

Національна академія наук України  
Інститут електродинаміки

ФІЛОМЕНКО АНТОН АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 621.313.8

**БЕЗКООНТАКТНИЙ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНИЙ ДВИГУН  
ЗВОРОТНО-ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ**

Спеціальність 05.09.01 - електричні машини і апарати

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі електромеханічних систем Інституту електродинаміки НАН України

Науковий керівник – доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Антонов Олександр Євгенович,**  
Інститут електродинаміки НАН України;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Петухов Ігор Сергійович,**  
Інститут електродинаміки НАН України,  
провідний науковий співробітник.

Офіційні опоненти: – доктор технічних наук, професор  
**Римша Віталій Вікторович,**  
Одеський національний політехнічний університет,  
проф. кафедри електричних машин;

– кандидат технічних наук, доцент  
**Гайденко Юрій Антонович,**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
ім. Ігоря Сікорського» МОН України,  
доцент кафедри електромеханіки.

Захист дисертації відбудеться « 06 » квітня 2021 р. об 11<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.187.03 в Інституті електродинаміки НАН України за адресою: 03057, Київ-57, пр. Перемоги, 56, тел. 366-26-45.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту електродинаміки НАН України за вищевказаною адресою: 03057, Київ-57, пр. Перемоги, 56.

Автореферат розісланий « 04 » березня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

О.В. Бібік

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Електромеханічні системи на основі безконтактних магнітоелектричних двигунів широко розповсюджені в таких галузях народного господарства, як медицина, космічна та військова галузь, авіапромисловість, виробництво механізмів автотранспорту. Деякі виробничі процеси вимагають від устаткування реалізації зворотно-обертального руху, наприклад у спеціальних ручних інструментах для медицини, техніки вимірювання та контролю, металообробки. При створенні подібних систем важливим напрямком є підвищення енергоефективності, зниження габаритів та маси, зменшення вартості виробництва.

Значний внесок у теоретичне та експериментальне дослідження електромеханічних систем на основі безконтактних магнітоелектричних машин, у тому числі для систем зворотно-обертального руху, внесли Барабанов В.А., Антонов О.Е., Кіреєв В.Г. Петухов І.С., Акинін К.П., Афонін А.А., Гребеніков В.В., Пересада С.М., Римша В.В., Радімов І.Н., Лозинський О.Ю., Щур І.З., Ткачук В.І., Макарчук О.В., Луковніков В.І., Кудараускас С.Ю., Арістов А.В., Копейкін А.І., Балагуров В.А., Бут Д.А., Денисов Ю.О., Ледовський А.Н., Овчинніков І.Е., Лебедев Н.І., Шимчак П., Кеніо Т., Нагаморі С., Bose В.К., Leonhard W. та інші відомі вчені.

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Формування траєкторій зворотно-обертального руху виконавчих органів механізмів є одним із завдань, що виникає при розробці ручних електроінструментів, медичних приладів, а також у будівельній техніці. При цьому важливими факторами, що визначають вибір раціональних структур систем зворотно-обертального руху, є діапазони регулювання амплітуди кута і частоти механічних коливань виконавчого елемента пристрою. Відомі технічні рішення ґрунтуються на використанні перетворювача обертового руху валу виконавчого двигуна у зворотно-обертальний рух валу механізму або ефекту механічного резонансу і характеризуються недоліками, обумовленими використанням додаткової ланки перетворення механічної енергії або обмеженим частотним діапазоном.

Розробка спеціалізованих електромеханічних систем зворотно-обертального руху припускає, з одного боку, побудову спеціальних структур виконавчих двигунів, з іншого боку, необхідна реалізація ефективних способів керування параметрами режимів їх роботи. Застосування безконтактного магнітоелектричного двигуна (БМД) із пружним магнітним зв'язком між статором і ротором є найбільш раціональним розв'язком завдання керування зворотно-обертальним рухом виконавчого елемента, при якому досягаються мінімальні масогабаритні показники і енергоспоживання.

У такому випадку виконавчий елемент пристрою встановлюється безпосередньо на вал двигуна, що дає можливість прямого регулювання частоти та амплітуди механічних коливань шляхом керування змінним струмом статора.

Принципова особливість роботи пристроїв зі зворотно-обертальним рухом робочого органу полягає у впливі реактивних моментів виконавчого двигуна на його статорну систему. Якщо пристрій утримується в руках, то вібрація передається на руки працюючої людини. Відомі підходи до розв'язку цієї проблеми не забезпечують ефективне придушення вібрацій у всьому частотному діапазоні, а, крім того, пов'язані зі збільшенням масогабаритних показників пристроїв.

Тому розробка принципів побудови, структур, математичних моделей і методів розрахунків спеціалізованого БМД зворотно-обертального руху, у тому числі з активною компенсацією негативної дії реактивних знакозмінних моментів, що прикладаються до корпусу пристрою, є актуальним науковим завданням.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.** Дисертаційна робота виконувалась в Інституті електродинаміки НАН України відповідно до планів Держбюджетних НДР, затверджених Президією НАН України, та пов'язана з наступними НДР: «Розробка принципів підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів енергії магнітоелектричного типу та створення приводних і генеруючих систем на їх основі» (шифр «Магнетон», Постанова Бюро ВФТПЕ НАН України від 13.10.2008 р. протокол № 13, 2009-2013 рр., № ДР 0108U010769); «Створити методи активної компенсації реактивних зусиль, моментів та просторових переміщень в електромеханічних системах магнітоелектричного типу та розробити принципи побудови пристроїв на їх основі» (шифр «Индем», Постанова Бюро ВФТПЕ НАН України від 15.10.2013 р. протокол № 14, 2014 –2018 рр., № ДР 0113U006532); «Створення науково-технічних основ інтелектуалізації технологічних процесів та засобів вимірювання, керування, моніторингу й діагностування в електроенергетичних та електротехнічних системах» (шифр «ІНТЕХЕН», Постанова Бюро ВФТПЕ НАН України від 10.07.2018 р. протокол № 12, 2018-2019 рр., № ДР 0118U005367); «Розробити наукові засади та принципи побудови керованих н-ступеневих магнітоелектричних систем з екстремальними характеристиками» (шифр «Екстремум», Постанова Бюро ВФТПЕ НАН України від 29.05.2018 р. протокол №9, 2019-2023 рр., № ДР 0119U001279); Розвиток теорії, розроблення методів інтелектуалізації технологічних процесів та засобів керування, моніторингу, діагностування й вимірювання в електроенергетичних та електротехнічних системах (ІНТЕХЕН-2, Постанова Бюро ВФТПЕ НАН України від 18.12.2019 р. протокол № 12, 2020-2021 рр., № ДР 0118U005367).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка принципів побудови, структур, математичних моделей спеціалізованих безконтактних магнітоелектричних двигунів зворотно-обертального руху, що забезпечує їхню реалізацію з однороторною, а також двороторною конструкцією при активній компенсації негативної дії реактивних знакозмінних моментів.

Досягнення поставленої мети передбачало розв'язок таких завдань:

- розробити принципи побудови і обґрунтувати раціональну структуру електромеханічного перетворювача для реалізації зворотно-обертального руху виконавчого елемента в обмеженому діапазоні зміни кута механічних коливань;
- визначити оптимальні співвідношення між складовими частинами системи збудження ротора і елементів пружного магнітного зв'язку, а також оптимальну геометрію статорної обмотки керування за умов мінімізації маси, габаритних розмірів і енергоспоживання;
- розробити математичну модель динамічного стану, що описує електромеханічні процеси в БМД зворотно-обертального руху та дозволяє досліджувати електромеханічні і частотні характеристики;
- розробити критерії оцінки ефективності режимів зворотно-обертального руху ротора двигуна;

- обґрунтувати і розробити принципи ефективного управління зворотно-обертальним рухом БМД;
- розробити принципи побудови і структури пристроїв з активною компенсацією реактивних знакозмінних моментів, що виникають при зворотно-обертальному русі основного виконавчого ротора електромеханічного перетворювача;
- розробити і впровадити БМД у комплексі електромеханічних приладів зі зворотно-обертальним рухом виконавчого елемента.

*Об'єкт дослідження* – процеси електромеханічного перетворення енергії в безконтактних магнітоелектричних машинах зворотно-обертального руху з пружним магнітним зв'язком між статором і ротором.

*Предмет дослідження* – структури, математичні моделі, характеристики, принципи керування і побудови безконтактних магнітоелектричних двигунів зі зворотно-обертальним рухом ротора.

**Методи дослідження.** При виконанні поставлених у роботі завдань використовувалися теорія електромеханічних систем і машин, методи математичного і фізичного моделювання, теорія автоматичного керування, методи скінчених елементів на основі ліцензованих програмних комплексів COMSOL і MATLAB для розрахунку електромагнітного поля у двовимірній постановці задачі.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Уперше встановлені аналітичні співвідношення між параметрами елементів структури безконтактного магнітоелектричного двигуна зворотно-обертального руху, використання яких дозволяє одержати оптимальні геометричні пропорції обмотки керування, а також магнітної системи із циліндричним магнітопроводом, дво полюсним намагніченим ротором і допоміжним постійним магнітом на статорі для реалізації ефекту магнітної пружини при забезпеченні максимуму електромагнітного моменту, що створюється обмоткою на одиницю споживаної електроенергії.

2. Розроблено математичну модель БМД зворотно-обертального руху, яка на відміну від існуючих моделей, враховує пружний магнітний зв'язок між статором і ротором, що дає можливість досліджувати електромеханічні характеристики двигуна на частоті напруги живлення і одержати частотні залежності амплітуди кута коливань ротора, діючого значення струму статора і показників ефективності режиму роботи, а саме відношення амплітуди кута коливань до квадрата діючого значення струму і амплітуду кутової швидкості коливань ротора, при різних варіантах формування керуючої напруги статора.

