дослідження тенденцій зміни параметрів і характеристик синхронних двигунів з ПМ в БЕП та розроблення і дослідження систем електронної комутації обмоток якоря цих машин з метою покращення якості формування електромагнітного моменту та енергетичних характеристик привода.

Для досягнення поставленої мети поставлені та вирішені наступні **завдання**.

- теоретично дослідити вплив специфіки конструкції багатополісної електричної машини з ПМ в БЕП на її параметри та показники системи електропривода;
- проаналізувати особливості систем електронної комутації якірних обмоток електричних машин з ПМ в БЕП;
- провести порівняльний аналіз відомих систем електронної комутації обмоток якоря електричних машин з ПМ з метою їх ефективного застосування в БЕП;
- розробити та дослідити нові ефективніші з точки зору покращення характеристик БЕП методи дискретної комутації обмоток якоря електричних машин з ПМ та синусоїдною і трапецевидною зворотними ЕРС;
- розробити придатний для БЕП неперервний комплексний ДКПР та завадостійкий алгоритм отримання поточної інформації про кут положення, кутову швидкість та напрям обертання ротора СМППМ, дослідити його точність;
- провести експериментальні дослідження на макетах БЕП та створених зразках нової техніки для підтвердження запропонованих рішень.

**Об'єкт дослідження** – електромагнітні та електромеханічні процеси в електричній машині з постійними магнітами в безредукторному електроприводі.

**Предмет дослідження** – ефективні методи та їх параметри в системах електронної комутації обмоток якоря електричних машин з постійними магнітами в БЕП з використанням дискретних та неперервних давачів кутового положення ротора.

**Методи дослідження.** Виконані дослідження базувалися на фундаментальних положеннях теорії електричних машин, автоматизованого електропривода і теорії автоматичного керування. Основні дослідження проводилися шляхом комп'ютерного моделювання систем електроприводів у середовищі MatLab/Simulink. Дослідження математичних моделей електричних машин з ПМ, а також чутливості

розробленого алгоритму роботи комплексного ДКПР до різних конструктивних відхилень проводилося в пакеті MathCAD. Експериментальні дослідження проводилися на макетних зразках БЕП з системами комутації, керованими мікроконтролерами фірми Atmel, програми для яких написані мовою Asembler.

**Наукова новизна одержаних результатів.** У дисертаційній роботі:

- Вперше отримано аналітичні вирази основних електричних та електромагнітних параметрів, а також енергетичних, динамічних і масогабаритних показників привода на основі багатополусної СМПМ у відносних одиницях щодо двополусної СМПМ з тими ж параметрами електричного живлення і об'єкта привода, що дало змогу оцінити особливості БЕП та розробити заходи щодо їх удосконалення.

- Для БЕП з близькою до синусоїдальної ЕРС обертання розроблено новий метод малоточкової дискретної комутації обмоток якоря двигуна, названий квазісинусоїдною (КС) комутацією, який передбачає дискретну, відповідно до кількості точкових давачів положення ротора, зміну за синусоїдальним законом щільностей ШІМ фазних напруг, що дало змогу знизити пульсації електромагнітного моменту до заданої величини.

- Розвинуто метод квазісинусоїдної комутації обмоток якоря двигуна в напрямку квазіоптимального регулювання кута узагальненого вектора напруги якоря, формованої трифазною ШІМ, в функції миттєвої вхідної потужності привода, що зменшило електричні втрати енергії в якорі.

- Розроблено новий спосіб визначення кутового положення ротора та кутової швидкості СМПМ за ЕРС трифазної синусоїдальної інформаційної обмотки якоря, який включає в себе прийоми вирізання та усереднення і відзначається завадостійкістю та низькою чутливістю до кутових, амплітудних похибок та гармонічних відхилень від синусоїдальності.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблені в дисертації системи дискретної комутації обмоток якоря електричних машин з ПМ можуть бути використані в БЕП широкого призначення, зокрема, в розробках науково-дослідної лабораторії (НДЛ) «СКБ електромеханічних систем» Національного університету «Львівська політехніка». Неперервна електронна комутація обмоток якоря СМПМ за поточним кутом положення ротора, отриманим від запропонованого комплексного ДКПР відповідно до розробленого алгоритму, може бути використана в БЕП для систем наведення чи слідування середньої точності.

Розроблена система гібридного керування з КС-комутацією обмоток якоря двигунів з ПМ використана в розробках, призначених для військового застосування, зокрема в БЕП камери спостереження, а також башти бронетранспортера, привода мотор-колес роботизованого комплексу для виконання наземних завдань. Полярне керування з КС-комутацією обмоток якоря застосовано в БЕП розроблених пристроїв для різних наукових досліджень, що проводяться у Львівській політехніці. Матеріали дисертації використовуються в навчальному процесі для студентів спеціалізації „Електромеханічні системи автоматизації та електропривод” на кафедрі електромехатроніки і комп'ютеризованих систем Національного університету „Львівська політехніка”.

**Особистий внесок здобувача.** Наукові положення і результати, викладені в дисертації, отримані автором особисто. У наукових працях, опублікованих у співавторстві здобувачеві належить: [1] – розробка алгоритму обробки вихідних ЕРС обертання тихохідного безконтактного тахогенератора; [2] – реалізація триканальної ШІМ за допомогою мікроконтролера Atmega 8535-16PU; [3] – розробка методики комп'ютерного дослідження відносної похибки визначення кутової швидкості; [4] – побудова комп'ютерної моделі тахогенератора з дискретним алгоритмом обробки його вихідних напруг; [5] – створення комп'ютерних моделей та проведення на них досліджень ефективності різних способів дискретної комутації обмоток якоря електричних машин з ПМ; [6] – розроблення мікроконтролерної системи керування БЕП зі стабілізацією кутової швидкості; [8] – створення математичної моделі основних параметрів та енергетичних показників роботи СМПМ з різною кількістю пар полюсів; [9] – дослідження на комп'ютерних моделях особливості КС-комутації обмоток якоря СМПМ; [10] – розробка комп'ютерної моделі системи полярного керування реверсивним БЕП з використанням КС-комутації обмоток якоря електричних машин з ПМ; [11] – створено математичну модель БЕП механізму вертикального наведення ракетної системи багаторазового пуску FM-21; [12] – запропоновано оптимальне зміщення якорів у двоякірній конструкції електричної машини з ПМ для БЕП; [13] – розроблення та виготовлення системи прецизійного БЕП кутового положення кристала в оптичних дослідженнях; [14] – розроблення та виготовлення БЕП вальців машини для виготовлення електродів суперконденсаторів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи та результати досліджень доповідалися, обговорювалися та отримали позитивну оцінку на XIII-XVI Міжнародних науково-технічних конференціях “Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика” (Крим, 2006-2009 рр.), XXIII Міжнародній науково-технічній конференції "Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych" (Rytro, Польща, 2014 р.), XXII Ukrainian-Polish Conference (CADMD'2014) (Львів, 2014) та семінарах кафедри електромехатроніки і комп'ютеризованих електромеханічних систем Національного університету «Львівська політехніка».

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 14 наукових праць, серед яких 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 (1 індексовано в наукометричній базі Scopus), 1 патент України на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація містить вступ, 5 розділів, висновки, викладена на 204 стор. друкованого тексту, в тому числі основний текст на 146 стор., містить 99 рисунків, 6 таблиць, частина з яких займає повних 16 стор., додаток на 3 стор. і 118 назв використаної літератури на 12 стор.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання досліджень, викладено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, дано загальну характеристику роботи.

У першому розділі проведено порівняльний аналіз редукторних ЕП та БЕП, визначено ефективні сфери застосування БЕП, розглянуто основні типи електричних машин для БЕП. Особливу увагу зосереджено на аналізі відомих систем електронної комутації обмоток якоря електричних двигунів з ПМ щодо їх застосування в БЕП.

У даний час БЕП знаходять щораз ширше застосування в таких ділянках техніки: механізмах маніпуляторів для робототехніки; системах наведення та слідкування оптичних і радіотелескопів, авіаційної, морської, космічної та військової галузей; приводах мотор-колес електричних транспортних засобів; вітроелектричних установках; ліфтах; надводних і підводних апаратах для приводів гребних гвинтів і рулів тощо. Застосування БЕП у цих напрямках зумовлено або необхідністю забезпечення високої надійності роботи приводу, або – високої точності позиціонування та/чи підтримання швидкості. Не дивлячись на поширення БЕП, до цього часу між дослідниками триває дискусія щодо їх переваг та недоліків порівняно з традиційними редукторними приводами. Тому актуальними є теоретичні дослідження, спрямовані на отримання закономірностей зміни основних параметрів та показників ЕП за збільшення кількості пар полюсів електричної машини в БЕП.

