

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МАШИНИ З
ТРИСТУПЕНЕВИМ ГІРОСТАБІЛІЗОВАНИМ РОТОРОМ**

К.П. Акинін*, докт. техн. наук, **В.Г. Кіреєв****, канд. техн. наук, **І.С. Петухов*****, докт. техн. наук,
А.А. Філоменко****, канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.
E-mail: petuhov@ied.org.ua

Проведено ретроспективний огляд підходів до розробки теорії та практичних структур електричних машин з триступеневим ротором (ЕМТР) в Інституті електродинаміки НАН України. Перелічено застосування ЕМТР в системах спостереження, слідування та стабілізації на рухомих об'єктах. Показано актуальність розробки таких машин. Відзначено недоліки класичної математичної моделі ЕМТР і обґрунтовано необхідність розробки уточненої математичної моделі у зв'язку з потребою в створенні нової техніки, появою нових матеріалів і електронних компонентів, а також зростанням обчислювальних можливостей. Описано дві основні відомі структури ЕМТР і перелічені переваги найбільш перспективної структури, обраної як базової. Для базової структури ЕМТР обґрунтовано та побудовано в середовищі «COMSOL Multiphysics» математичну модель статичного тривимірного магнітного поля ЕМТР і пов'язану з нею динамічну модель руху ротора. Зв'язок магнітостатичної задачі та задачі динаміки руху ротора забезпечено тим, що дані розрахованих моментних характеристик передаються у вигляді апроксимованих залежностей у динамічну задачу. В режимі вільного обертання без втрат обчислено залежності кута прецесії від часу, амплітуди та фази синусоїдального струму обмотки управління. Продемонстровано високу точність додержання напрямку прецесії ротора за умови задання відповідної фази струму обмотки управління. Досліджено вплив обмоток обертання на момент, створюваний обмоткою управління. Бібл. 7, рис. 8, табл. 1.

Ключові слова: триступенева електрична машина, гіростабілізований ротор, прецесія, математична модель.

Вступ. В Інституті електродинаміки НАН України вже багато років проводяться дослідження та розробка електричних машин з ротором, який має декілька ступенів свободи обертання. Поява такого типу машин була обумовлена необхідністю кардинального покращення характеристик приладів, які призначено для просторової орієнтації рухомих об'єктів навколо декількох кутових координат для застосувань в приладобудуванні, авіаційній, космічній і військовій галузях, де вимоги до мініатюризації, швидкодії та енергоефективності є найбільш актуальними та визначальними.

В статті мова піде про найбільш узагальнені електричні машини обертового типу – триступеневі електричні машини з гіростабілізованим ротором. Зазвичай традиційна кінематична схема побудови гіроскопічного приладу має такий склад: гіродвигун з корисним навантаженням, на його корпусі встановлюється карданів підвіс, внутрішня та зовнішня рамка якого змінюють своє кутове положення за допомогою моментних двигунів з давачами кута нахилу на своїх осях. Досягнення високої швидкодії відпрацювання команд управління за двома координатами за такої компоновки обмежується тим, що моментний двигун зовнішньої рамки карданового підвісу окрім гіродвигуна з об'єктом управління додатково навантажується внутрішньою рамкою зі своїм приводом і давачем кутового положення [1]. Електрична машина з триступеневим ротором (ЕМТР) позбавлена цього недоліку, оскільки управління єдиним ротором здійснюється системою обмоток статора, що виконують як функції розгону ротора та стабілізації швидкості обертання, так і функції управління за двома кутовими координатами та функції давачів кутів нахилу осі обертання. Порівняльний аналіз однакових за габ-

© Акинін К.П., Кіреєв В.Г., Петухов І.С., Філоменко А.А., 2022
ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0002-7830-2311> ; ** <https://orcid.org/0000-0002-9407-1074> ;
*** <https://orcid.org/0000-0003-1416-1174> ; **** <https://orcid.org/0000-0003-4289-8579>

ритними розмірами приладів, побудованих за класичною компоновкою і з використанням ЕМТР, показав переваги останньої у 5...7 разів за електромагнітними зусиллями, що діють на ротор, до 20 разів за швидкістю, а також значно менше енергоспоживання та кращі масо-габаритні показники [1].