3. Вперше розроблено принцип активної компенсації реактивного знакозмінного моменту основного ротора безконтактного магнітоелектричного двигуна зворотно-обертального руху двороторної структури шляхом формування синхронного і протифазного моменту за допомогою допоміжного компенсуючого ротора, що дозволяє мінімізувати негативний вплив механічних вібрацій на корпус електромеханічного приладу.

4. Вперше розроблені структура двороторного БМД зворотно-обертального руху та принцип векторного керування допоміжним ротором шляхом зміни амплітуди і фазового зсуву змінного струму допоміжного статора, що дозволяє забезпечити активну компенсацію знакозмінних реактивних моментів основного ротора в заданому діапазоні частоти механічних коливань і змінного навантаження.

5. З урахуванням амплітудних та фазових частотних характеристик безконтактного магнітоелектричного двигуна зворотно-обертального руху, що отримані за умови формування змінної напруги статора довільної форми, встановлено нові співвідношення для розрахунку параметрів регуляторів амплітуди кута коливань ротора та діючого значення струму статора в залежності від величини частоти механічних коливань, що дозволяє підвищити точність реалізації режимів зворотно-обертального руху із заданими параметрами в умовах навантаження, що змінюється.

#### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Отримані теоретичні результати і рекомендації є основою для розробки спеціалізованих безконтактних магнітоелектричних двигунів зворотно-обертального руху, застосовуваних у різних типах електромеханічних приладів і інструментів.

2. Аналіз результатів досліджень електромеханічних характеристик БМД дозволив визначити принципи керування зворотно-обертальним рухом виконавчого елемента в розімкненій системі шляхом формування частотних функціональних залежностей параметрів керуючої змінної напруги, що дозволило мінімізувати апаратну частину структури.

3. Реалізація принципу активної компенсації реактивних знакозмінних моментів виконавчого елемента і створених двороторних структур БМД зворотно-обертального руху дозволяють проектувати ручний інструмент, позбавлений негативного впливу механічних вібрацій на руки оператора.

4. Результати роботи у вигляді оптимальних геометричних співвідношень між елементами магнітної системи, структура двороторного двигуна зі скомпенсованими реактивними моментами, принципи керування режимами зворотно-обертального руху впроваджені в конструкціях електромеханічних приладів, що випускаються Науково-виробничою фірмою «Елерон», м. Київ.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення і результати, які виносяться на захист, отримані автором особисто під керівництвом доктора технічних наук Антонова О.Є. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, авторові належить: у [1] – автором отримано аналітичні вирази оптимальних геометричних співвідношень системи збудження БМД; [2, 4] – розроблено математичні моделі двигунів з пружними зв'язками варіаційним методом Гамільтона на основі рівнянь Лагранжа другого роду; [3] – експериментально досліджено частотні залежності втрат на вихрові струми та гістерезис у магнітороводах; [5, 6] – автором розроблено принцип роздільного керування двома роторами для компенсації негативної реакції на корпус та досліджена система керування системи; [7] – проведено розрахунок електромеханічних характеристик двигуна; у [8, 9] – розроблено метод розрахунку системи керування амплітудою коливання ротора двигуна на основі частотних характеристик розімкненої системи та розраховано перехідні процеси параметрів регулювання;

**Апробація результатів дисертації.** Основний зміст дисертаційної роботи викладено та обговорено на: міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах» (Севастополь, 2013 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної електротехніки (ПСЕ-2014)» (Київ, 2014 р.), міжнародній науково-технічній конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики» (Київ, 2019 р.) та міжнародній науково-

технічній конференції «25th International Conference on Problems of automated electric drive. Theory and practice (PAEP-2020)» (Кременчук, 2020 р.). Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на Вченій раді Інституту електродинаміки НАН України (14 березня 2019 р.).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 14 наукових робіт, у тому числі 9 статей у наукових фахових виданнях України, з них 3 статті – входять до міжнародної наукометричної бази даних Scopus, 2 патенти України на винахід та 3 тези у збірниках матеріалів міжнародних науково-технічних конференцій.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертаційна робота викладена на 165 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 137 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 9 таблицями та 38 рисунками. Список використаних джерел містить 117 найменувань, із них 88 кирилицею та 29 латиницею.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, дано інформацію про зв'язок дисертації з науковими програмами, сформульовано мету та задачі наукових досліджень, показано наукову новизну, практичну цінність отриманих результатів, наведено відомості про апробацію результатів роботи, кількість публікацій та особистий внесок автора.

У **першому розділі** представлено результати аналізу літературних джерел щодо методів реалізації зворотно-обертального руху виконавчого елемента електропривода з різними типами електричних машин, наведено основні галузі господарства, де використовується зворотно-обертальний рух та сформульовано принципи побудови безконтактних магнітоелектричних двигунів (БМД) зворотно-обертального руху з урахуванням вимог та умов використання.

Магнітоелектрична схема побудови двигуна, де збудження магнітного поля ротора здійснюється постійними магнітами, дозволяє досягти мінімізації енергоспоживання і габаритів електромеханічного пристрою. Використання сучасних енергоємних магнітотвердих матеріалів на основі інтерметалічної композиції NdFeB дозволяє досягати найвищого ККД серед електромеханічних перетворювачів.

Вихідним регульованим параметром, що визначає режим роботи (БМД) зворотно-обертального руху є амплітуда кута коливань основного ротора відносно корпусу двигуна, причому регулювання цього параметра відбувається в діапазоні  $\pm 20$  градусів. Додатковою вимогою до режиму роботи двигуна може бути досягнення максимальної амплітуди кутової швидкості ротора на кожному напівперіоді коливань. Діапазон регулювання частоти коливань робочого елемента від 1 - 100 Гц. Контрольованою координатою системи керування є діюче значення струму статора за умов охолодження двигуна, керуючою координатою можуть бути змінні струм або напруга статорної обмотки. Максимальна споживана потужність двигуна - не більше 1000 Вт. Принципова особливість роботи інструментів зі зворотно-обертальним рухом виконавчого елемента полягає в реактивному впливі знакозмінних моментів ротора на статорну систему двигуна привода, що зв'язана з корпусом приладу.

За таких особливостей визначено принципи побудови ефективних БМД зворотно-обертального руху, які полягають у такому: 1) корисне навантаження розміщене безпосередньо на валу двигуна без застосування будь-яких проміжних механічних, магнітних або інших передач; 2) основою для побудови БМД зворотно-обертального руху є структура, що складається з безпазового статора з однофазною обмоткою, додатковим постійним магнітом для реалізації ефекту магнітної пружини та рухливого ротора з двополюсним постійним магнітом циліндричної форми на валу; 3) для компенсації негативного впливу знакозмінних реактивних моментів на корпус двигуна в структуру електромеханічної системи додатково вводиться компенсуючий ротор з постійним магнітом і відповідні йому магнітопровід, обмотка керування і допоміжний магніт.

У другому розділі представлено основні структури БМД для реалізації зворотно-обертального руху валу та проведені дослідження з пошуку оптимальних співвідношень між розмірами елементів магнітної системи, виходячи із залежності зміни середніх значень індукції у зазорі при варіюванні довжиною робочого проміжку, за умов сталості електричної потужності  $P$ , що розсіюється в обмотці.

БМД зворотно-обертального руху являє собою структуру, показану на рис. 1 а, де в корпусі 1 розміщені циліндричний безпазовий магнітопровід 5 і два підшипники 2, у яких встановлений вал ротора 3 з двополюсним постійним магнітом 4 і робочим виконавчим органом 9.

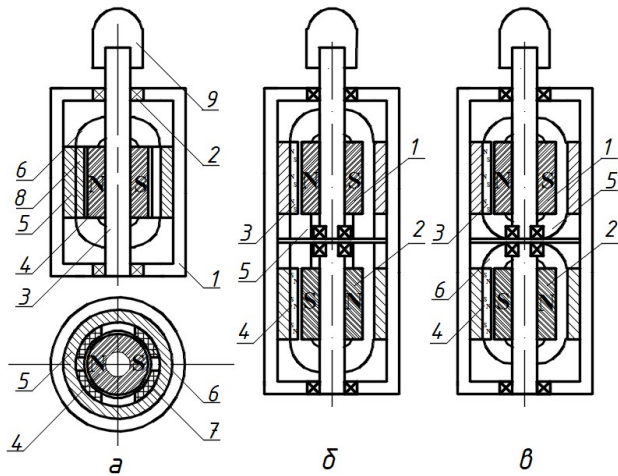


Рис. 1

На внутрішній поверхні магнітопроводу 5 розміщено дві котушки 6 і 7 обмотки статора, а в проміжку між котушками встановлений додатковий постійний магніт 8 для реалізації ефекту пружного магнітного зв'язку між статором і ротором. На рис. 1 б і в наведені структури дворотного БМД, де показані двополюсні постійні магніти основного 1 і допоміжного (компенсуючого) 2 роторів, обмотки основного 5 (для варіанту на рис. 1 б обмотка використовується спільна для обох роторів) і допоміжного компенсуючого 6 статорів з розділеними циліндричними магнітопроводами, а також два додаткові постійні магніти 3 і 4 пружного зв'язку роторів зі статорною частиною.

Для реалізації примусового зворотно-обертального руху валу в обмотці повинен протікати струм, який змінюється за періодичним законом. Таким чином, зміна частоти та амплітуди струму в обмотці дозволяє регулювати параметри зворотно-обертального руху виконавчого елемента. Коливання основного ротора викликають небажану реакцію корпусу приладу, тому для компенсації реактивних знакозмінних моментів БМД зворотно-обертального руху в структуру приладу може бути введений додатковий керований ротор (рис. 1 б, в).