Для БЕП найкраще підходять безщіткові синхронні машини з ПМ, для яких збільшення повітряного проміжку та порівняно великий магнітний опір на шляху потоку реакції якоря зменшують вплив навантаження на енергетичні показники машини, як це має місце в асинхронних та синхронних реактивних машинах. Крім цього, електричні машини з ПМ мають ширші функціональні можливості в порівнянні з іншими видами електричних машин. За живлення обмоток якоря системою синусоїдальних напруг з необхідним фазовим зсувом має місце режим СМПМ. Якщо на обмотку якоря подавати систему різнополярних або однополярних імпульсів напруги, двигун стає кроковим. За наявності зворотного зв'язку за положенням ротора двигун перетворюється в безщітковий двигун постійного струму (БДПС). Проведено аналіз різноманітних конструкцій машин з ПМ та приводів на їх основі, які вже успішно застосовуються, а також здійснено їх класифікацію за 15-а ознаками. Багато з них застосовуються чи можуть бути застосовані в БЕП.

У сучасних електричних машинах з ПМ електронна комутація обмоток якоря здійснюється за допомогою транзисторних напівпровідникових перетворювачів. Останні можуть мати різну топологію, проте найбільш поширеною для трифазної машини є 6-транзисторний мостовий інвертор напруги. Проаналізовано відомі способи електронної комутації обмоток якоря двигунів з ПМ, з використанням ДКПР і бездавачеві, які можна застосовувати в БЕП. Проте, в першу чергу, виділяються дві принципово відмінні системи електроприводу, які відрізняються типом ДКПР та методом електронної комутації обмоток якоря, а також характером ЕРС обертання машини: 1) простий і дешевий на базі БДПС з малоточковим ДКПР та дискретною комутацією обмоток якоря; 2) складніший і дорожчий на базі синусоїдальної СМПМ з неперервним чи багатоточковим ДКПР та неперервною високочастотною комутацією обмоток якоря.

У роботі здійснено аналіз сучасних способів дискретної електронної комутації обмоток якоря двигунів з ПМ, а також способів зменшення пульсацій електромагнітного моменту, породжених такою комутацією. Проте залишаються недостатньо до-

слідженими питання впливу особливостей конструкції БЕП на ефективність відомих способів дискретної електронної комутації, що зумовлює необхідність проведення досліджень, спрямованих на зменшення пульсацій електромагнітного моменту БДПС в БЕП шляхом обґрунтування нових спеціальних для таких приводів способів дискретної комутації обмоток якоря. При цьому акцент переноситься з процесів керування струмами якоря, з метою зменшення значних часових гармонік електромагнітного моменту, на способи ослаблення процесів генерування цих гармонік під час комутації обмоток якоря.

Для точних і відповідальних приводів на базі СМПМ з неперервною комутацією обмоток якоря в БЕП однією з проблем є встановлення ДКПР. Більшість промислових багатоточкових давачів, оптичні і магнітні енкодери, немає змоги під'єднати до валу приводу. Крім того, у випадку багатополусної машини вони суттєво втрачають свою точність. Тому актуальним є дослідження, спрямоване на створення достатньо простого та недорогого неперервного ДКПР для БЕП.

У **другому розділі** проведено теоретичні дослідження, спрямовані на порівняння параметрів і характеристики редукторних ЕП та БЕП. Для цього досліджувалася відносна зміна параметрів і характеристик СМПМ за зростання її кількості пар полюсів. Отримані в розділі результати необхідні для розроблення ефективних для багатополусних машин з ПМ систем електронної комутації обмоток якоря.

Для аналізу була взята трифазна СМПМ радіальної конструкції з синусоїдальною ЕРС, розміщеними на поверхні ротора ПМ (SPMSM у світовій інтерпретації) та з векторним керуванням, що забезпечує формування напрямку вектора струму якоря в системі координат  $d$ - $q$ , пов'язаній з ротором машини, вздовж вектора ЕРС ( $I_d = 0$ ). Для отримання загальних результатів усі показники для машин з різною кількістю пар полюсів  $p$  виражалися у відносних одиницях по відношенню до дво полюсної ( $p = 1$ ) базової СМПМ з редуктором з передавальним числом  $i_1$  (для базового варіанту дані позначені індексом "1", а для варіантів з різною кількістю пар полюсів – індексом "p"). За досягнення  $p = i_1$  отримуємо БЕП, в якому має місце лише електромагнітна редукція кутової швидкості. Для усіх варіантів забезпечувалися однакові значення вхідних електричних та вихідних механічних параметрів приводу, а аналіз стосувався усталеного режиму роботи за номінальних параметрів машини.

Зростання кількості пар полюсів СМПМ незмінно супроводжується збільшенням її діаметру. Показано, що за постійної осьової довжини машини, для забезпечення незмінності лінійного струмового навантаження та індукції магнітного потоку в повітряному проміжку, необхідно збільшувати діаметр її активної частини  $D$  та зменшувати число активних провідників  $N$  обмотки якоря на полюс у порівнянні з базовою машиною відповідно до виразів

$$D_p = p^\alpha D_1; \quad N_p = p^{-\alpha} N_1, \quad (1)$$

де  $\alpha$  – показник степеня, значення якого перебуває в діапазоні  $0 \leq \alpha \leq 1$ , причому незалежність від  $p$  постійної Арнольда досягається, коли взяти  $\alpha = 0,5$ .



Досліджувалися залежності основних електричних, електромагнітних та електромеханічних параметрів СМПМ, а також енергетичних, динамічних і масогабаритних показників привода від кількості пар полюсів машини.

**Електричні, електромагнітні та електромеханічні параметри СМПМ.** За умови зміни кількості провідників обмотки якоря, що припадає на один полюс, відповідно до (1), при сталому їх перерізі опір фазної обмотки якоря багатополюсної машини становитиме

$$R_p = pp^{-\alpha} R_1 = p^{1-\alpha} R_1, \quad (2)$$

а індуктивність фазної обмотки якоря, враховуючи зменшення середньої площі витка  $S_w$  пропорційно до площі полюса, рівна

$$L_p = pk_L S_{w,p} w_p^2 = pk_L p^{\alpha-1} S_{w,1} (p^{-\alpha} w_1)^2 = p^{-\alpha} k_L S_{w,1} w_1^2 = p^{-\alpha} L_1, \quad (3)$$

де  $k_L$  – коефіцієнт пропорційності, який враховує конфігурацію котушки та матеріал осердя;  $w$  – кількість витків фазної обмотки якоря.

Ввівши позначення  $\Delta U_{R,1}^*$  та  $\Delta U_{X,1}^*$ , які відображають відносні спади напруги відповідно на активному та індуктивному опорах обмотки якоря базової машини в номінальному режимі роботи, для векторного керування отримано наступні залежності:

$$\Delta U_{X,1}^* = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_1}; \quad \omega_{0,1} = \omega_1 (\cos \varphi_1 - \Delta U_{R,1}^*)^{-1}, \quad (4)$$

де  $\cos \varphi$  та  $\Delta U_{R,1}^*$  – показники СМПМ, значеннями яких задаються;  $\omega_{0,1}$  – кутова швидкість ідеального неробочого ходу базової СМПМ.