Наукові засади створення ЕМТР для техніки спеціального призначення були розроблені в Інституті електродинаміки НАН України у попередні роки [2]. Зокрема, були запропоновані основні структури пристроїв, схеми управління та математична модель триступеневої електричної машини. Поява нових магнітних матеріалів, електронних комплектуючих, удосконалення комп'ютерної техніки, а також необхідність модернізації або створення нових пристроїв на базі ЕМТР потребує подальшого уточнення математичної моделі, яка описує процеси електромеханічного перетворення енергії, що відбуваються у такій машині. Адже створена засновниками теорії багатовступневих електричних машин О.М. Міляхом і В.А. Барабановим [2], а також розвинута у роботах О.Є. Антонова [1, 3] математична модель ЕМТР базується на загальній теорії електричних машин і магнітних кіл, якій притаманно використання деяких припущень, а саме:

- відсутність врахування розподілу насичення у магнітопроводах;
- відсутність залежності власних індуктивностей від просторового положення ротора;
- використання для розрахунку характеристик ЕМТР середнього значення магнітної індукції у повітряному проміжку, хоча під час нахилу ротора ця величина є змінною.

В той же час математична модель на основі чисельного розрахунку тривимірного магнітного поля може скасувати всі згадані припущення та поєднати розв'язок магнітної задачі з задачею динаміки. Тому **метою даної роботи** є створення уточненої математичної моделі ЕМТР за допомогою програмного забезпечення «COMSOL Multiphysics», де результати моделювання тривимірного магнітного поля безпосередньо використовуються в динамічній задачі, що моделює тривимірний просторовий рух ротора.

В даний час ЕМТР різноманітних конструкцій використовуються під час побудови систем просторової орієнтації та стабілізації вхідних оптичних або радіолокаційних пристроїв, призначених для пошуку, наведення або стеження за рухомими об'єктами, де машина виконує функції двокоординатного гіростабілізованого приводу з можливістю вимірювання абсолютних і відносних кутових координат та швидкостей рухомих об'єктів. Виходячи з функціональних можливостей ЕМТР стає зрозумілою і область їхнього застосування – це головним чином системи спеціального призначення, які виконують задачі виявлення, розпізнавання та автоматичного супроводу об'єктів, що рухаються.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю розвитку теоретичного фундаменту для відтворення в Україні замкнутого циклу створення та виробництва сучасних приладів спеціальної техніки, в тому числі космічного базування.

Основні структури ЕМТР. Однією з перших структур (рис. 1), що було розроблено для двокоординатного гіростабілізованого приводу, є координатор головки самонаведення ракети «Sidewinder» – першої у світі серійної керованої ракети класу «повітря – повітря».

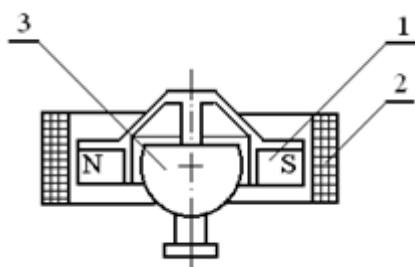


Рис. 1

Конструкційно вона складається з ротора 1 із встановленим на ньому двополюсним постійним магнітом, який намагнічено перпендикулярно до осі обертання ротора, статора з обмотками 2 і трьохосного підвісу 3. На статорі розташовано систему обмоток обертання, які призначені для розгону та підтримання кутової швидкості ротора, а також обмотка управління кутовим положенням ротора навколо двох перпендикулярних однієї до одної осей, які у свою чергу є ортогональними до осі обертання ротора. Останню обмотку ще називають обмоткою прецесії. За аналогією з традиційними електричними машинами для надання ротору обертового руху використовується система обмоток, яка створює електромагнітне поле, що обертається. Електромагнітне поле обмотки управління спрямовано уздовж осі обертання ротору та носить пульсуючий характер, що пульсує синхронно з частотою обертання ротора. Під час взаємодії пульсуючого поля обмотки з магнітним полем магніту ротора, що обертається, виникає змінний електромагнітний момент, постійна складова якого спонукає до нахилу ротора або прецесії, якщо використовувати термінологію гіроскопічних систем. Аналогічна структура з трьохсекційною статорною обмоткою досліджується у [4].