Для реалізації примусового зворотно-обертального руху валу в обмотці повинен протікати струм, який змінюється за періодичним законом. Таким чином, зміна частоти та амплітуди струму в обмотці дозволяє регулювати параметри зворотно-обертального руху виконавчого елемента. Коливання основного ротора викликають небажану реакцію корпусу приладу, тому для компенсації реактивних знакозмінних моментів БМД зворотно-обертального руху в структуру приладу може бути введений додатковий керований ротор (рис. 1 б, в).

Оптимізація геометричних співвідношень між елементами магнітної системи виконана за умови відсутності насичення ферромагнітних елементів магнітної системи. Цільовою функцією оптимізації є досягнення максимуму електромагнітного моменту. Аргументом цільової функції оптимізації є відношення довжини повітряного

проміжку  $\delta$  до діаметра циліндричного ротора  $L_u = \delta/D$ , де  $\delta$  - довжина повітряного проміжку;  $D, d$  - зовнішній та внутрішній діаметри магніту (рис. 2).

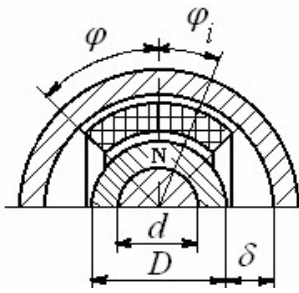


Рис. 2

Середнє інтегральне значення радіальних складових індукції в циліндричному проміжку для всього кутового діапазону  $\varphi$  становить  $B_u^{cp} = B_r \cdot b_u^{L_u} \cdot \sin \varphi / \varphi$ , де  $\varphi$  - кутова величина симетричної половини перетину активної зони обмотки,  $B_r$  - залишкова індукція магніту;  $B_r \cdot b_u^{L_u}$  - середня величина індукції в елементарній радіальній трубці зазору при  $\varphi_i = 0$  і заданому значенні  $L_u$ ;  $b_u^{L_u}$  - статична функція, що визначає крутизну падіння середнього значення індукції в циліндричному проміжку при його збільшенні.

Середнє значення плеча прикладання електромагнітної сили визначається як -  $r_{cp} = (D + \delta)/2$ , а середня довжина витка обмотки, що включає в себе активну і лобову частини -  $l_{cp} = 2(D + \delta) \sin \varphi \cdot \varphi + l_a$ . Введемо умову сталості електричної потужності  $P$ , що розсіюється в обмотці, виразивши при цьому опір обмотки через геометричні розміри проміжку. Вираз для числа витків прийме вигляд

$$W = \frac{\delta(D + \delta) \cdot \varphi \cdot \sqrt{k \cdot 2U}}{\sqrt{I \cdot \rho \cdot \delta(D + \delta) [2(D + \delta) \sin \varphi + \varphi \cdot l_a]}} \quad (1)$$

Підставимо отримані залежності для величин  $B_u^{cp}$  і  $W$  у вираз електромагнітного моменту, що створюється обмоткою з активною довжиною витка  $l_a$  і, враховуючи, що  $L_u = \delta/D$ , в результаті одержимо

$$M = B_u^{cp} \cdot I \cdot l_a \cdot W \cdot r_{cp} = \frac{B_r \cdot b_u^{L_u} \cdot l_a \cdot D^3 \cdot L_u (1 + L_u)^2 \cdot \sqrt{2k \cdot P}}{2\sqrt{\rho \cdot D^2 \cdot L_u (1 + L_u)}} \cdot \frac{\sin \varphi}{\sqrt{2D(1 + L_u) \sin \varphi + 2 \cdot \varphi \cdot l_a}} \quad (2)$$

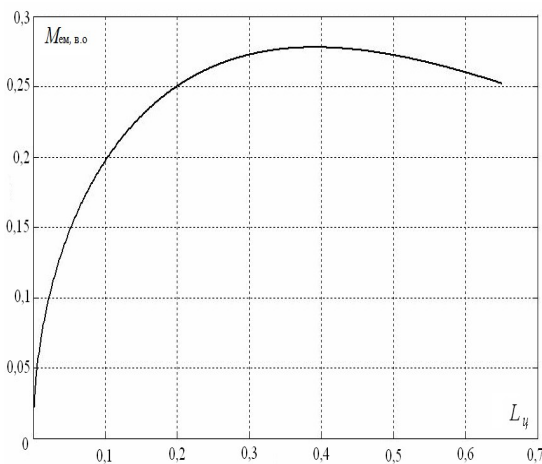


Рис. 3

Розв'язок екстремальної задачі для (2) по змінній  $L_u$  при будь-якому фіксованому куті  $\varphi$  виявило єдиний екстремум, що відповідає величині  $L_u = 0,39$ , що показано на рис. 3. Величина оптимального відносного проміжку отримана для БМД з цільним циліндричним дво полюсним магнітом ротора без центрального отвору ( $d/D = 0$ ). Якщо ж циліндричний магніт має центральну порожнину, то основа  $b_u$  показникової функції  $b_u^{L_u}$  буде залежати також від відношення внутрішнього і зовнішнього діаметрів

$d/D$ . Відповідно до цього буде змінюватися і оптимальне значення  $L_u$ . Це пояснюється тим, що у міру збільшення діаметра центрального отвору магніту нелінійно зменшуються абсолютні значення індукції в проміжку і, відповідно, величина

електромагнітного моменту не може бути скомпенсована збільшенням об'єму обмотки.

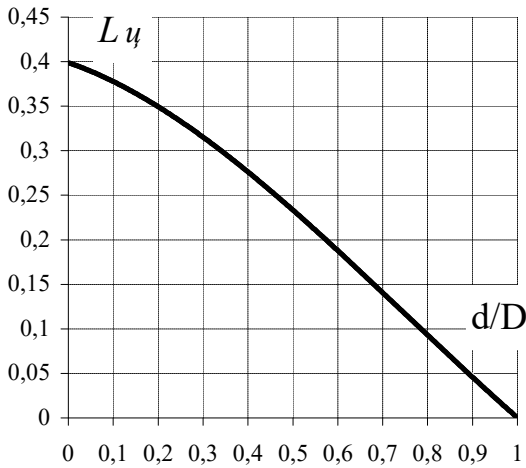


Рис. 4

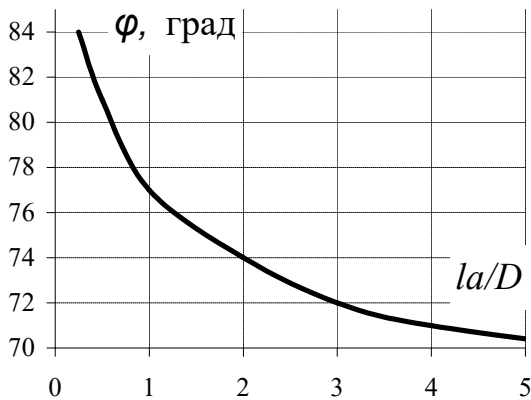


Рис. 5

Шляхом дослідження зміни індукції в проміжку для різних величин відношення  $d/D$  встановлено результуючу залежність оптимальних значень  $L_u(d/D)$ , що забезпечують максимальне значення моменту при зміні відношення  $d/D$  (рис. 4).

Пошук оптимального кутового розміру обмотки БМД проведено в узагальненому вигляді за критерієм максимуму електромагнітного моменту на одиницю затрачуваної електричної енергії. При цьому визначальною змінною у виразі моменту (2) обрано кутовий розмір обмотки  $\varphi$ , за умови фіксованого  $L_u$ . Дослідження (2) на екстремум по змінній  $\varphi$  при фіксованій  $L_u$  показало, що в межах фізично можливого діапазону зміни кута  $\varphi$  ( $0 \dots \pi/2$ ) положення точки екстремуму моменту залежить від співвідношення між діаметром циліндричного магніту ротора і його довжиною. Закон зміни кута  $\varphi_{opt}$ , що відповідає максимуму моменту, при змінному відношенні  $l_p/D$  наведений на рис. 5. Тут  $l_p = l_a/2$  - довжина активної частини ротора (довжина постійного магніту).

У третьому розділі розроблені математичні моделі однороторного двигуна зворотно-обертального руху та БМД двороторної конструкції з компенсацією реактивних моментів, а також проведено дослідження магнітного поля двигуна з метою оцінки насичення магнітопроводу.