Вираз для модуля статичної жорсткості механічної характеристики багатополюсної СМПМ отримано у вигляді

$$\beta_p = p^2 \left( \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\Delta \beta_p} \right)^{-1} = p^2 \beta_1 \left( 1 + \frac{\beta_1}{\Delta \beta_p} \right)^{-1}, \quad (5)$$

де  $\Delta \beta_p = \frac{M_o}{\omega_{0,1} (k_{\omega,0} - 1) i_1}$ ;  $M_o$  – номінальний момент навантаження об'єкта привода;

$$k_{\omega,0} = \sqrt{\left[ \Delta U_{R,1}^* (p^{1-\alpha} - 1) + \cos \varphi_1 \right]^2 + \left[ 1 + (p^{-\alpha} - 1)^2 \right] (1 - \cos^2 \varphi_1)}.$$

**Енергетичні показники СМПМ.** ККД базової машини з врахуванням лише втрат в міді, які в SPMSM значно переважають втрати в сталі, дорівнює

$$\eta_1 = \frac{P_{out}}{P_{out} + \Delta P_1} = \left( 1 + \frac{\Delta P_1}{P_{out}} \right)^{-1} = 1 - \frac{\Delta U_{R,1}^*}{\cos \varphi_1}, \quad (6)$$

де  $P_{out} = 3/2 \cdot E_1 I_1$  – вихідна електромагнітна потужність СМПМ;  $\Delta P_1 = 3/2 \cdot I_1^2 R_1$  – Джоулеві втрати в обмотках якоря машини;  $E_1$  та  $I_1$  – модулі векторів ЕРС та струму якоря, відповідно, для базової СМПМ.

ККД багатополюсної машини СМПМ з врахуванням (2) та однакової з базовою машиною вихідної потужності:

$$\eta_p = \left[ 1 + p^{1-\alpha} (\eta_1^{-1} - 1) \right]^{-1}. \quad (7)$$

Важливим енергетичним показником роботи машини є також її  $\cos \varphi$ , значення якого для багатополюсної машини отримано у вигляді

$$\cos \varphi_p = \frac{E_p + R_p I_1}{U_p} = \left[ 1 + \frac{p^{-2\alpha} (1 - \cos^2 \varphi_1)}{(\cos \varphi_1 + (p^{1-\alpha} - 1) \Delta U_{R.1}^*)^2} \right]^{-0.5}. \quad (8)$$

**Динамічні показники електроприводу.** Електромагнітна стала часу обмотки якоря багатополюсної СМПМ з врахуванням (2) і (3) становить

$$T_{e,p} = \frac{L_p}{R_p} = \frac{p^{-\alpha} L_1}{p^{1-\alpha} R_1} = \frac{T_{e.1}}{p}. \quad (9)$$

Сумарна електромеханічна стала часу приводу  $T_{m,\Sigma}$  складається із відповідних електромеханічних сталих часу, зумовлених ротором двигуна  $T_{m,m}$  та приведеними до валу двигуна обертовими частинами об'єкта приводу  $T_{m,o}$ . Ці складові для варіанту з багатополюсною СМПМ отримано через відповідні складові базової СМПМ у вигляді

$$T_{m,m,p} = \frac{J_{m,p}}{\beta_p} = p^{3\alpha-2} T_{m,m.1} \left( 1 + \frac{\beta_1}{\Delta \beta_p} \right); \quad T_{m,o,p} = \frac{J_o}{i^2 \beta_p} = T_{m,o.1} \left( 1 + \frac{\beta_1}{\Delta \beta_p} \right), \quad (10)$$

де  $J_m$  та  $J_o$  – моменти інерції ротора СМПМ та об'єкта приводу відповідно.

**Масогабаритні показники приводу.** У цій групі враховувався загальний об'єм, маса і габарити СМПМ, механічної передачі та приводу в цілому.

Відносні залежності об'єму та маси СМПМ від числа пар полюсів  $p$  отримано у вигляді

$$\frac{V_{m,p}}{V_{m.1}}(p) = \frac{m_{m,p}}{m_{m.1}}(p) = \left( \frac{p^\alpha + 2b_t^*}{1 + 2b_t^*} \right)^2, \quad (11)$$

де відношення  $b_t^* = b_t / D_1$  можна приблизно оцінити на рівні 0,25.

Отримано також оціночні вирази для основних складових механічного редуктора: зубчастих коліс, валів та корпусу.

**Чисельні дослідження.** Параметри об'єкта приводу було вибрано наступними:  $P_o = 5$  кВт,  $\omega_o = 20$  рад/с,  $J_o = 1,5$  кг·м<sup>2</sup>. Значення двох безрозмірних показників СМПМ:  $\Delta U_{R.1}^* = 0,08$ ,  $\varphi_1 = 35^\circ$ . Масу базової СМПМ орієнтовно взято рівною  $m_{m.1} = 24$  кг, а момент інерції її ротора  $J_{m.1} = 0,025$  кг·м<sup>2</sup>. Для базової системи ЕП було прийнято  $i_1 = 6$  (одноступінчаста механічна передача). У досліджуваній системі ЕП з багатополюсною СМПМ змінним параметром є  $p = 1, \dots, 6$ .

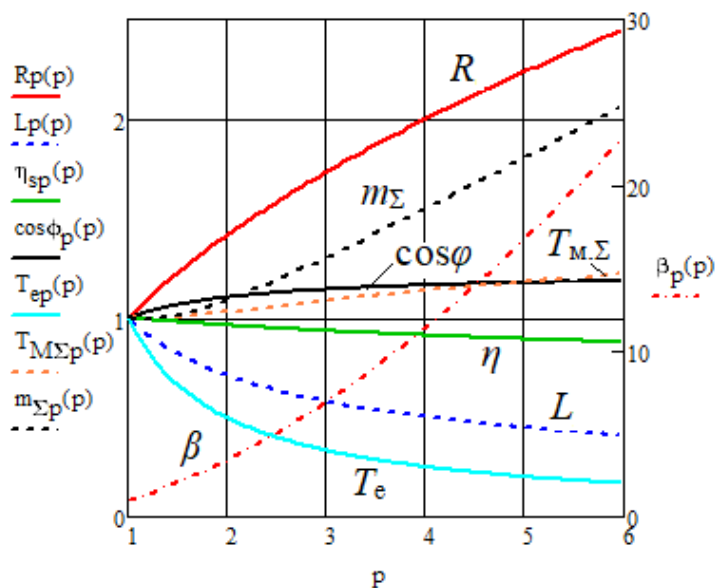


Рис. 1. Результати розрахунку відносних значень параметрів та показників БЕС від кількості пар полюсів СМПС

пульсацій електромагнітного моменту. У той же час, електромеханічна стала часу в БЕС, всупереч сподіванням щодо її збільшення, змінюється порівняно з редукторним приводом незначно, що за відсутності редуктора призводить до передачі пульсацій моменту безпосередньо об'єкту. З групи енергетичних показників у БЕС дещо знижується ККД, проте зростає  $\cos\phi$ . Великий діаметр електричної машини та часто недоступність до її валу в БЕС не дозволяють застосовувати як давачі ДКПР традиційні енкодери різного типу. Натомість багатосекційність обмотки якоря можна використати для встановлення в секціях потрібної кількості точкових ДКПР чи додаткових обмоток для отримання інформації про кут положення ротора та його кутову швидкість. У БЕС значно зростають маса та габарити СМПС. Проте маса багатополусної СМПС не значно перевищує сумарну масу високошвидкісного двигуна з механічним редуктором. Якщо до останнього ще додати раму для кріплення, муфту та змащувальну оливу, які не враховувалися в дослідженні, то маси редукторного ЕС та БЕС є цілком співмірні.

У третьому розділі проведено аналіз та дослідження показників електронної дискретної комутації обмоток якоря БДПС традиційними  $120^\circ$ ,  $180^\circ$  чи  $150^\circ$  системами, а також розроблено та досліджено нові ефективніші з точки зору покращення характеристик БЕС методи дискретної комутації обмоток якоря електричних машин з ПМ та синусоїдною і трапецевидною зворотними ЕРС.