З точки зору теорії електричних машин така структура не є ефективною через те, що її магнітна система є розімкненою і в сумарному магнітному потоці має місце значна частка потоку розсіювання. Крім того, якщо у безпосередній близькості навколо магнітної системи є струмопровідні еле-

менти конструкції, то в них будуть наводитися вихрові струми від полів розсіювання, що призведе до некерованої прецесії ротору ЕМТР. Подібні структури, доповнені зовнішнім магнітопроводом, досліджувалися у роботах [5, 6, 7]. Такі структури позбавлені вад, пов'язаних з впливом потоків розсіювання, але застосування їх призводить до суттєвих ускладнень конструкції, що особливо характерно для структури, описаної у роботі [7], яка в наслідок таких ускладнень має значний робочий діапазон зміни кута прецесії, що складає 30° .

Враховуючи зазначені недоліки розглянутих структур, було розроблено структуру ЕМТР із замкнутою магнітною системою та зовнішнім ротором (рис. 2), завдяки чому підвищилася середня магнітна індукція в повітряному проміжку машини, а внутрішній 1 та зовнішній 2 магнітопроводи ротора забезпечили екранування потоків розсіювання [1]. Саме таку структуру було прийнято за базову і для неї було створено уточнену математичну модель.

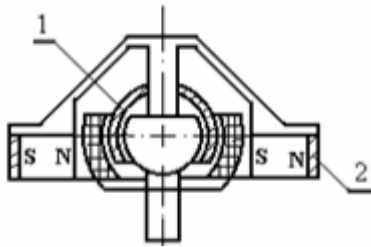


Рис. 2

Базова структура ЕМТР. Елементи розрахункової структури показано на рис. 3. До складу її включено зовнішній магнітопровід з постійними магнітами та внутрішній магнітопровід, які утворюють замкнену магнітну систему. Обидва магнітопроводи, які є механічно з'єднаними, обертаються синхронно, що дає змогу мінімізувати магнітні втрати. У повітряному проміжку знаходиться двофазна симетрична система обмоток W_a, W_b для створення оберտального моменту та обмотка управління W_y (окремо обмотки обертання зображено на рис. 8). Вісь статора z для наочності зображено нахиленою на кут β відносно до осі ротора Z . Конкретні розміри конструктивних елементів для розрахункового прикладу обиралися на основі досліджень, які викладено у монографії [1], а їхні значення є близькими до оптимальних за критеріями швидкодії, максимального моменту та ін. Значення розмірів базової структури у відношенні до полюсного поділу наведено у таблиці.

Параметр	Розмір
Повний повітряний проміжок між магнітопроводами	0,104
Товщина шару обмоток (статора)	0,081
Висота ярма внутрішнього магнітопроводу	0,035
Висота ярма зовнішнього магнітопроводу	0,045
Висота магніту	0,162
Кутовий розмір магніту	120°
Кутовий розмір обмотки управління	70°
Кутлова ширина секції обмотки обертання	15°
Відношення товщини шару обмоток $W_c/W_{a,b}$	8/3
Коефіцієнт заповнення обмоток міддю	0,34
Матеріал постійного магніту	КС37А

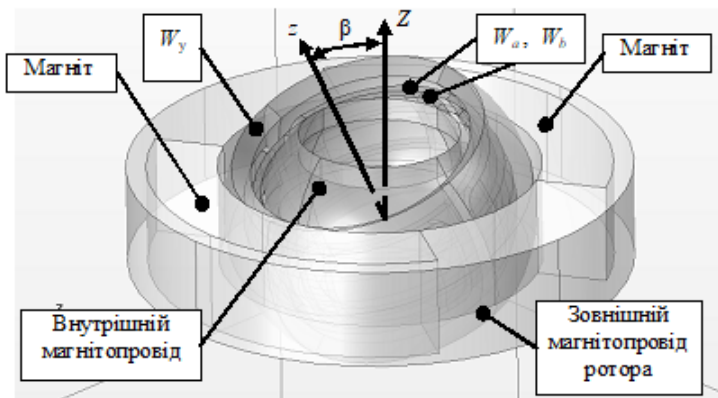


Рис. 3

Щоб визначити екстремальні характеристики базової структури по швидкості управління прецесією знехтуємо впливом обмоток обертання, механічними та аеродинамічними втратами, втратами магнітної природи, а саме:

- а) втратами на вихрові струми в магнітопроводах, оскільки вони обертаються синхронно з полем обертання;
- б) втратами на вихрові струми в обмотках (вважається, що діаметр провідників обмоток є достатньо тонким);
- в) магнітними втратами в елементах конструкції.