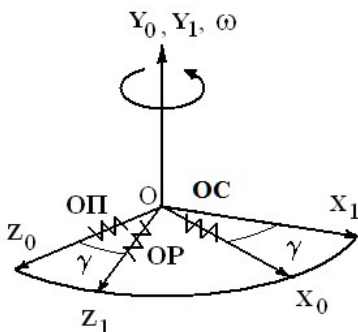


Рис. 6

Фізична модель БМД (рис. 6), яка відображає особливості цієї машини, містить дві обмотки: обмотка статора – ОС і обмотка електромагнітної пружини (ОП), які пов'язані з нерухомою системою координат  $X_0 Y_0 Z_0$  та обмотку збудження ротора (ОР), яка пов'язана з рухомою системою координат  $X_1 Y_1 Z_1$ , що розгорнута в деякий момент часу відносно нерухомої системи координат навколо осі ОУ на кут  $\gamma$ . В фізичній моделі магніти статора та ротора представлені обмотками ОР і ОП в яких відсутні втрати і протікає сталий за величиною струм. Модель динамічного

стану двигуна була побудована з використанням фундаментального інтегрального принципу Гамільтона, де за узагальнені координати обрано кут коливання ротора  $\gamma$  та електричні заряди у струмових контурах, а узагальненою швидкістю - кутову

швидкість ротора  $\dot{\gamma}$ . Рівняння динамічного стану БМД (отримано в результаті диференціювання рівняння Лагранжа 2-го роду по узагальненим координатам) з єдиною обмоткою керування, одним висококоерцитивним постійним магнітом ротора і додатковою обмоткою пружини статора з постійним струмом буде мати вигляд

$$\begin{aligned} J_Y \cdot \ddot{\gamma} - \Psi_X \cdot i_X \cdot \cos \gamma + \Psi_Z \cdot i_Z \cdot \sin \gamma + \dot{\gamma} \cdot v_Y &= m_Y; \\ L_X \cdot \frac{di_X}{dt} + \Psi_X \cdot \dot{\gamma} \cdot \cos \gamma + i_X \cdot R_X &= U_X; \quad -\Psi_Z \cdot \dot{\gamma} \cdot \sin \gamma + i_Z \cdot R_Z = U_Z. \end{aligned} \quad (3)$$

Щоб розв'язати систему рівнянь (3) було необхідно визначити коефіцієнти та змінні, що входять до неї, а саме потокозчеплення, індуктивність і активний опір обмотки. Залежності цих змінних і параметрів від струму в обмотці і кута відхилення ротора отримано з розрахунку магнітного поля в поперечному перерізі активної зони машини.

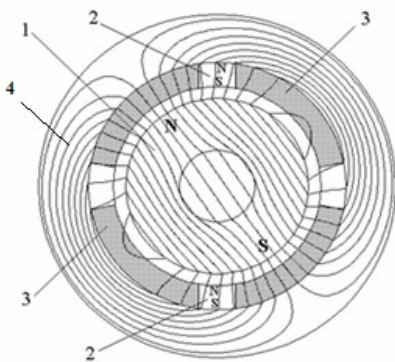


Рис. 7

Активна зона БМД зображена на рис. 7, де показані ізолінії поля векторного магнітного потенціалу в поперечному перерізі машини (1 – циліндричний магніт ротора, 2 – призматичні магніти статора, 3 – дзеркально відбиті котушки обмотки статора, 4 – магнітопровід). Моделювання двовимірному поля в поперечному перерізі може бути проведене з досить високою точністю і невеликими втратами розрахункового часу. Розрахунки проведено при наступних параметрах моделі: розміри магніту ротора – (14,6x24 мм; розміри магніту статора – 3x2,5x20мм; односторонній повітряний проміжок - 3,5мм; матеріал магнітів – NdFeB з

параметрами:  $B_r = 1,1$  Тл;  $\mu_m = 1,04$ ;  $\gamma_m = 7,5$  г/см<sup>3</sup>); зовнішній діаметр магнітопроводу - 26мм; матеріал магнітопроводу - масивна конструкційна сталь; номінальний момент інерції ротора з насадкою -  $J_Y = 3,35 \cdot 10^{-6}$  кг·м<sup>2</sup>; амплітуда напруги на виході джерела живлення - 14 В. Закон розподілу радіальної складової магнітної індукції (рис. 8) уздовж окружності в середині повітряного проміжку при всіх врахованих магнітах системи дає уявлення про характер викривлення магнітного поля при повороті ротора під впливом обмотки. На рис. 8 наведені: крива 1 - при знаходженні ротора в положенні стійкої рівноваги; крива 2 - при розвороті ротора на 180 градусів. Проміжні криві розподілу індукції в повітряному проміжку на рис. 8 відповідають положенням ротора, що розвертається послідовно на 20 градусів від кожного попереднього положення.

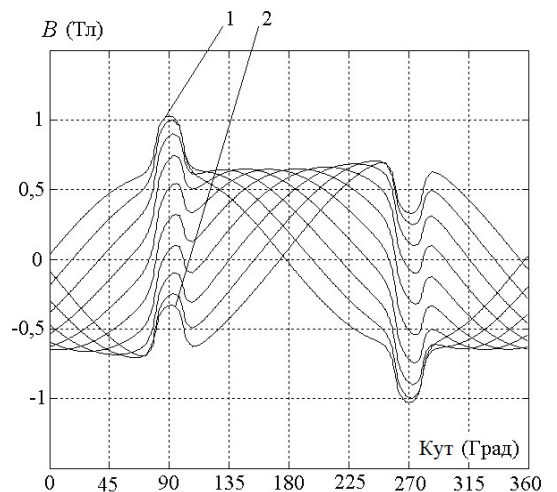


Рис. 8

Для врахування нелінійності характеристики намагнічування магнітопроводу проведено розрахунок залежності потокозчеплення обмотки при різних кутах відхи-

лення ротора в робочому діапазоні за умов різних значень густини струму, що протікає в обмотці (рис. 9) та залежності потокозчеплення від кута повороту ротора (рис. 10). Вигляд цих залежностей дає змогу знехтувати насиченням через майже лінійний характер залежності потокозчеплення у робочих діапазонах густини струму та майже гармонічний характер в залежності від кута повороту.

На рис. 11 наведені залежності амплітуди вимушених коливань ротора від частоти напруги живлення обмотки при сталості його амплітуди: крива 1 – при величині моменту інерції роторної частини  $1,2J_Y$ , крива 2 – при номінальному значенні  $J_Y$ , крива 3 – при величині моменту інерції  $0,8J_Y$ . Різке зростання амплітуди в області 25...30 Гц відповідає області власного резонансу системи. Для номінального значення моменту інерції проведені результати вимірів амплітуди коливань ротора, позначені на рис. 11 точками для частот 15, 20, 25, 28, 30, 35, 40 Гц. Розмір точок на графіку відповідає точності експерименту, який під час серій вимірів на одній частоті давав розбіг даних в межах  $\pm 1,5^\circ$ . Цей результат моделювання досить добре збігається з резонансними характеристиками реального зразка двигуна з наведеними вище параметрами, що підтверджує адекватність отриманої моделі двигуна (3).

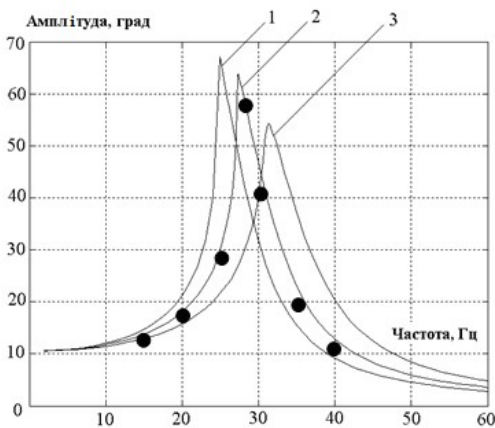


Рис. 11

ворюють ефект «магнітної пружини». Обмотки збудження першого ротора (ОП1) і другого ротора (ОП2) зв'язані з рухомими системами координат  $X_1Y_1Z_1$  і  $X_2Y_2Z_2$ , які розгорнуті в деякий момент часу відносно нерухомої системи координат навколо осей  $OY_1$  і  $OY_2$  у протилежні сторони на кути  $\gamma_1$  і  $\gamma_2$ .

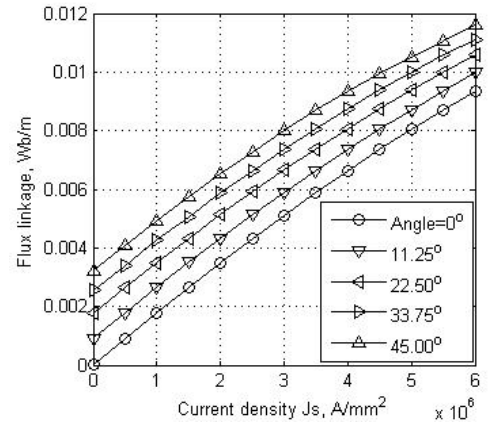


Рис. 9

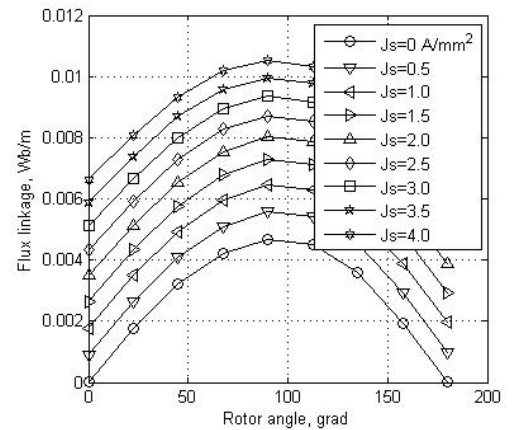


Рис. 10

Використовуючи той самий підхід, що і до створення моделі однороторного двигуна, побудовано математичну модель для двороторної структури (рис. 1 б). Для цього розміщено в нерухомій прямокутній системі координат  $X_0Y_0Z_0$  (рис. 12) статорну обмотку БМД (ОС), і обмотки, що забезпечують пружну взаємодію з першим (ОП1) і другим (ОП2) роторами, тобто створюють