Найпростіше для БЕС застосувати уже традиційні системи дискретної комутації обмоток якоря, коли шляхом зміни комбінації включених транзисторів мостового інвертора протягом  $360^\circ$  ел. кожен з них є провідним протягом  $120^\circ$ ,  $180^\circ$  або  $150^\circ$ , як це прийнято в тиристорному інверторі напруги. Для дослідження та порівняння традиційних систем дискретної комутації було проведено комп'ютерне симулювання роботи ідеального інвертора напруги з чисто активним симетричним навантаженням, де визначалися такі показниками якості: ступінь використання напруги в ланці пос-

Проведені розрахунки за отриманими виразами (1) – (11), які проводилися в програмі Mathcad (рис. 1), дали можливість встановити та пояснити тенденції зміни параметрів та показників системи ЕС при збільшенні кількості пар полюсів СМПС аж до отримання БЕС, низка з яких має безпосередній вплив на перебіг процесів електронної комутації в машині та формування її електромагнітного моменту. Так, стрімке зниження електромагнітної сталої часу якоря, спричинене зменшенням індуктивності та збільшенням активного опору обмотки якоря, призводить до збільшення пульсацій струмів під час комутації та до відповідного зростання

тійного струму  $U_{m1,\phi}/U_{dc}$ , де  $U_{m1,\phi}$  – амплітуда першої гармоніки сформованої фазної напруги,  $U_{dc}$  – напруга в ланці постійного струму; сумарний коефіцієнт гармонік лінійного струму  $THD = \sqrt{\sum_{i=2}^n I_i^2} / I_1$ , де  $I_i$  – амплітуда  $i$ -ї гармоніки струму; коефіцієнт  $i$ -ї гармоніки лінійного струму  $HD_i = I_i / I_1$  ( $i = 5, 7, 11, 13, 17, 19$ ).

Аналіз результатів дослідження 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  $U_{dc}$ . Для уникнення цього, було розроблено так звані низькопульсаційні алгоритми ШІМ-регулювання, коли реактивні струми якоря після закривання будь-якого транзистора завжди мають шлях для протікання через зворотні діоди та інші відкриті транзистори.

З метою порівняння ефективності та розроблення рекомендацій щодо доцільності застосування різних систем дискретної комутації обмоток якоря БДПС, в середовищі Matlab/Simulink розроблено низку комп'ютерних моделей, які відрізняються типом зворотної ЕРС (синусоїдальна і трапецевидна), системами дискретної комутації транзисторів інвертора ( $120^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $180^\circ$ ), алгоритмами ШІМ-регулювання (3-ключові, запропоновані низькопульсаційні 6-ключові). В усіх випадках БЕП мав наступні параметри:  $P_n = 6$  кВт,  $\omega_n = 15$  с $^{-1}$ ,  $M_n = 400$  Н·м,  $p = 20$ ,  $R = 0,5$  Ом,  $L = 5$  мГн,  $\Phi = 0,2$  Вб,  $J_\Sigma = 3,0$  кг·м $^2$ . З метою оцінки впливу лише системи електронної комутації, досліджувалася робота розімкненої системи БЕП за  $M_n$  та  $0,5\omega_n$ . Крім  $THD_I$ , оцінювалася теж відносна пульсація електромагнітного моменту  $\delta M$  та відносний сумарний ККД БДПС (інвертора і двигуна), при чому за базове значення ККД брався відповідний сумарний ККД для тих же параметрів БЕП, але для двигуна з синусоїдальною ЕРС та векторним принципом керування. З метою дослідження впливу лише системи комутації на величину ККД, в усіх комп'ютерних експериментах підбиралися такі оптимальні значення кута комутації  $\theta_{opt}$  (початку імпульсу фазної напруги відносно початку ЕРС – аналогія встановлення ДКПР), щоб вектор струму якоря при заданому номінальному моменті статичного навантаження здійснював у процесі комутації симетричні відносно вектора ЕРС осциляції в межах кута  $\pm\alpha_1$ .

Отримані результати (табл. 1) підтверджують ефективність низькопульсаційних ШІМ порівняно з ШІМ трьома ключами: пульсації моменту знижуються на 40-50%, а спотворення кривих струму – на 30-50%. Щодо форми ЕРС обертання, то для трапецевидної кращі результати (нижчу відносну пульсацію моменту  $\delta M$ ) забезпечує  $120^\circ$  система комутації, тоді як для синусоїдальної –  $150^\circ$  і  $180^\circ$ , причому для останнього способу усі показники дещо кращі. Враховуючи простішу реалізацію  $180^\circ$  системи комутації у порівнянні зі  $150^\circ$ , її доцільно використовувати за синусоїдальної форми ЕРС машини.

З метою подальшого зниження пульсацій електромагнітного моменту БДПС в БЕП, запропоновано застосувати так званий квазісинусоїдний (КС) метод комутації обмоток якоря. На відміну від описаних вище традиційних систем комутації шляхом позиційного перемикавання кратної трьом кількості базових векторів фазної напруги,

запропонований метод дає змогу сформувати довільну їх кількість, яка визначається дискретністю ДКПР. Базові вектори формуються за способом триканальної ШІМ з відповідними шпаруватостями каналів  $\delta_A, \delta_B, \delta_C$ . На рис. 2 такий підхід продемонстрований для 12-и базових векторів, зміщених на кут  $15^\circ$  ел. відносно базових векторів за  $150^\circ$  способу комутації. Як і для останнього, для 12-векторної КС-комутації достатньо забезпечити 6 точок дискретного ДКПР на секцію обмотки якоря. Це можуть бути точкові давачі Холла чи фотоімпульсний давач. На функціональній схемі БЕП (рис. 1,в) базові коефіцієнти шпаруватості для кожного з 12-и векторів  $\delta_A, \delta_B, \delta_C$ , отримують послідовно за дискретними  $n$  сигналами ДКПР з таблиці коефіцієнтів, складених відповідно до рис. 1,б. Наприклад, для вектора  $U_1$  отримуємо:  $\delta_A = \sin(75^\circ), \delta_B = \sin(-15^\circ), \delta_C = \sin(-45^\circ)$ .

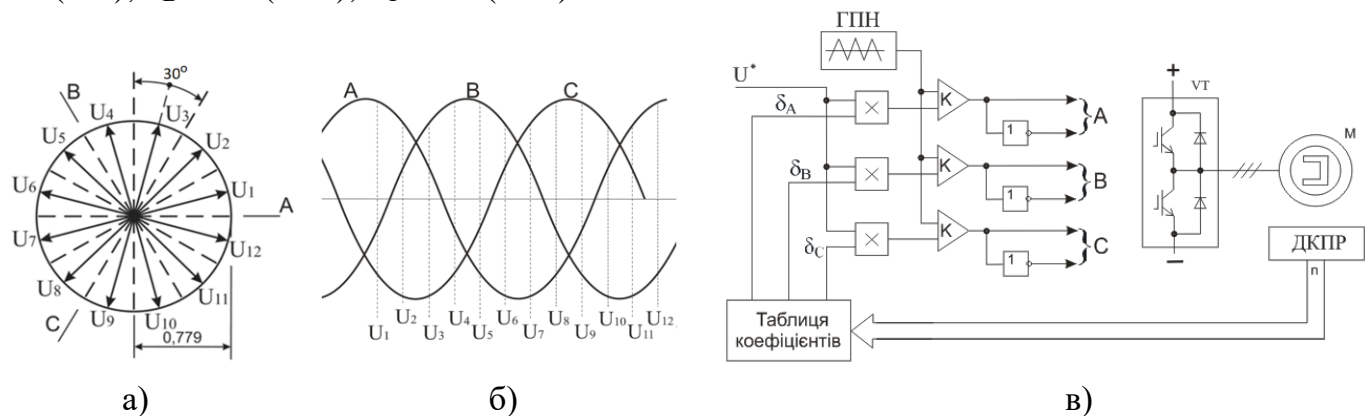


Рис. 2. Квазисинусоїдний спосіб дискретної комутації обмоток якоря БДПС з 6-а точковими ДКПР: а) базові вектори, б) їх відповідність миттєвим значенням напруги якоря, в) функціональна схема БЕП

Для оцінки показників КС-комутації проведені дослідження на створених комп'ютерних моделях. Вони показали, що гармонічні спотворення струму не залежать від величини струму, проте залежать від кількості точок ДКПР  $n$  на секцію обмотки якоря та від безрозмірного параметра, названого нами коефіцієнтом фільтрування:  $k_\phi = (L/R) f = T_e/T_u$ , де  $L$  і  $R$  – індуктивність та активний опір фазної обмотки якоря;  $f = T_u^{-1} = p\omega/(2\pi)$  – частота сформованої фазної напруги. Проведені порівня-

льні комп'ютерні дослідження віртуальних моделей БЕП з найкращою з традиційних  $180^\circ$  та запропонованою КС 12-векторною (6-точковий ДКПР з дискретністю  $30^\circ$  ел.) системами комутації обмоток якоря показали, що за КС-комутації коли-

Таблиця 1  
Порівняння систем комутації БДПС ( $M_n; \delta = 0,5; f_{ШІМ} = 2$  кГц)

Показ-ник	$120^\circ$			$150^\circ$			$180^\circ$		
	sin 3 кл.	sin 6 кл.	trap 6 кл.	sin 3 кл.	sin 6 кл.	trap 6 кл.	sin 3 кл.	sin 6 кл.	trap 6 кл.
$\delta M$	0,475	0,250	0,213	0,325	0,188	0,280	0,313	0,175	0,285
$THD_I$	0,222	0,146	0,154	0,140	0,085	0,110	0,156	0,080	0,086
$\eta_\Sigma^*$	0,957	0,972	0,915	0,981	0,947	0,898	0,970	0,951	0,902
$\alpha_1$	$\pm 21^\circ$	$\pm 12^\circ$	$\pm 11^\circ$	$\pm 16^\circ$	$\pm 6^\circ$	$\pm 12^\circ$	$\pm 17^\circ$	$\pm 6^\circ$	$\pm 12^\circ$
$\theta_{opt}$	$-20^\circ$	$-13^\circ$	$-13^\circ$	$2^\circ$	$8^\circ$	$7^\circ$	$29^\circ$	$39^\circ$	$37^\circ$

вання електромагнітного моменту та кутової швидкості в 6-7 разів менші.