За умови таких припущень для обчислення моментів можна побудувати модель магнітостатичного поля в інтерфейсі «Magnetic Fields» пакету «COMSOL Multiphysics». Для розрахункового дослідження виділимо такі системи координат: фізичну (x, y, z) систему координат, яка пов'язана зі статором (рис. 3); похилу систему координат (X, Y, Z) , вісь Z якої співпадає з віссю обертання (рис. 4), а її початок розташовано в середньому перерізі ротора, і, нарешті, обертальну систему координат (D, Q, Z) , вісь Z якої співпадає з однойменною віссю нахиленої системи, а вісь D – з віссю поля ротора. Позначення осей D, Q є традиційним для електричних

машин, зокрема синхронних, до яких відносяться машини з обертальним полем і збудженням від постійних магнітів.

На рис. 4 на тлі ротора наведено довільний контур зі струмом I та позначено складові сили, що діють на елемент $I \cdot dl$ струму з боку магнітного поля ротора, індукцію якого позначено літерою \mathbf{B} , а її вектор спрямовано вздовж осі D . Цей струмовий контур може належати, наприклад, обмотці управління, яку розташовано під нахилом до площини ротора. Складові моменту, що діють на розглянутий елемент струму, виражені відповідно до системи координат D, Q, Z , вочевидь є

$$\begin{aligned} M_D &= -F_Q Z + F_Z Q, \\ M_Q &= F_D Z - F_Z D, \\ M_Z &= -F_D Q + F_Q D. \end{aligned} \quad (1)$$

Оскільки моделювання динамічної задачі виконується в фізичній системі координат, необхідно перейти до складових моментів, що прикладені до статора, точніше до обмоток статора. Тому треба отримати вирази для складових моментів в у фізичній системі координат (x, y, z) . Так в нахилений системі координат (X, Y) компоненти сил складатимуть

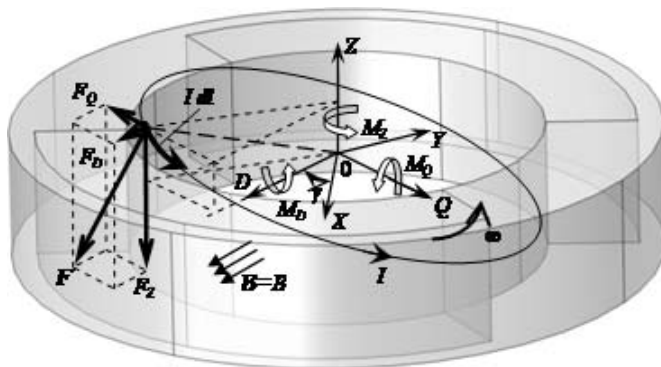


Рис. 4

$$F_X = F_D \cos \gamma + F_Q \sin \gamma, \quad (2)$$

$$F_Y = -F_D \sin \gamma + F_Q \cos \gamma,$$

де $\gamma = \omega t$ – кут обертання (рис. 4). В свою чергу те ж саме перетворення координат для складових X, Y дає

$$X = D \cos \gamma + Q \sin \gamma, \quad (3)$$

$$Y = -D \sin \gamma + Q \cos \gamma.$$

Аналогічно до формул (1) проекції моменту в похилій системі координат складатимуть

$$M_X = -F_Y Z + F_Z Y; \quad (4)$$

$$M_Y = F_X Z - F_Z X;$$

$$M_Z = -F_X Y + F_Y X.$$

Звідси з урахуванням (2) та (3) отримаємо

$$M_X = -(-F_D \sin \gamma + F_Q \cos \gamma)Z + F_Z(-D \sin \gamma + Q \cos \gamma);$$

$$M_Y = (F_D \cos \gamma + F_Q \sin \gamma)Z - F_Z(D \cos \gamma + Q \sin \gamma); \quad (5)$$

$$\begin{aligned} M_Z &= -(F_D \cos \gamma + F_Q \sin \gamma)(-D \sin \gamma + Q \cos \gamma) + \\ &+ (-F_D \sin \gamma + F_Q \cos \gamma)(D \cos \gamma + Q \sin \gamma). \end{aligned}$$

Отримані вирази, як вже відзначено, потрібні для розв'язання динамічної задачі, оскільки положення центру мас ротора та орієнтація його осі обчислюються у фізичній системі координат, перехід до якої від нахиленої системи може бути виконаний аналогічними перетвореннями. Безпосереднє обчислення електромагнітних моментів виконується чисельним інтегруванням складових моментів по всьому об'єму відповідної обмотки.