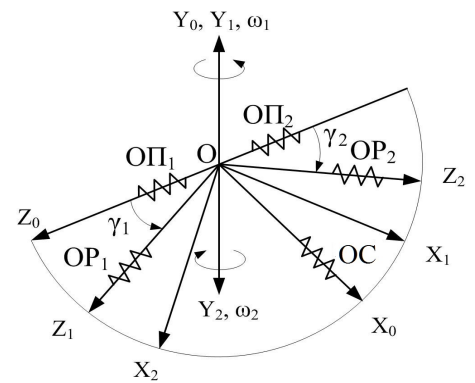


Рис. 12

У результаті рівняння динамічного стану системи одержано у вигляді

$$\begin{aligned} J_{Y1} \cdot \ddot{\gamma}_1 - \Psi_{X1} \cdot i_X \cdot \cos \gamma_1 + \Psi_{P1} \cdot i_{P2} \cdot \sin(\gamma_1 + \gamma_2) + \Psi_{Z1} \cdot i_{Z1} \cdot \sin \gamma_1 + \dot{\gamma}_1 \cdot v_{Y1} &= m_{Y1}; \\ J_{Y2} \cdot \ddot{\gamma}_2 + \Psi_{X2} \cdot i_X \cdot \cos \gamma_2 - \Psi_{P2} \cdot i_{P1} \cdot \sin(\gamma_1 + \gamma_2) - \Psi_{Z2} \cdot i_{Z2} \cdot \sin \gamma_2 + \dot{\gamma}_2 \cdot v_{Y2} &= -m_{Y2}; \\ L_{X1} \cdot \frac{di_X}{dt} + \Psi_{X1} \cdot \dot{\gamma}_1 - \Psi_{X2} \cdot \dot{\gamma}_2 + i_X \cdot R_X &= U_X; \\ L_{Z1} \cdot \frac{di_{Z1}}{dt} - \Psi_{Z1} \cdot \dot{\gamma}_1 \cdot \sin \gamma_1 + i_{Z1} \cdot R_{Z1} &= U_{Z1}; \quad L_{Z2} \cdot \frac{di_{Z2}}{dt} - \Psi_{Z2} \cdot \dot{\gamma}_2 \cdot \sin \gamma_2 + i_{Z2} \cdot R_{Z2} = U_{Z2}, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $m_{Y1}$ ,  $m_{Y2}$  – моменти навантаження, .

Умовою компенсації реактивного моменту привода, що діє на статор і руку оператора під час його роботи, є рівність нулю суми моментів, що діють на перший і другий ротори з боку статора

$$-\Psi_{X1} \cdot i_X \cdot \cos \gamma_1 + \Psi_{Z1} \cdot i_{Z1} \cdot \sin \gamma_1 + \Psi_{X2} \cdot i_X \cdot \cos \gamma_2 - \Psi_{Z2} \cdot i_{Z2} \cdot \sin \gamma_2 = 0.$$

Дотримання цієї умови, в режимах роботи приладу, коли навантаження обох роторів різні, може бути здійснене лише за допомогою введення у структуру двигуна додаткової обмотки статора з керованим струмом (рис. 1в).

У **четвертому розділі** досліджено електромеханічні та частотні характеристики однороторного БМД зворотно-обертального руху, представивши модель (3) у вигляді  $J \frac{d\omega}{dt} = \Psi_X \cdot i \cos \alpha - M_\omega - M_\alpha - M_P - M_H$ ;  $L \frac{di}{dt} = -Ri - \Psi_X \cdot \omega \cos \alpha + u$ ;  $\frac{d\alpha}{dt} = \omega$ , (5)

де  $\omega$ ,  $\alpha$  – кутова швидкість і кут повороту ротора;  $L$ ,  $R$  – індуктивність та активний опір обмотки статора;  $i$ ,  $u$  – струм і керуюча напруга статора;  $\Psi_X$  – потокозчеплення обмотки статора;  $J$  – момент інерції ротора;  $M_\omega = k_\omega \omega$ ,  $M_\alpha = k_\alpha \sin \alpha$ ,  $M_P$ ,  $M_H$  – моменти в'язкого тертя та пружності, реактивний момент підшипників і момент навантаження відповідно;  $k_\omega$ ,  $k_\alpha$  – коефіцієнти в'язкості та пружності.

Основними параметрами, які описують режими роботи БМД зворотно-обертального руху, є такі:  $f_0$  – основна частота механічних коливань ротора;  $\alpha_A$  – величина амплітуди кута коливань ротора;  $I$  – діюче значення змінного струму статора;  $\omega_A$  – величина амплітуди кутової швидкості ротора.

БМД зворотно-обертального руху може функціонувати в діапазоні механічних коливань ротора до 100 Гц в одному із двох режимів роботи: - у діапазоні низьких частот (до 20-30 Гц), у режимі обмеження амплітуди кута коливань ротора на заданому рівні  $\alpha_3$ ; - у діапазоні високих частот (більше 20-30 Гц), у режимі обмеження діючого значення струму статора на максимальному рівні  $I_{\max}$ , обумовленому припустимим тепловим станом двигуна.

Для оцінки ефективності роботи БМД зворотно-обертального руху введено спеціальний показник, що визначається як відношення параметрів  $k_1 = \alpha_A / I^2$ . Використання такого показника дозволяє вибрати траєкторію зворотно-обертального руху при заданій амплітуді коливань і мінімальних втратах у статорній обмотці, що дозволяє мінімізувати нагрівання двигуна. Другим параметром ефективності є значення амплітуди кутової швидкості  $\omega_A$  валу ротора, при забезпеченні максимуму якої реалізується посилений режим коливань.

Для розглянутого однороторного БМД зворотно-обертального руху проведено розрахунки залежностей основних параметрів режиму роботи  $\alpha_A$ ,  $I$ ,  $k_1$  та  $\omega_A$  від

частоти  $f_o$  в діапазоні до 100 Гц (рис. 13) при різних варіантах формування статорної напруги

$$u = U_A \sin 2\pi f_o t \quad (6)$$

$$u = 0,5 U_A (\text{sign}(\sin 2\pi f_o t - 0,5 \varphi_1) + \text{sign}(\sin(2\pi f_o t + 0,5 \varphi_1))), \quad (7)$$

де  $U_A$  – амплітуда напруги статора;  $\varphi_1$  – кутова довжина нульової ділянки напруги прямокутної форми;  $t$  – час.

Розрахунки електромеханічних характеристик (рис. 13) виконано за умови заданих обмежень амплітуди кута  $\alpha_3 = \pi/9 \text{ рад}$ . в низькочастотній частині діапазону та діючого значення струму  $I_{\max} = 0,14 \text{ А}$  у високочастотній частині діапазону при таких параметрах двигуна та механічного навантаження:  $R = 40 \text{ Ом}$ ,  $L = 0,012 \text{ Гн}$ ,  $\Psi_x = 0,125 \text{ Н м / А}$ ,  $k_\omega = 6,5 \cdot 10^{-5} \text{ Н м с / рад.}$ ,  $k_\alpha = 0,0448 \text{ Н м / рад.}$ ,  $J = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ кг м}^2$ ,  $k_H = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ Н м с / рад.}$ ,  $M_H = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Н м}$ . На рис. 13 (і далі) цифрою 1 позначено варіант формування синусоїдальної напруги (6). Цифрами 2, 3 і 4 відповідно позначено варіанти прямокутної напруги (7) при трьох значеннях параметра  $\varphi_1$  – 0, 80 і 160 ел. град.

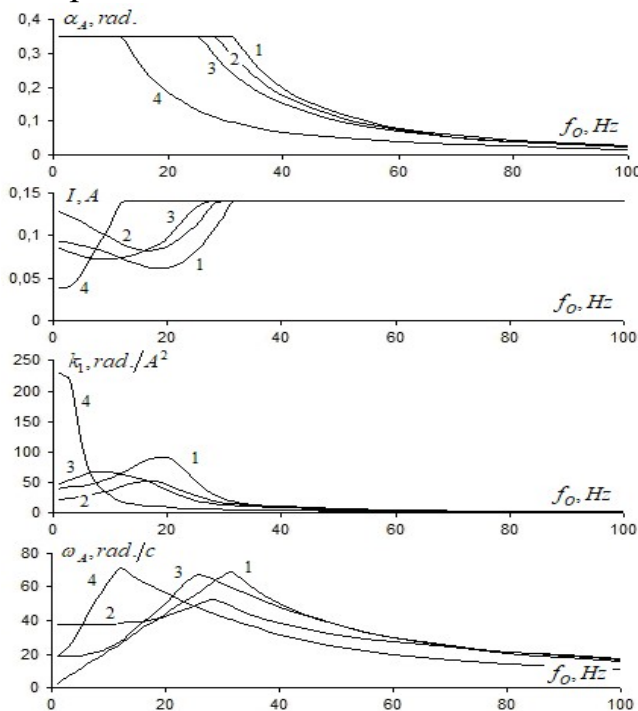


Рис. 13

струму  $I$  за сигналами відповідних зворотних зв'язків.

Розглянутий БМД зворотно-обертального руху є нелінійною електромеханічною системою, у якій вхідним впливом є змінна напруга статора (6, 7), а вихідними параметрами – амплітуда механічних коливань ротора та діюче значення струму статора, які визначаються на кожному напівперіоді змінної напруги статора. Для чотирьох варіантів напруги статора БМД отримано частотні залежності (рис. 14) амплітуди кута коливань валу ротора  $A_\alpha(\omega)$  та діючого значення струму статора  $A_I(\omega)$ , які розраховано у розімкненій структурі як  $A_\alpha(\omega) = \alpha_A / U_A$  та  $A_I(\omega) = I / U_A$ . Параметр  $\beta$  визначає кутову довжину інтервалу від моменту зміни полярності сиг-

Аналіз отриманих електромеханічних характеристик показав, що у випадках формування різних варіантів змінної напруги статора у заданому частотному діапазоні роботи БМД зворотно-обертального руху максимальні значення прийнятих показників ефективності  $k_1$  та  $\omega_A$  досягаються на різних піддіапазонах. Формування траєкторій зворотно-обертального руху ротора БМД здійснюється: 1) у розімкненій структурі шляхом формування функціональних частотних залежностей величини амплітуди  $U_A$  та параметра форми  $\varphi_1$  керуючої змінної напруги статора; 2) у замкненій структурі стабілізації амплітуди кута  $\alpha_A$  коливань ротора та обмеження діючого значення

налу  $\sin 2\pi f_0 t$  до моменту фіксації модуля амплітудного значення кута коливань ротора.