За конкретного значення кута комутації  $\theta_{\text{opt}}$  відносний ККД  $\eta_{\Sigma}^*$  має досить високі значення, які зростають зі збільшенням кутової швидкості та навантаження. Проте  $\theta_{\text{opt}}$  відповідає лише для одному напрямку обертання. Для реверсивного БЕП необхідне симетричне відносно обмоток якоря встановлення ДКПР:  $\theta = 0$ . Оскільки КС-метод комутації обмоток якоря забезпечує можливість шляхом регулювання коефіцієнтів шпаруватості  $\delta_A, \delta_B, \delta_C$  легко змінювати орієнтацію базових векторів, то доцільно ввести корекцію кута  $\theta$  за, наприклад, значеннями  $M$  і  $\omega$ . Керування БЕП шляхом формування модуля вектора напруги якоря та кута  $\theta$  – випередження цього вектора відносно вектора ЕРС – фактично можна назвати полярним способом керування. Проведені теоретичні дослідження, підтверджені комп'ютерним моделюванням, показали, що з достатньою точністю просту корекцію кута  $\theta$  достатньо проводити за миттєвим значенням електромагнітної потужності двигуна.

Шляхом кмп'ютерного симулювання показано, що значного зниження пульсацій електромагнітного моменту БДПС в БЕП можна також досягти в двоякірній конструкції електричної машини з ПМ за кутового зміщення якорів, рівного половині дискрети встановлення точкових ДКПР.

**Четвертий розділ** присвячено розробленню алгоритму обробки вихідних напруг інформаційних обмоток синхронного тихохідного комплексного давача кутової швидкості, напрямку обертання та величини кута положення ротора з метою створення БЕП на базі СМПМ.

Для низки об'єктів, перед якими ставляться високі вимоги щодо точності позиціонування, слідкування, стабільності обертання з інфранизькими швидкостями в одних режимах і водночас забезпечення високих рівнів кутових швидкостей і прискорень в інших найкраще поєднати вказані вимоги вдається за допомогою БЕП на базі синусоїдальної СМПМ. Якісне регулювання швидкості таких електроприводів у широкому діапазоні можливе лише за наявності багатоточкового ДКПР та давача швидкості. У випадку БЕП з багатополісною СМПМ великого діаметру пропонується розмістити на якорі трифазну інформаційну обмотку, яка, взаємодіючи з основними чи додатково розміщеними на роторі ПМ, виконуватиме роль синхронного тахогенератора (ТГ). Для його якісної роботи необхідно розробити відповідний алгоритм оброблення вихідних напруг ТГ, метою якого є визначення поточного кута положення ротора  $\varphi$ , модуля його кутової швидкості  $\omega$ , знаку  $\omega$  та забезпечення низки заходів щодо підвищення надійності отриманої інформації.

Якщо поточні значення фазних напруг інформаційних обмоток

$$U_1(t) = U_a \sin(\varphi); \quad U_2(t) = U_a \sin(\varphi + 120^\circ); \quad U_3(t) = U_a \sin(\varphi + 240^\circ) \quad (12)$$

додати та відняти попарно, наприклад,

$$U_1 + U_2 = U_a \sin(\varphi + 60^\circ); \quad U_1 - U_2 = \sqrt{3} U_a \cos(\varphi + 60^\circ), \quad (13)$$

то з (13) отримуємо інформацію про кут  $\varphi_{1-2} = \varphi + 60^\circ = \arctg\left(\sqrt{3} \frac{U_1 + U_2}{U_1 - U_2}\right)$ .

Аналогічно отримуються поточні значення  $\varphi_{2-3}$  та  $\varphi_{3-1}$ , які за сталої кутової швидкості мають пилкоподібний лінійно наростаючий характер. Зміна напрямку обертання призведе до зміни характеру отриманих функцій: з наростання до спадання або навпаки. Таким чином, основні вирази, за якими визначаються потрібні механічні змінні руху, можна на прикладі обчислення за напругами  $U_2(t)$  і  $U_3(t)$  представити так:

- напрям обертання

$$\text{sign}(\omega) = \begin{cases} +, & \text{якщо } \varphi_{2-3,j} > \varphi_{2-3,j-1}; \\ -, & \text{якщо } \varphi_{2-3,j} < \varphi_{2-3,j-1}, \end{cases} \quad (14)$$

де  $\varphi_{2-3,j-1}$ ,  $\varphi_{2-3,j}$  – попереднє і поточне значення визначеного кута  $\varphi_{2-3}$ ;

- модуль амплітудного значення кутової швидкості

$$|\omega| = \frac{U_1}{\sin \varphi_{2-3}} = \frac{e_1}{\sin \varphi_{2-3}}, \quad (15)$$

- кут положення ротора в ел. град.

$$\varphi = \begin{cases} \varphi_{2-3}, & \text{якщо } \text{sign}(\varphi_{2-3}) = \text{sign}(U_1) \ \& \ U_1 > 0; \\ \varphi_{2-3} + 90^\circ, & \text{якщо } \text{sign}(\varphi_{2-3}) \neq \text{sign}(U_1); \\ \varphi_{2-3} + 270^\circ, & \text{якщо } \text{sign}(\varphi_{2-3}) = \text{sign}(U_1) \ \& \ U_1 < 0. \end{cases} \quad (16)$$

Основними факторами, що знижують точність визначення кутової швидкості є відхилення від кутової, амплітудної симетрії трифазної системи напруг інформаційних обмоток та вміст вищих гармонік у цих напругах. Вказані фактори зумовлені конструктивними особливостями отриманого ТГ. У зв'язку з його багатополосністю вплив окремих неточностей і відхилень параметрів, що мають місце в конструкції ТГ, знижується завдяки усередненню між взаємодією окремих пар полюсів ротора з

окремими секціями обмоток статора. Окремі з цих неточностей і відхилень мають випадковий характер, інші – систематичний.

Розглянуто по чергово вплив кожного з названих вище факторів на точність визначення кутової швидкості  $\omega$ . Розроблена методика та програма в середовищі MathCad для комп'ютерного дослідження відносної похибки визначення кутової швидкості, що зумовлена дією фазних напруг з відхиленнями від симетрії та синусоїдальності, дає змогу оперативно проводити аналіз різних алгоритмічних вирішень. Для прикладу, на рис. 3 показано ре-

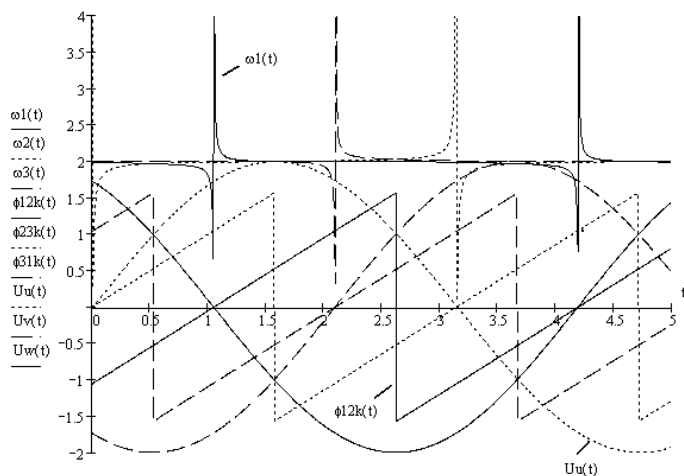


Рис. 3. Результати розрахунку за виразами (14)-(18) для випадкового кутового зміщення в одній із фаз величиною  $\Delta\alpha_u = 0,5$  ел. град.