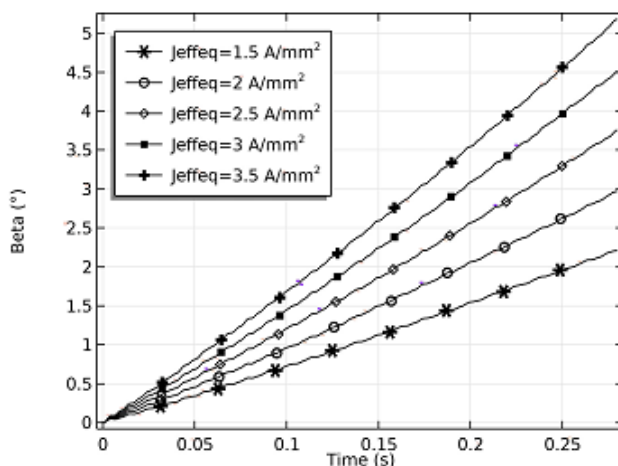


Рис. 5

Управління прецесією в режимі вільного обертання. Обчислені складові електромагнітного моменту є вхідними даними для розрахунку динаміки ротора. В середовищі COMSOL динамічна задача моделювалася в інтерфейсі «Multibody dynamics», де моменти інерції відносно усіх осей обчислюються автоматично за даними геометрії та характеристик матеріалів елементів конструкції. Моделювання динамічної задачі будемо також проводити для випадку коли: відсутні втрати на тертя в підшипниках; аеродинамічні втрати; втрати в елементах конструкції від полів розсіяння; вплив обмоток обертання на момент, створений обмоткою управління.

На рис. 5 наведено результати моделювання зміни кута нахилу осі ротора у разі його прецесійного руху в режимі вільного обертання, тобто без врахування впливу обмоток обертального руху. Графіки показують зростання у часі кутового відхилення осі обертання ротора в залежності від ефективної еквівалентної густини струму в обмотці управління. Під еквівалентною густиною струму мається на увазі густина, що не враховує коефіцієнт заповнення обмотки міддю. З урахуванням коефіцієнту заповнення обмоток міддю 0,34 діапазон густини струму (рис. 5) становить 4,5 – 10 А/мм². Графіки свідчать про лінійну в середньому залежність швидкості зміни кута β від струмового навантаження обмотки управління.

Просторовий напрямок прецесії осі ротора регулюється в ЕМТР часовим зсувом фази синусоїдального струму ψ_{wc} в обмотці управління по відношенню до просторової фази поля ротора. На рис. 6 наведено графіки годографів осі обертання ротора для шести значень фази синусоїдального струму обмотки управління ψ_{wc} . Графіки свідчать про зберігання напрямку прецесії осі обертання протягом розрахункового інтервалу часу. *Коливальний характер графіків прецесійного руху* відображає процес нутаційних коливань, що має місце під час проявлення гіроскопічного ефекту. Ці коливання є шкідливим явищем за умов використання даного пристрою в точній слідкуючій чи стабілізуючій системі. Розгляд та дослідження заходів по зменшенню впливу цього явища на процес управління гіростабілізованим ротором виходять за рамки даної роботи, оскільки заявлені

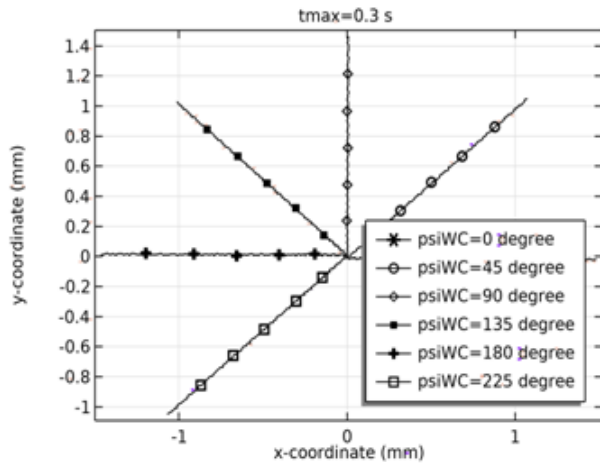


Рис. 6

вище припущення обмежують модель розглядом тільки показників прецесійного руху.