Виконано дослідження властивостей БМД шляхом подання статорної напруги (6, 7), амплітуда якої змінюється як  $U_A(t) = 1 + 0,5 \sin(2\pi f_0 t / n)$ , де  $n$  – число, величина якого показує, наскільки частота заданого сигналу  $U_A(t)$  менше основної частоти, при цьому  $n > 2$ . У разі фіксації амплітуди кута коливань у моменти зміни полярності сигналу  $\sin 2\pi f_0 t$  та її зберігання як сигналу зворотного зв'язку протягом наступних напівперіодів, фазовий зсув квантованого сигналу  $\alpha_A(t)$  відносно огинаючої  $U_A(t)$  приблизно визначається як  $\varphi_\alpha = \pi / n$ . (8)

При цьому спостерігається ефект запізнювання. В низькочастотному діапазоні роботи БМД, коли величина параметра  $\beta$  (рис. 14) не перевищує 180 град., формування сигналу зворотного зв'язку можливе шляхом фіксації його значення в моменти досягнення максимальних значень. В такому випадку фазовий зсув квантованого сигналу  $\alpha_A(t)$  відносно вхідної огинаючої  $U_A(t)$  приблизно визначається за формулою  $\varphi_\alpha = \beta / n$ . (9)

У п'ятому розділі досліджено принципи формування траєкторій зворотно-обертального руху ротора БМД та процес активної компенсації реактивного знакомінного моменту на корпусі двороторного двигуна.

Керування зворотно-обертальним рухом у розімкненій системі реалізовано шляхом формування функціональних залежностей параметрів керуючої напруги. При такому підході, керування рухом здійснюється за умови забезпечення максимуму одного з критеріїв ефективності  $k_1$  або  $\omega_A$ . Формування функціональних залежностей передбачає складання функцій амплітуди  $U_A$  напруги статора (6,7) та параметра її форми  $\varphi_1$  від частоти коливань ротора на всьому частотному діапазоні, що здійснюється на підставі розрахунку електромеханічних характеристик.

Замкнена система керування дозволяє реалізувати режим автоматичної стабілізації вихідних параметрів БМД за сигналами зворотних зв'язків. Структура замкненої системи керування має два контури (рис. 15): контур стабілізації амплітуди коливань ротора з регулятором амплітуди  $P$  та нелінійністю типу насичення та контур обмеження діючого значення струму з нелінійною ланкою виду  $x_2 = 0$  якщо  $I < I_0$  або  $x_2 = I - I_0$  якщо  $I > I_0$  та фільтром низької частоти для придушення можливих коливань, де  $I_0$  – задана величина, при якій починає обмежуватися струм.

Оскільки розглянутий БМД працює в діапазоні значень частоти коливань  $f_0$  до 100 Гц, настроювання параметрів регуляторів вихідних координат двигуна по-

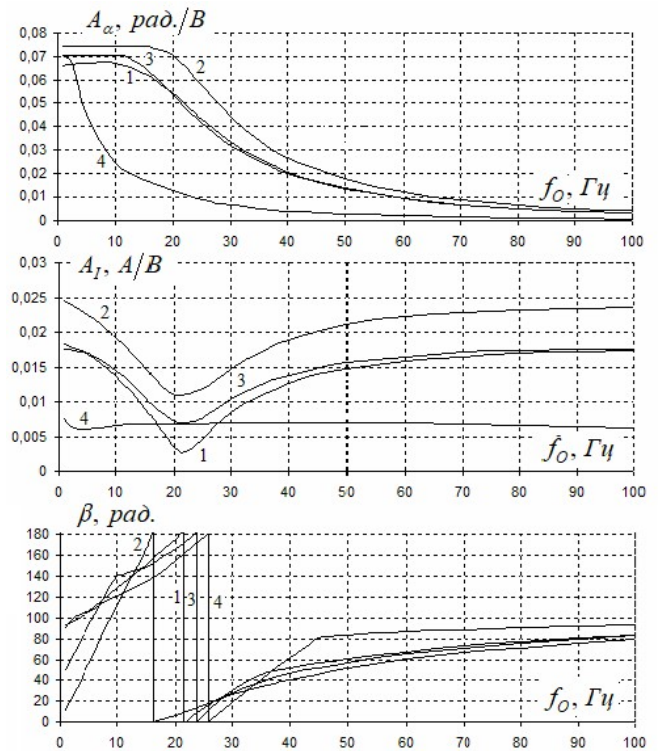


Рис. 14

винне здійснюватися з урахуванням значення частоти, що змінюється. Вибір параметрів регулятора амплітуди кута коливань здійснюється шляхом використання амплітудних і фазових частотних характеристик розімкненої системи, які можна представити у вигляді  $A(\omega) = A_p(\omega)A_\alpha(\omega)$ ;  $\varphi(\omega) = \varphi_p(\omega) + \varphi_\alpha(\omega)$ , де  $A_p(\omega)$ ,  $A_\alpha(\omega)$ ,  $\varphi_p(\omega)$ ,  $\varphi_\alpha(\omega)$  – амплітудні та фазові частотні характеристики регулятора та БМД зворотно-обертального руху.

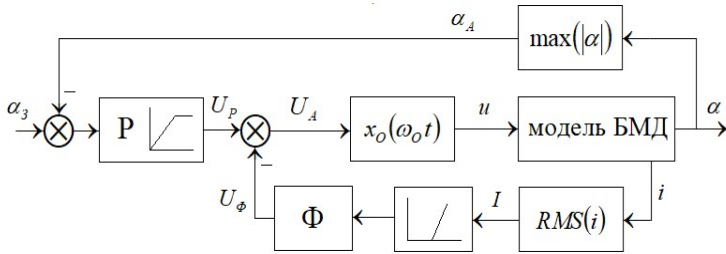


Рис. 15

на якій вибирається меншою за частоту  $\omega_o = 2\pi f_o$ . При заданих величинах  $\omega_o$ ,  $\omega_c$  і  $\gamma$  параметри регулятора амплітуди коливань визначаються за умови рівності одиниці амплітудної частотної характеристики розімкненої системи  $A(\omega_c) = A_\alpha(\omega_o)A_p(\omega_c) = 1$ , де  $A_\alpha(\omega_o)$ ,  $A_p(\omega_c)$  – значення амплітудних частотних характеристик БМД і регулятора при значеннях частоти коливань та частоти зрізу.

Оскільки до динамічних режимів БМД зворотно-обертального руху не висуваються особливі вимоги, для реалізації режиму стабілізації амплітуди кута коливань ротора може бути використаний інтегральний регулятор (І-регулятор), який має амплітудну та фазову частотні характеристики виду  $A_p(\omega) = k_p / \omega$ ;  $\varphi_p(\omega) = -\pi / 2$ , де  $k_p$  – коефіцієнт передачі І-регулятора амплітуди кута повороту. При заданих величинах  $\omega_o$ ,  $\omega_c$  і  $\gamma$  коефіцієнт передачі І-регулятора  $k_p$  з урахуванням (8) визначається за формулою  $k_p = \omega_c / A_\alpha(\omega_o)$ , а в разі врахування формули (9) коефіцієнт розраховується за виразом  $k_p = \omega_o (0,5\pi - \gamma) / \beta A_\alpha(\omega_o)$ , що дозволяє покращити динаміку. Розрахунок динаміки проведено (рис. 16) при таких значеннях параметрів БМД, що наведено вище, а також при  $k_H = 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ Н м с / рад.}$ ,  $\alpha_o = \pi / 9 \text{ рад.}$ ,  $U_{\max} = 15 \text{ В}$ ,  $I_o = 0,14 \text{ А}$ . На рис. 16 літерами а та б показані розрахунки на частотах 10 та 40 Гц.

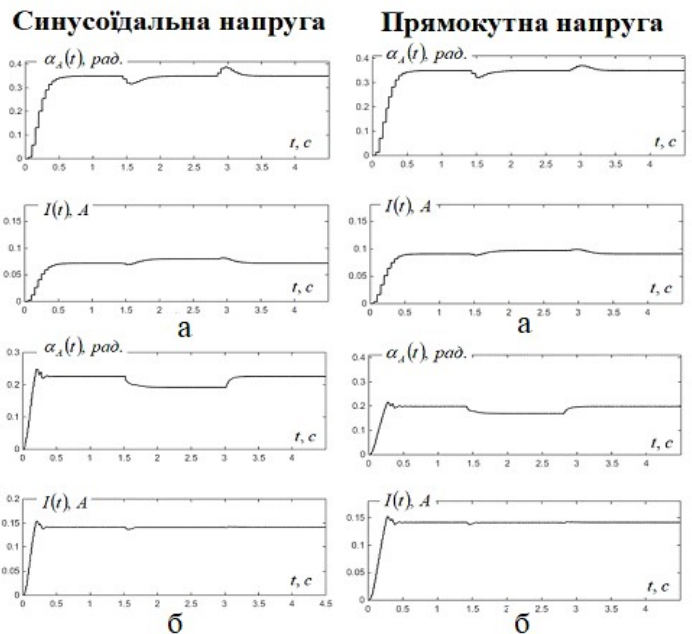


Рис. 16

Проведено дослідження режиму активної компенсації знакозмінного реактивного моменту, що створюється виконавчим двигуном зворотно-обертального руху,