зультати обчислень за кутової несиметрії, з яких видно, що найбільші похибки виникають в околі переходів фазних напруг ТГ через нуль. Аналогічне спостерігається і за інших видів несиметрії. Для усунення цих похибок запропоновано прийоми вирізання та усереднення, які ґрунтуються на наявності трьох каналів інформації, зсунутих між собою на  $60^\circ$  ел. Це дає змогу «вирізати» частини з найбільшими похибками в кожному з каналів, усереднити залишену інформацію і тим самим суттєво знизити рівень відносної похибки визначеної кутової швидкості.

Для дослідження комплексного давача з розробленим алгоритмом визначення кутового положення і кутової швидкості ротора СМППМ в БЕП, створено віртуальну комп'ютерну модель в Matlab/Simulink, яка працює з дискретністю, що імітує роботу цифрового контролера. Основними частинами розробленої комп'ютерної моделі є підсистема СМППМ, блок синхронного ТГ та три аналогічні підсистеми, призначені для визначення кутового положення і кутової швидкості ротора за розробленим алгоритмом. На моделі досліджувався БЕП азимутальної осі обертання оптичного телескопа масою 60 т з основними параметрами СМППМ  $\omega_n = 2 \text{ с}^{-1}$ ,  $M_n = 4000 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ,  $p_n = 44$ ,  $J = 30000 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ .

У п'ятому розділі наведено результати експериментальних досліджень, а також розробки БЕП, в яких використано результати дисертаційної роботи.

Для експериментальних досліджень роботи КС-комутації було використано створену в рамках госпдоговірної НДР систему БЕП на основі багатополусної ( $p = 22$ ) СМППМ інфранизької швидкості (рис. 4). Комутація обмоток якоря СМППМ здійснювалася мостовим транзисторним інвертором (транзистори MOSFET типу IRF3205) за принципом КС трифазної ШІМ, що синхронізована за кутом положення ротора за допомогою абсолютного енкодера фірми Küeбler (Optic 5876), вихідним сигналом його є 12-розрядний код Грея. Систему керування реалізовано на основі 8-розрядного мікроконтролера Atmega128-16AU. Кутова швидкість двигуна регулювалася шляхом зміни амплітуди напруги, що прикладається до обмоток якоря за допомогою понижувального транзисторного перетворювача постійної напруги.

Використання створеної системи БЕП дало можливість виконати імітацію КС-комутації з формуванням різної кількості базових векторів фазної напруги. Завдяки застосованому у системі багатоточковому енкодеру було зімітовано 5 варіантів розміщення дискретних ДКПР на секцію обмотки якоря: 3, 4, 6, 9, 12-точкових відповідно з 6, 8, 12, 18 та 24 базовими векторами на період. Для прикладу, на рис. 5 для кількості ДКПР 6 та 9 приведено осцилограми фазних струмів, зняті за допомогою цифрового осцилографа з струмового шунта, кутової швидкості, модуля фазної напруги (сформованої ШІМ) та кута положення ротора СМППМ. Значення кута на осцилограмах приводяться у ел. град. від  $0$  до  $360^\circ$ , значення напруги та кутової швидкості – у цілих одиницях, перетворе-

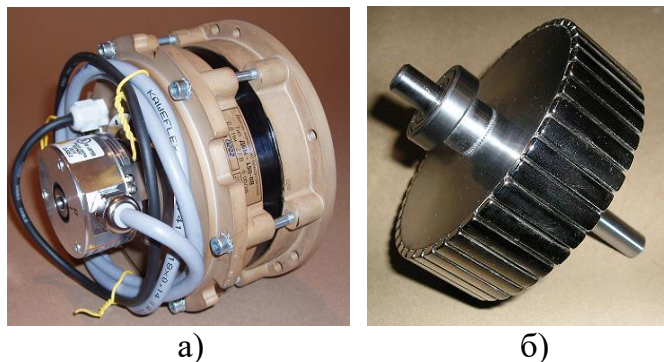


Рис. 4. Багатополусна СМППМ з енкодером (а) та її ротор (б)



них з двійкового коду мікроконтролера, що дає змогу оцінити їх форму. Вісь  $x$  на даних осцилограмах представляє точки відліку 12-розрядного абсолютного енкодера.

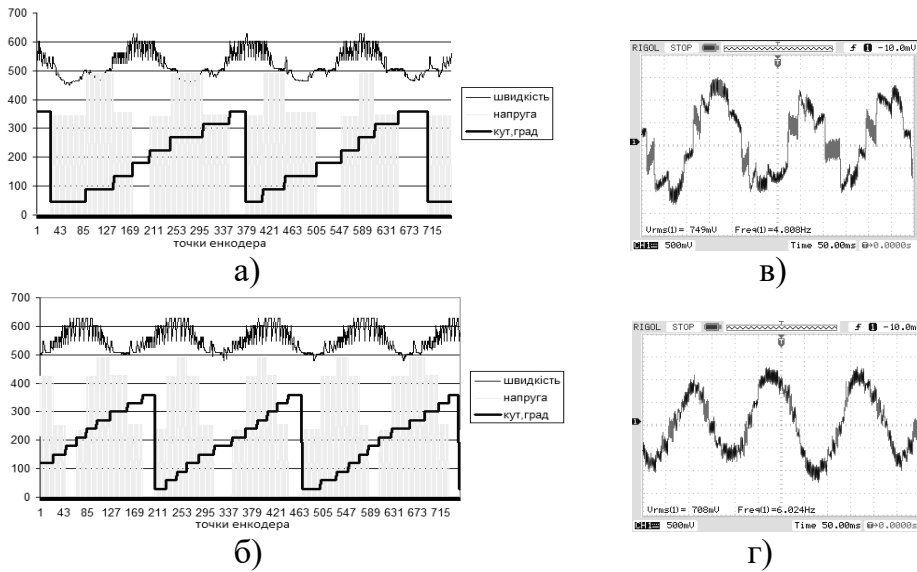


Рис. 5. Осцилограми кутової швидкості, фазної напруги і кутового положення ротора (а),(б) та фазного струму (в),(г) для БЕП з КС-комутацією обмоток якоря СМПМ з різною дискретністю ДКПР на секцію якоря: а), в) – 6 точок; б), г) – 9 точок

Полярне керування з КС-комутацією було застосовано в БЕП башти бронетранспортера та роботизованого комплексу для виконання наземних завдань (рис. б), де показало свою працездатність та енергетичну ефективність.



Рис. 6. Фото розробок із застосуванням БЕП: а) башта бронетранспортера, б) роботизований комплекс для виконання наземних завдань

Отримані в дисертаційній роботі результати знайшли своє застосування в низці розробок, які проводяться колективами дослідників у Львівській політехніці.

Створено установку для проведення інтерферометричних вимірювань показників заломлення в кристалічних матеріалах за допомогою лазера, яка поєднує в собі керувану мікроконтролером механічну систему з БЕП, що прецизійно повертає із заданою дискретою в межах певного куту інтерферометр Мікельсона. Завдяки застосуванню полярного керування вектором напруги якоря багатополісної СМПМ з КС-комутацією, а також застосування програмного керування за принципом дроблення кроку високоточний БЕП дав змогу досягти мінімального кута повороту 0,003 град.

У Львівській політехніці також проводяться роботи щодо створення нових типів суперконденсаторів з неорганічним електролітом. Для таких робіт створена спеціальна вальцювальна машина з підігрівними електродами. Виготовлено тихохідну систему БЕП вальців, які між собою механічно зв'язані. Для приводу використано багатополісну СМППМ з КС-комутацією її обмоток якоря.

Перевірка працездатності розроблення комплексного давача кутового положення і кутової швидкості ротора проводилася на експериментальній установці з трифазною синхронною мікромашиною, яка приводиться в рух регульованим електроприводом постійного струму. Результати вимірянних фазних ЕРС обертання через плату ЦАП-АЦП "Ада" передавались на персональний комп'ютер програмі, написаній мовою Pascal, що реалізує розроблений алгоритм.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливе науково-практичне завдання – дослідження особливостей БЕП та розроблення нових ефективних систем електронної дискретної та неперервної комутації обмоток якоря багатополісних електричних двигунів з ПМ в БЕП. Отримані в роботі результати дають можливість зробити такі загальні висновки.