Вплив обмоток обертання. Наведені вище результати розраховано за умови вільного обертання ротора. В реальній машині присутні обмотки обертання (рис 3, рис. 8). Коли статор та ротор розташовані співвісно, моменти кожної з обмоток обертання відносно як осі X , так і осі Y відсутні внаслідок осової симетрії системи обмоток та магнітопроводу ротора.

Оскільки обмотки фаз та обмотка управління є попарно взаємно ортогональними, за умов значного насичення магнітопроводів, можна обчислювати їхні моменти, що діють на ротор, незалежно один від одного. На рис. 7 наведено графіки, що показують збурення відносного значення моменту обмотки управління (незбурений момент від дії обмотки управління прийнятий за одиницю) від дії синусоїдального струму в обмотці фази A .

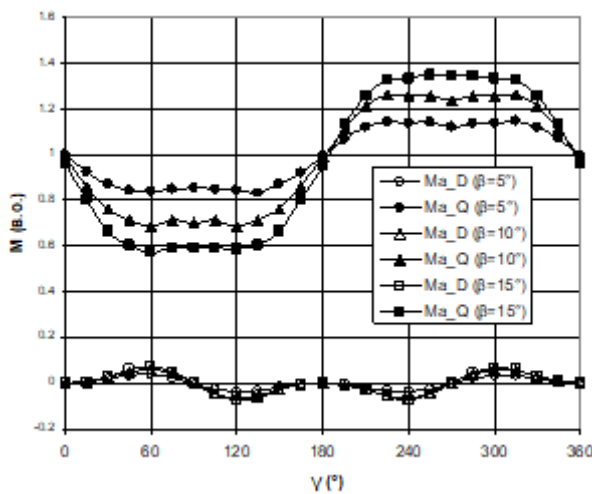


Рис. 7

Під час порівняння впливу фаз A та B обмотки на момент обмотки управління (рис. 7 та рис. 8 відповідно) звертає на себе увагу різний вигляд графіків. Хоча обидві фази мають однакову геомет-

Обрання початкових фаз струмів виконаємо за умови усталеного режиму живлення обмоток обертання від системи керування, яка забезпечує кут між МРС статора та віссю поля ротора таким, що дорівнює 90° з метою отримання максимального обертального моменту. Якщо в нульовий момент часу вісь поля ротора (вісь D , рис. 4) співпадає з віссю X , то за початкової фази $\psi_A = 0$ струму фази A струм фази B буде мати максимальне значення, тобто буде забезпечувати бажаний кут між магнітними полями статора та ротора. Зазначимо тільки, що треба забезпечити щоб МРС статора випереджала поле ротора.

На рис. 8 наведено залежності аналогічного впливу синусоїдального струму фази обмотки B на момент обмотки управління за умови, що початкова фаза струму фази B відстає на 90° і, таким чином, забезпечує потрібне значення просторової фази МРС статора.

Під час порівняння впливу фаз A та B обмотки на момент обмотки управління (рис. 7 та рис. 8 відповідно) звертає на себе увагу різний вигляд графіків. Хоча обидві фази мають однакову геомет-

рію і живляться однаковим синусоїдальним струмом. Задля пояснення цієї особливості на рис. 8 окрім графіків додано малюнок обмоток обертаня і траєкторії точки на площині симетрії ротора поперечній до осі (обмотку фази A укладено зверху обмотки фази B). З рисунку видно, що полюси ротора перетинають повздовжні площини симетрії фаз обмотки (осі фаз у термінології електричних машин) у різних взаємних положеннях, і тому, природно, створювані обмотками моменти відрізняються.

Постає питання, а чи можна досягти такого ж вигляду графіків моментів для фази B , як і для фази A (рис. 7)? Відповідь на це питання позитивна і ідентичність графіків досягається окрім зміни початкової фази струму ψ_B ще й уявним поворотом всієї обмотки (обох фаз) на ті ж самі 90° . Фізично це означає зміну початкової фази обертаня самого ротора γ_0 (рис. 4), і під час розрахунку такого випадку графіки рис. 7 та рис. 8 «поміняються місцями».