за допомогою керованого додаткового компенсуючого ротора відповідно структурі електричної машини рис. 1 в. Кінцевою метою побудови електромеханічного пристрою зворотно-обертального руху з активною компенсацією реактивних моментів є мінімізація негативного впливу механічних вібрацій на корпус електромеханічного приладу. Ефект компенсації досягається шляхом створення знакозмінного моменту компенсуючого ротора протилежного знаку. Модель механічної частини двороторного двигуна має вигляд

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_{д1}; \quad \frac{d\alpha_1}{dt} = \omega_1; \quad J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_{д2}; \quad \frac{d\alpha_2}{dt} = \omega_2; \quad J_3 \frac{d\omega_3}{dt} = M_{д2} - M_{д1} - M_{B3} - M_{V3}; \quad \frac{d\alpha_3}{dt} = \omega_3, \quad (10)$$

де  $J_1, J_2, J_3; \omega_1, \omega_2, \omega_3; \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – осьові моменти інерції, кутові швидкості та кути повороту валів основного та компенсуючого роторів, а також корпусу навколо осі обертання зазначених роторів;  $M_{д1}, M_{д2}$  – динамічні моменти на валах основного та компенсуючого роторів, які мають знакозмінний характер;  $M_{B3}, M_{V3}$  – момент в'язкого тертя та момент пружності, що обумовлені впливом на корпус приладу руки людини, яка накладає на корпус приладу зв'язок у вигляді моменту пружності та в'язкого тертя, обумовлених властивостями м'язів і шкіри руки. З розгляду (10) видно, що умовою компенсації реактивного моменту основного ротора є рівність динамічних моментів двох роторів  $M_{д2} - M_{д1} = 0$ . При побудові двороторної структури на основі БМД враховано такі умови та особливості: 1) для стабілізації амплітуди коливань основного ротора  $\alpha_{1A}$  на заданому рівні необхідна побудова замкненої системи керування. Ефект стабілізації амплітуди кута досягається шляхом керування амплітудою  $I_{1A}$  струму статора  $i_1$  основної системи; 2) оскільки безпосередній вимір кута повороту корпусу  $\alpha_3$  є утруднений, то в як вихідний параметр для визначення сигналів зворотного зв'язку замкненої системи керування приймається різниця змінних періодичних коливань двох роторів  $\Delta\alpha = \alpha_1 - (J_2 / J_1)\alpha_2$ ; 3) завданням системи компенсації є виконання умов  $\alpha_{1A} = A_1$  та  $\Delta\alpha = 0$ , де  $A_1$  – задане значення амплітуди кута коливань основного ротора; 4) для досягнення компенсації реакції корпусу необхідна побудова системи векторного керування рухом компенсуючого ротора, тобто, необхідна реалізація системи керування амплітудою  $I_{2A}$  та фазовим зсувом  $\varphi_2$  вхідного струму статора  $i_2$  компенсуючої системи відносно струму основного статора  $i_1$ . Для цього необхідне формування сигналів узгодженості на входах регуляторів амплітуди струму та фазового зсуву на підставі вимірів кутових змінних основного та компенсуючих роторів  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$ ; 5) сигнал узгодженості на вході регулятора амплітуди струму компенсуючої обмотки повинен приймати позитивне або негативне значення залежно від величини фазового зсуву змінного сигналу  $\Delta\alpha - 0$  або  $\pi$  радіан; 6) на кожному напівперіоді коливань роторів необхідно визначати фазовий зсув змінної  $\alpha_2$  відносно змінної  $\alpha_1$ .

На підставі викладеного сформована загальна структура системи активної компенсації реактивного моменту основного виконавчого ротора, що представлена на рис. 17, де РС1, РС2, РФЗ – регулятори амплітуд коливань першого та другого роторів, а також регулятор фазового зсуву  $\varphi_2$  струму компенсуючої системи; БРН – блок розрахунку узгодженості фазового зсуву  $\Delta\varphi_2$  сигналу  $\alpha_1$  відносно  $\alpha_2$ ; ФОС – формувач опорного сигналу; Д1, Д2, К – позначення для моделей першого та другого

двигунів, а також корпусу приладу. На рис. 18 наведено графіки перехідних процесів координат БМД при моделюванні зміни механічного навантаження основного ротора у вигляді в'язкого тертя та при значенні частоти статорних струмів 10 Гц, які ілюструють процес майже повного усунення коливань корпусу двигуна.

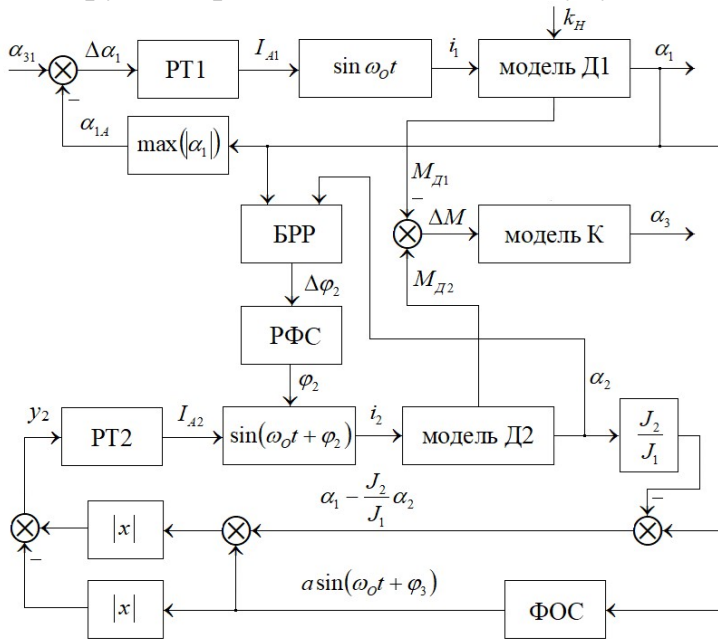


Рис. 17

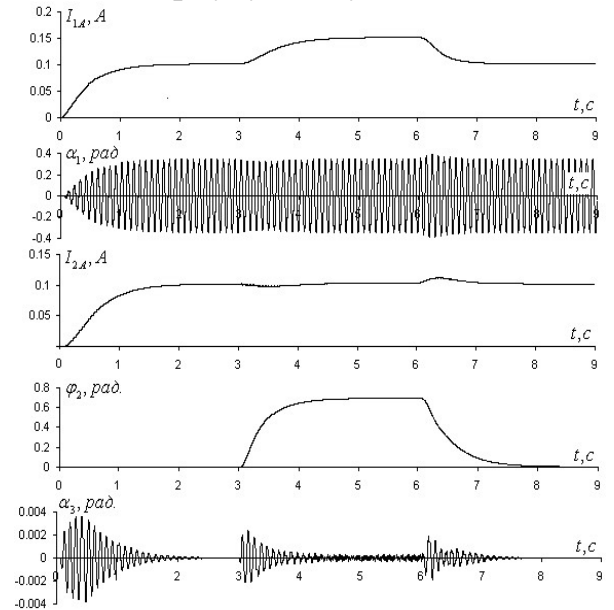


Рис. 18

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливе наукове завдання щодо обґрунтування структур, розроблення математичних моделей спеціалізованих безконтактних магнітоелектричних двигунів, принципів керування їх координатами і активної компенсації знакозмінних реактивних моментів виконавчого ротора, що забезпечує створення ефективних ручних електроприладів зі зворотно-обертальним рухом виконавчого елемента.

1. На основі проведеного аналізу існуючого стану проблеми обґрунтовано доцільність побудови пристроїв зворотно-обертального руху на основі спеціалізованих БМД з пружним магнітним зв'язком між статором і ротором.

2. Визначено оптимальні геометричні співвідношення між елементами магнітної системи БМД у відносних одиницях, що дає змогу реалізувати виконавчий двигун із забезпеченням максимального моменту на одиницю витраченої енергії.

3. Розроблено нову математичну модель БМД зворотно-обертального руху однороторної конструкції, яка враховує пружний магнітний зв'язок між статором і ротором при обмеженому діапазоні кута коливань ротора та дозволяє розрахувати електромеханічні частотні характеристики двигуна.

4. Розроблено принципи побудови і структури двороторних БМД зворотно-обертального руху та їх математичні моделі, що дозволило створити прилади з активною компенсацією реактивних знакозмінних моментів, які виникають при зворотно-обертальному русі основного виконавчого ротора електромеханічного перетворювача.

5. Визначено умову та розроблено принцип активної компенсації знакозмінних реактивних моментів основного ротора БМД шляхом створення протифазного динамічного моменту за допомогою компенсуючого ротора, для керування яким розроблено спосіб векторного керування, який реалізовано зміною амплітуди і фазового зсуву змінного струму обмотки допоміжного статора, що дозволяє мінімізувати негативний вплив механічних вібрацій на корпус електромеханічного приладу.

6. Для оцінки якості режимів роботи БМД зворотно-обертального руху запропоновано показники ефективності, якими є відношення амплітуди кута коливань до квадрата діючого значення струму та величина амплітуди кутової швидкості коливань ротора, при цьому використання першого показника дозволяє керувати двигуном із забезпеченням мінімального значення втрат у статорній обмотці, другого – забезпечити форсований режим роботи.

7. Для різних варіантів формування керуючої напруги статора досліджено електромеханічні характеристики БМД зворотно-обертального руху у вигляді частотних залежностей амплітуди кута коливань ротора, діючого струму статора, амплітуди змінної напруги статора та запропонованих показників ефективності режиму роботи, що дозволило визначити принципи керування режимами роботи двигуна.

8. Розроблено метод формування частотних функціональних залежностей амплітуди і параметрів форми змінної напруги статора для керування БМД зворотно-обертального руху в розімкненій системі при забезпеченні максимуму одного з параметрів ефективності, що дозволило мінімізувати апаратну частину структури.