1. Останнім часом БЕП успішно застосовуються в об'єктах приводу, де вимагаються висока точність відпрацювання завдання електромагнітного моменту, кутової швидкості і переміщення, надійність, довговічність та ремонтпридатність, наприклад: роботи і маніпулятори, астронавігаційні системи, системи наведення та стеження, мотор-колеса електричних транспортних засобів, генератори вітроустановок, ліфти і багато інших. Проте, не дивлячись на поширення БЕП, до цього часу між дослідниками триває дискусія щодо їх переваг та недоліків порівняно з традиційними редукторними приводами.

2. Проведені теоретичні дослідження закономірностей електромагнітної редукції в СМППМ дали можливість встановити та пояснити тенденції зміни параметрів та показників системи електроприводу при збільшенні кількості пар полюсів СМППМ для побудови БЕП. Так, у БЕП має місце суттєве зменшення індуктивності обмотки якоря, яке разом із зростанням активного опору якоря забезпечує значне зниження електромагнітної сталої часу обмотки якоря. Це призводить до збільшення пульсацій струмів якоря та, відповідно, електромагнітного моменту машини. Значне зростання модуля статичної жорсткості механічної характеристики багатополісної СМППМ в БЕП забезпечує лише незначне зростання електромеханічної сталої часу приводу, не дивлячись на великий момент інерції об'єкта приводу та відсутність механічного редуктора. Енергетичні показники СМППМ при цьому теж залишаються достатньо високими, а всього ЕП зростають. Маса та габарити багатополісної СМППМ значно збільшуються, проте маса СМППМ не значно перевищує сумарну масу високошвидкісного двигуна з механічним редуктором.

3. За дискретної електронної комутації обмоток якоря двигуна в БЕП мале значення електромагнітної сталої часу призводить до значних пульсацій струмів якоря під час перемикань транзисторів силового комутатора, що спричинює відповідні пульсації електромагнітного моменту двигуна. За відсутності

механічного редуктора ці пульсації безпосередньо передаються об'єктові приводу, що викликає вібрації та шуми і негативно впливає на надійність приводу. Через порівняно невелике значення електромеханічної сталої часу приводу пульсації моменту викликають відповідні пульсації кутової швидкості двигуна. Ці особливості багатополусної електричної машини з ПМ в БЕП зумовлюють перегляд традиційних та пошук нових способів дискретної комутації обмоток якоря двигуна, які б забезпечували зменшення пульсацій його електромагнітного моменту.

4. Проведені дослідження поширених способів дискретної комутації обмоток якоря ДБПС щодо пульсацій струмів якоря та електромагнітного моменту, а також ККД двигуна дали змогу рекомендувати для застосування в БЕП такі: для електричних машин з ПМ і трапецевидною формою ЕРС –  $120^0$  систему комутації, для машин із синусоїдальною формою ЕРС –  $180^0$ . З метою зниження пульсацій струмів якоря та електромагнітного моменту двигунів з ПМ у БЕП, для поширених систем дискретної комутації обмоток якоря запропоновано низькопульсаційні способи ШІМ, які дають змогу знизити пульсації моменту приблизно на 40%.

5. Запропонований та розроблений метод КС-комутації обмоток якоря СМІМ у БЕП дає змогу знижувати пульсації електромагнітного моменту в залежності від поставлених вимог шляхом збільшення точок дискретної фіксації положення ротора. Застосування методу полярного керування вектором напруги якоря за КС-комутації дає можливість забезпечувати максимальні енергетичні показники приводу в залежності від умов роботи простими засобами автоматичного керування. Подальшого зниження пульсацій електромагнітного моменту БДПС в БЕП приблизно у 3 рази можна досягти в двоякірній конструкції електричної машини з ПМ за кутового зміщення якорів, рівного половині дискрети встановлення точкових ДКІР.

6. Розроблений алгоритм цифрової обробки вихідних напруг інформаційних обмоток синхронного тихохідного ТГ, оцінка його чутливості до можливих систематичних та випадкових кутових, амплітудних і гармонічних відхилень цих напруг, а також запропоновані прийоми вирізання та усереднення дали можливість отримати досить простий комплексний давач кута положення ротора, кутової швидкості та напрямку обертання з метою створення БЕП на базі СМІМ.

7. Розроблені в дисертації нові методи дискретної багатоточкової КС-комутації обмоток якоря БДПС та полярного керування вектором напруги якоря показали свою ефективність під час експериментальних досліджень та знайшли успішне застосування у низці розробок, які проводилися у Львівській політехніці з метою створення систем електроприводів для різних об'єктів: БЕП камери спостереження, а також башти бронетранспортера, приводу мотор-колів роботизованого комплексу для виконання наземних завдань, БЕП в установках для проведення науково-дослідних робіт. Результати роботи використовуються також у навчальному процесі у Львівській політехніці.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Щур І.З., Малярчук С.О., Козій В.Б. Алгоритм роботи комплексного давача електричного кута положення, швидкості і напрямку обертання для тихохідного електропривода. *Електроенергетичні та електромеханічні системи: Вісн. Націон. ун-ту "Львівська політехніка"*. 2005. №544. С. 168-173.
2. Щур І.З., Малярчук С.О., Козій В.Б. Система безредукторного електропривода інфранизьких частот обертання. *Електромашинобудування та електрообладнання. Тематичний випуск: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика*. Київ, 2006. Вип. 66. С. 77-78.
3. Щур І.З., Козій В.Б., Костинюк Л.Д. Підвищення точності визначення кутової швидкості за напругами синхронного тихохідного тахогенератора. *Електроенергетичні та електромеханічні системи: Вісн. Націон. ун-ту "Львівська політехніка"*. 2006. №563. С. 165-173.
4. Щур І.З., Козій В.Б. Вплив конструктивних похибок синхронного тахогенератора на рівень пульсацій моменту і кутової швидкості безконтактного тихохідного електропривода. *Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. Сб. научн. тр. Днепродзержинск. госуд. техн. ун-та (технические науки). Тематич. вып.* Днепродзержинск, 2007. С. 524-526.
5. Щур І.З., Козій В.Б. Принципи комутації безконтактного двигуна з постійними магнітами у безредукторному електроприводі. *Вестн. Націон. ун-та «Харьк. политехн. ин-т»: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика*. 2008. Вип. 30. С. 427-430.
6. Система прямого безконтактного електропривода інфранизької швидкості з мікроконтролерним керуванням / Щур І.З., Макарчук О.В., Козій В.Б. та ін. *Наук. праці Донецького націон. техн. ун-ту, Серія «Електротехніка і енергетика»*. 2013. Вип. 1(14) (186). С. 317-323.
7. Козій В.Б. Експериментальні дослідження безредукторного електропривода на базі VLDC із квазісинусоїдною комутацією обмоток якоря. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2013. Вип. 2/2013 (22). Част. 2. С. 153-157.
8. Rusek A., Shchur I., Kozij V. Bezprzekładniowe napędy elektryczne zawierające maszyny synchroniczne z magnesami trwałymi. *Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe*. 2014. Nr 101/1. S. 81-88.
9. Щур І.З., Козій В.Б. Квазісинусоїдний принцип безконтактної позиційної комутації обмоток якоря синхронних машин з постійними магнітами в безредукторному електроприводі. *Електроінформ*. 2009. №2. С. 6-9.
10. Щур І.З., Козій В.Б. Полярне керування безредукторним безконтактним електроприводом постійного струму з квазісинусоїдною позиційною комутацією обмоток якоря. *Тематичний випуск наук.-техн. журналу «Електроінформ»: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика*. Львів, 2009. С. 158-161.
11. Paranchuk Y., Evdokimov P., Koziy V., Tsyapa V. Mathematical modelling and experimental determination of parameters of the guidance system of weaponry complex. *Computational Problems of Electrical Engineering*. 2018. Vol. 8, № 2. P. 73-78.