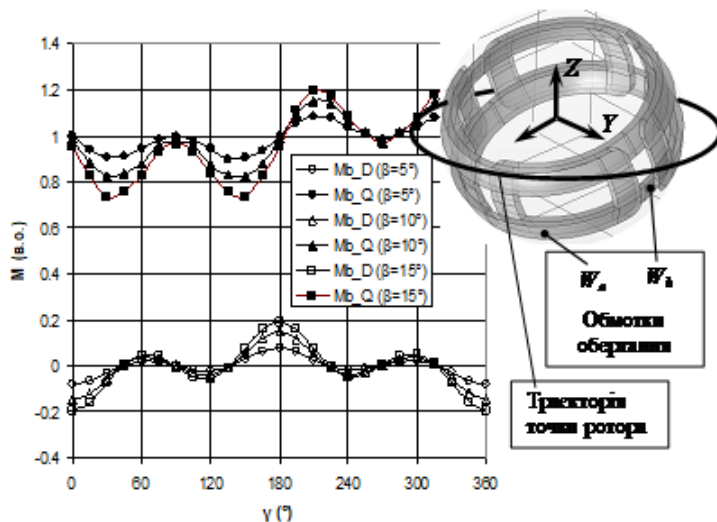


Рис. 8

сказати і про струм обмотки управління. Підсумовуючи викладене у статті, відзначимо, що в реальних застосуваннях задля визначення траєкторії ротора треба моделювати динамічну задачу сумісно з електричними колами джерела живлення.

Висновки. Моделювання прецесійного руху гіростабілізованого ротора базової ЕМТР може бути досліджено за допомогою уточненої математичної моделі, побудованої у середовищі «COMSOL Multiphysics» шляхом послідовного обчислення статичних моментних характеристик на основі розрахунку тривимірного магнітного поля в інтерфейсі «Magnetic field» та динамічного руху в інтерфейсі «Multibody dynamics». При цьому результати обчислення моментної характеристики передаються в інтерфейс динамічної задачі у вигляді апроксимованих залежностей складових моментів, що діють на ротор, від кута повороту ротора.

Впливом втрат на вихрові струми від основного поля збудження в замкненій системі магнітопроводів, безумовно, можна знехтувати, оскільки магнітопроводи обертаються синхронно. Для випадку живлення ідеальним синусоїдальним струмом тільки обмотки управління без врахування будь яких інших втрат електромагнітного та неелектромагнітного походження модель забезпечує дуже точний кутовий напрямок прецесійного руху ротора у режимі вільного обертаня.

Вплив обмоток обертаня на складові моменту обмотки управління виявляється появою пульсацій цього моменту по обох синхронних осях Q та D в межах, відповідно, ± 40 та ± 20 відсотків за умов величини кутового відхилення до 15° . Середнє значення моменту управління при цьому не змінюється. Напрямок синхронних осей визначається фазовим зсувом струму обмотки управління і початковою просторовою фазою кута обертаня ротора. Наведені числові значення відповідають нульовим фазам цього струму та кута обертаня ротора. Вказані величини пульсацій моменту «поміняються місцями», якщо змінити фазу струму обмотки управління та просторову фазу ротора на 90° .

Роботу виконано за держбюджетною темою «Розробити наукові засади та принципи побудови керованих n -степеневих магнітоелектричних систем з екстремальними характеристиками» (шифр – «Екстремум»), КПКВК 6541030.

Отримані результати свідчать, що поле обмоток обертаня значно впливає на момент, створюваний обмоткою управління. Так по осі Q максимальне збурення сягає $\pm 40\%$, а по осі D – біля $\pm 20\%$. Проте середнє значення моменту не змінюється по жодній з осей. Тому обмотки обертаня впливають лише на коливання моменту та кутів відхилення ротору протягом періоду обертаня, що відображається як на прецесійному русі ротора, так і на його нутаційних коливаннях.