9. Розвинуто принципи керування електромеханічними системами зворотно-обертального руху на основі амплітудних і фазових частотних характеристик розімкненої системи, яка складається з БМД і регулятора, шляхом завдання запасу стійкості за фазою і точності обмеження струму статора, при цьому немає необхідності у визначенні передаточних функцій елементів структури та стає можливим одержання аналітичних співвідношень для розрахунків параметрів регулятора амплітуди кута коливань ротора і контура обмеження струму статора залежно від значення частоти коливань ротора.

10. Результати роботи у вигляді структури БМД з компенсацією реактивних моментів на корпусі приладу та принципу регулювання величини компенсуючого моменту впроваджено в продукції медичного та косметологічного призначення Науково-виробничої фірми «Елерон».

11. Результати досліджень пропонується використовувати для виробництва ручного спеціалізованого інструменту, в якому необхідно застосувати зворотно-обертальний рух виконавчого елемента.

## ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Антонов А.Е., Филоменко А.А. Оптимизация геометрии беспазовых двигателей магнитоэлектрического типа с цилиндрическим ротором. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2010. Вип. 25. С. 54-58.

2. Антонов А.Е., Петухов И.С., Филоменко А.А. Магнитоэлектрический двигатель возвратно-вращательного движения с упругой связью ротора. *Технічна електродинаміка*. 2013. №1. С. 49–55.

3. Антонов А.Е., Филоменко А.А. Порошковые магнитопроводы для магнитоэлектрических машин. *Технічна електродинаміка*. 2014. №2. С. 44-46.
4. Филоменко А.А. Двухроторная магнитоэлектрическая система возвратно-вращательного движения и её математическая модель. *Технічна електродинаміка*. 2014. №4. С. 114-116.
5. Антонов А.Е., Филоменко А.А. Активная компенсация реактивных моментов в электрических машинах магнитоэлектрического типа. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2014. Вип. 39. С. 20-24.
6. Антонов А.Е., Акинин К.П., Киреев В.Г., Филоменко А.А. Компенсация реактивных моментов в электроприводе возвратно-вращательного движения. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2018. Вип. 51. С. 54-60.
7. Акинин К.П., Киреев В.Г., Филоменко А.А., Лавриненко В.А., Михайлик Е.М. Исследование электромеханических характеристик бесконтактных магнитоэлектрических двигателей возвратно-вращательного движения. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2019. Вип. 54. С. 47–51.
8. Akinin K.P., Antonov A.E., Kireyev V.G., Filomenko A.A. Return-rotary motion control system of rotor of brushless magnetoelectric motor. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2020. № 55. С. 67–71.
9. Akinin K.P., Kireyev V.G., Petukhov I.S., Filomenko A.A., Mihailik E.M. Frequency characteristics of brushless magnetoelectric motors of return-rotary motion. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2020. № 57. С. 73–80.
10. Антонов О.Є., Киреев В.Г., Филоменко А.А. Массажный пристрій: пат. 108726 Україна: МПК А61Н 23/00. № а201409696; заявл. 04.09.2014; опубл. 25.05.2015, Бюл. № 10.
11. Антонов О.Є., Киреев В.Г., Филоменко А.А. Массажный пристрій: пат. 108725 Україна: МПК А61Н 23/00. № а201409695; заявл. 04.09.2014; опубл. 25.05.2015, Бюл. № 10.
12. Филоменко А.А. Магнитоэлектрический двигатель возвратно-вращательного движения. *Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах: зб. матеріалів XII Міжнародної наук.-техн. конф., 23–27 вересня 2013 р. — Севастополь, 2013. — С. 120-122.*
13. Филоменко А.А. Особенности двигателей возвратно-вращательного движения для привода ручного инструмента // [Электронный ресурс]: Статті та тези доповідей за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. *Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматизи.* – Київ: ФЕА КПП ім. Ігоря Сікорського, 2019. – С. 363-366. – Режим доступу: <http://jour.fea.kpi.ua/issue/view/11926> – Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматизи».
14. Petukhov I.S., Akinin K.P., Filomenko A.A.. Influence of the Magnetic Field of the Overhang Parts of the Micromotor Winding on the Rotor Position Sensor. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, p.1-4.

## АНОТАЦІЯ

**Філоменко А.А. Безконтактний магнітоелектричний двигун зворотно-обертального руху. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 «Електричні машини і апарати». – Інститут електродинаміки Національної академії наук України, Київ, 2021 р.

У дисертаційній роботі вирішено важливу наукову задачу розробки принципів побудови безконтактних магнітоелектричних двигунів (БМД) зворотно-обертального руху малої потужності та принципів активної компенсації реактивного знакозмінного моменту ротора БМД для мінімізації негативного впливу механічних вібрацій на корпус приладу.

Раціональне рішення для реалізації зворотно-обертального руху ротора в обмеженому діапазоні механічних коливань  $\pm 20$  градусів та частоти до 100 Гц за умови мінімізації маси, габаритних розмірів та енергоспоживання двигуна досягається шляхом створення спеціалізованого БМД з пружним зв'язком між статором і ротором. При реалізації коливального руху ротора, виконавчий елемент встановлюється безпосередньо на вал двигуна, що дозволяє змінювати амплітуду та частоту механічних коливань ротора шляхом зміни амплітуди та частоти струму статорних обмоток без застосування допоміжних механічних перетворювачів руху.

Проведено структурну та параметричну оптимізацію геометрії двигуна, в результаті якої було встановлено аналітичні співвідношення між геометричними параметрами елементів магнітної системи БМД зворотно-обертального руху при забезпеченні максимуму електромагнітного моменту на одиницю споживаної електроенергії.

Для дослідження режимів роботи двигуна розроблено математичну модель динамічного стану, побудовану з використанням інтегрального принципу Гамільтона. Модель дає можливість досліджувати електромеханічні характеристики двигуна на основній частоті змінного струму і отримати частотні залежності амплітуди кута коливань ротора та діючого значення струму статора.

Встановлено, що БМД може функціонувати або в режимі обмеження амплітуди кута коливань ротора у низькочастотній частині робочого діапазону, або в режимі обмеження струму в високочастотній частині цього діапазону. Для оцінки якості режимів роботи БМД запропоновано використовувати такий показник ефективності, як відношення амплітуди коливань до квадрату діючого значення струму статора, а також амплітуду кутової швидкості. Реалізація режимів роботи БМД здійснюється шляхом формування напруги статора синусоїдальної або прямокутної форм.

Розроблено структури та математичну модель двороторного БМД зворотно-обертального руху для компенсації реактивного моменту на корпус двигуна. Запропоновано принципи векторного керування допоміжним ротором шляхом зміни амплітуди та фазового зсуву змінного струму статора допоміжної обмотки відносно струму статора основної обмотки для реалізації режиму активної компенсації реактивного знакозмінного моменту основного ротора в заданому діапазоні частоти механічних коливань та механічного навантаження, що змінюється.

**Ключові слова:** магнітоелектричний безконтактний двигун, зворотно-обертальний рух, пружний зв'язок, компенсуючий ротор, електромеханічна характеристика, частотна характеристика.

## ABSTRACT

**Filomenko A.A. Brushless magnetoelectric motor of return-rotary motion.** – Manuscript.

Thesis for a candidate of sciences degree in the specialty 05.09.01 «Electric machines and apparatuses». – Institute of Electrical Dynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

In the dissertation the important scientific problem of development of elaboration principles of low power brushless magnetoelectric motors (BMM) of return-rotary motion and principles of active compensation of reactive alternating moment of a BMM rotor for minimization of negative influence of mechanical vibrations on the device body is solved.

A rational solution for the implementation of return-rotary motion of rotor in a limited range of mechanical oscillations  $\pm 20$  degrees and a frequency of up to 100 Hz while minimizing the mass, dimensions and power consumption of the motor is achieved by creating a specialized BMM with elastic connection between stator and rotor. Due to the oscillating motion of the rotor, the actuator is mounted directly on the motor shaft, which allows you to change the amplitude and frequency of mechanical oscillations of the rotor by changing the amplitude and frequency of the stator windings without the use of auxiliary mechanical transducers.

Structural and parametric optimization of motor geometry was carried out, as a result of the optimization procedure, analytical dependences were established between the geometric parameters of the elements of the magnetic system of the return-rotary motion of the BMM with the maximum value of the electromagnetic moment per unit of consumed electricity.

To study the modes of operation of the motor a mathematical model of the dynamic state was developed, which built using the integrated Hamilton principle. The model makes it possible to investigate the electromechanical characteristics of the motor at the operating frequency and to obtain frequency dependencies of the amplitude of the rotor oscillation angle and the stator current effective value.

It is established that the BMM can operate either in the mode of limiting the oscillation angle amplitude of the rotor in the low-frequency part of the operating range, or in the mode of limiting the current in the high-frequency part of this range. To assess the quality of the modes of operation of the BMM, it was proposed to use such an efficiency indexes as the ratio of the oscillations angle amplitude to the square of the stator current effective value, as well as the amplitude of the angular speed. Implementation of BMM operation modes is carried out by forming the stator voltage of sinusoidal or rectangular shapes.

A structure and a mathematical model of a two-rotor motor of return-rotary motion have been developed to compensate for the reactive alternating torque on the device body. The principles of active compensation of the reactive alternating moment of the main rotor in a given range of frequency of mechanical oscillations and changing mechanical load are

proposed. In this case, the vector control of the auxiliary rotor is realized by changing the amplitude and phase shift of the alternating current of the stator auxiliary winding relative to the stator current of the main winding.

**Keywords:** brushless magnetoelectric motor, return-rotary motion, elastic connection, compensating rotor, electromechanical characteristic, frequency characteristic.