12. Безконтактний двигун постійного струму / Щур І.З., Козій В.Б: пат. UA50019U Україна: МПК H02K 16/00, H02J 29/06. № u 2009 11077; заявл. 02.11.2009, опубл. 25.05.2010, Бюл. №10.

13. Andrushchak N., Koziy V., Karbovnyk I., Andrushchak A. Automated optical refractive index measurements using LabVIEW controlled gearless motor. *Proc. XXII Ukrainian-Polish Conf. (CADMD'2014)*, Oct. 10-11, 2014, Lviv, Ukraine. P. 122-127.

14. Hybrid electric energy storage module for distributed energy storage systems based on ecologically acceptable supercapacitor / Shchur I., Grygorchak I., Stotsko Z., Borysyuk A., Shvets R., Sheremeta R., Koziy V. *Proc. 2019 IEEE 2nd Ukraine Conf. on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, July 2-6, 2019, Lviv, Ukraine. P. 395-400.

## АНОТАЦІЯ

**Козій В. Б. Покращення характеристик безредукторних приводів на основі синхронного двигуна з постійними магнітами та електронним комутатором.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи». – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2020.

Дисертація спрямована на вирішення важливого науково-практичного завдання – дослідження особливостей безредукторних електроприводів (БЕП) та розроблення нових ефективних систем електронної комутації обмоток якоря багатополюсних електричних двигунів з постійними магнітами (ПМ) в БЕП. Проведені теоретичні дослідження закономірностей електромагнітної редукції в синхронній машині з ПМ (СМПМ) дали можливість встановити та пояснити тенденції зміни параметрів та показників системи електроприводу при збільшенні кількості пар полюсів СМПМ для побудови БЕП. Це дало змогу розробити нові, більш придатні для БЕП способи дискретної та неперервної електронної комутації обмоток якоря за допомогою транзисторних інверторів напруги. Показано, що дискретну комутацію в електричних машинах з ПМ і трапецевидною формою ЕРС найефективніше здійснювати з провідністю транзисторів протягом  $120^{\circ}$  ел., а для машин із синусоїдальною формою ЕРС – протягом  $180^{\circ}$ . З метою зниження пульсацій струмів якоря у двигунах з ПМ у БЕП, для поширених систем дискретної комутації обмоток якоря запропоновано способи ШІМ, які дають змогу знизити пульсації моменту приблизно на 40%. Запропоновано та розроблено метод квазісинусоїдної (КС) комутації обмоток якоря двигунів у БЕП, який дає змогу знижувати пульсації електромагнітного моменту в залежності від поставлених вимог шляхом збільшення точок дискретної фіксації положення ротора. Застосування способу полярного керування вектором напруги якоря за КС-комутації дає можливість забезпечувати максимальні енергетичні показники приводу в залежності від умов роботи. Розроблено алгоритм цифрової обробки вихідних напруг інформаційних обмоток синхронного тихохідного тахогенератора та оцінено його чутливість до можливих систематичних та випадкових кутових, амплітудних і гармонічних відхилень цих напруг. Проведені експериментальні досліджен-

ня підтвердили працездатність та ефективність запропонованих рішень, низка з яких знайшли практичне застосування в реальних розробках.

**Ключові слова:** безредукторний електропривод, багатополосна електрична машина, синхронна машина з постійними магнітами (СМПМ), безщітковий двигун постійного струму (БДПС), транзисторний комутатор, дискретна комутація обмоток якоря, неперервна комутація обмоток якоря, давач кутового положення ротора.

## ABSTRACT

**Koziy V. B. Improving the performance of gearless drives based on a synchronous motor with permanent magnets and an electronic commutator. – *On the rights of manuscript.***

The dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.09.03 – electrotechnical complexes and systems. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2020.

Gearless or direct drive (DD) is a promising area of modern electromechanics, which is rapidly expanding. The advantages of DDs over traditional gear drives are increased reliability and energy efficiency, higher speed and accuracy of torque and velocity control, easier implementation, no noise. In this case, the mechanical reduction of speed and the corresponding increase of torque is replaced by electromagnetic reduction due to the increase in the number of pairs of poles of the machine and, accordingly, its size. Electric machines with permanent magnets (PM) on the rotor are the most suitable for the implementation in DDs, because they provide high-energy performance for a relatively large air gap. Brushless implementation of the electric drive system based on such machines is achieved by means of a power semiconductor converter, often built by transistors, which controls the currents in the machine armature windings according to the angular position of the rotor. A number of features of a multipole electric machine with PMs determine the revision of traditional methods of positional electronic switching of its armature windings in order to reduce the electromagnetic torque ripple and ensure high energy performance. The thesis is directed on the decision of this actual scientific and technical problem.

A theoretical study of changes in the main electrical and electromagnetic parameters of a synchronous machine with PMs (PMSM), as well as energy, dynamic and mass-dimension indicators of the drive with increasing number of pole pairs of the machine is conducted. Herewith, all expressions are obtained for a multipole PMSM with an arbitrary number of poles in p. u. relatively to the bipolar machine at the same values of the input electrical and output mechanical parameters of the drive. According to the obtained results, new requirements to the construction of electronic switching systems for PMSM and the formation of its electromagnetic torque in DD are formed.

For three-phase machines with PMs and trapezoidal and sinusoidal back EMF of rotation, which are switched by a 6-transistor bridge voltage inverter, the basic indicators of three ways of switching with the transistor's conductivity during the armature voltage period of 120°, 150° and 180° el. were investigated on computer models. To reduce current ripple, PWM methods have been developed that eliminate the flow of reactive currents through the DC link and thus provide a 30-40% reduction in the ripple of the electromag-

netic torque. For a machine with a trapezoidal EMF shape, the best indicators in terms of torque ripple and energy efficiency were shown by the  $120^\circ$  switching method, and for a machine with a sinusoidal EMF shape – by the  $180^\circ$  switching method.

In order to further reduction of the electromagnetic torque ripple, a new method of low-point discrete switching, called quasi-sinusoidal (QS) switching, was proposed and investigated. Its essence is a discrete change according to the sinusoidal law of the duty cycles of the PWM of the phase voltages in accordance with the discrete signals of the point rotor position sensors (RPS). The number of signal points on the section can be set to achieve a given level of pulsations of the electromagnetic torque. The point sensors themselves, e.g. Hall sensors, can be placed in different sections of the armature winding. With the help of the proposed QS-switching by changing the ratio of the PWM duty cycles in different phases, you can also change the angle of the generalized armature voltage vector, and by the same change of the duty cycles of all phases – the amplitude of this vector. Thus, it is possible to carry out the so-called polar voltage control of PMSM in order to ensure maximum energy efficiency of the machine depending on its load.

To ensure the smoothness of the electromagnetic torque in the DD, the sinusoidal PMSM must be controlled by the sinusoidal armature currents, which must be formed by the signals of the continuous RPS. To do this, it is proposed to use a special signal three-phase armature winding and developed an algorithm for processing its three-phase EMFs, which provides current information about the angular position of the rotor, the angular velocity of the rotor and the direction of its rotation. The influence of different asymmetry (angular, amplitude) and harmonic deviations from the sinusoidality of the signal armature winding on the accuracy of the obtained integrated sensor is investigated. To eliminate regular significant emissions in the calculated values of the angular velocity, it is proposed to use the technique of cutting them in each of the three calculation channels within a certain angle. The subsequent reduction of the angular velocity error is achieved by applying the method of averaging between its obtained values in three or two channels depending on the cutting angle. Computer simulation taking into account the discrete operation of the digital processing system showed the efficiency of the proposed integrated sensor with the developed algorithm.

For the experimental study of QS-switching, a DD based on a 44-pole PMSM, a transistor voltage inverter, and an absolute 12-bit encoder was created. The microcontroller implements an encoder code processing algorithm and simulation of five variants of discrete RPS placement with 3, 4, 6, 9 and 12 points per armature winding section. In the experiments, waveforms of phase current, phase voltage and calculated values of the angular position and the angular velocity of the rotor were obtained. The results demonstrated the efficiency of DD with QS-switching of the armature windings and the improvement of the current shape while reducing of the RPS discreteness. In this way, a number of developments were implemented with the participation of the author.

**Key words:** direct drive (DD), multipole electric machine, permanent magnet synchronous machine (PMSM), brushless DC (BLDC) motor, transistor commutator, discrete switching of armature winding, continuous switching of armature winding, rotor position sensor.