Треба відмітити, що проведений аналіз впливу обмоток обертаня на момент обмотки управління має лише оціночний характер. В реальному пристрої струми можуть бути несинусоїдальними і, навіть, імпульсними, що залежить від системи джерела живлення. Теж саме можна

1. Антонов А. Е. Электрические машины магнитоэлектрического типа. Київ: НАН України, Інститут електродинаміки, 2011. 216 с.
2. Милых А.Н., Барабанов В.А., Двойных В.В. Трехстепенные электрические машины. Киев: Наукова думка, 1979. 308 с.
3. Антонов А.Е. Двухкоординатные электрические машины для следящих систем. Київ: НАН України, Інститут електродинаміки, 2000. 191 с.
4. Соловьев А.Э., Теплова В.А. Особенности движения трехступенной электрической машины с радиально намагниченным ротором и дополнительными статорными обмотками. *Известия ТулГУ. Технические науки. Электротехника*. 2016. Вып.7. Ч. 1. С. 175–183.
5. Heya A., Hirata K., Ezaki S., Ota T. Dynamic Analysis of a New Three-Degree-of-Freedom Actuator for Image Stabilization. *IEEE Transactions on magnetics*. 2017. Vol 53. Issue 6. Pp. 1563–1567. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2664144>.
6. Lee H.J., Park H.J., Ryu G.H., Oh S.Y., Lee J. Performance Improvement of Operating Three-Degree-of-Freedom Spherical Permanent-Magnet Motor. *IEEE Transactions on magnetics*. 2012. Vol. 48. No 11. Pp. 4654–4657. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2012.2200470>.
7. Wenqiang Tao, Guoli Li, Lufeng Ju, Rui Zhou, Cungang Hu. Design and Analysis of a Novel Spherical Motor Based on the Principle of Reluctance. IEEE International *Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*. Shenzhen, China, November 4-7, 2018. Pp. 7–13. DOI: <https://doi.org/10.1109/PEAC.2018.8590483>.

MATHEMATICAL MODELING OF ELECTRIC MACHINE WITH THREE-DEGREE-OF-FREEDOM GYROSTABILIZED ROTOR

K.P. Akinin, V.G. Kireyev, I.S. Petukhov, A.A. Filomenko

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: petuhov@ied.org.ua

A retrospective review of the development of the theory and practical structures of electric machines with a three-degree-of-freedom rotor (EMTR) at the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. The applications of EMTR in surveillance, tracking and stabilization systems on moving objects are listed. The relevance of the development of such machines is shown. The disadvantages of the classical mathematical model of EMTR are noted and the need to develop a refined mathematical model due to the need to develop new technology, the emergence of new materials and electronic components, as well as the growth of computing capabilities. The two main known structures of EMTR are described and the advantages of the perspective structure chosen as the basic one are listed. The model of static three-dimensional magnetic field of EMTR and the associated dynamic model in the COMSOL Multiphysics environment are substantiated and constructed for the basic structure of EMTR. The connection between the magnetostatic problem and the rotor motion dynamics problem is ensured by the fact that the data of the calculated instantaneous characteristics are transmitted in the form of approximated dependences to the dynamic problem. In the mode of free rotation without losses, the dependences of the precession angle on time, amplitude and phase of the sinusoidal current of the control winding are calculated. High accuracy of observance of the direction of precession of the axis of the rotor at observance of the corresponding initial phase of sinusoidal current of a control winding is noted. The influence of rotation windings on the moment created by the control winding is investigated. References 7, figures 8, table 1.

Key words: three-degree-of-freedom electric machine, gyro-stabilized rotor, precession, mathematical model

1. Antonov A.Ye. Electric machines of magnetolectric type. Kyiv: National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Electrodynamics, 2011. 216 p. (Rus)
2. Milyakh A.N., Barabanov V.A., Dvoynikh V.V. Three-degree-of-freedom electric machines. Kyiv: Naukova Dumka, 1979. 308 p. (Rus)
3. Antonov A.Ye. Two-coordinate electric machines for tracking systems. Kyiv: National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Electrodynamics, 2000. 191 p. (Rus)
4. Soloviev A.E., Teplova V.A. Features of the movement of a three-stage electric machine with a radially magnetized rotor and additional stator windings. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki. Elektrotehnika*. 2016. Vyp.7. Part 1. Pp. 175–183. (Rus)
5. Heya A., Hirata K., Ezaki S., Ota T. Dynamic Analysis of a New Three-Degree-of-Freedom Actuator for Image Stabilization. *IEEE Transactions on magnetics*. 2017. Vol 53. Issue 6. Pp. 1563–1567. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2664144>.
6. Lee H.J., Park H.J., Ryu G.H., Oh S.Y., Lee J. Performance Improvement of Operating Three-Degree-of-Freedom Spherical Permanent-Magnet Motor. *IEEE Transactions on magnetics*. 2012. Vol. 48. No 11. Pp. 4654–4657. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2012.2200470>.
7. Wenqiang Tao, Guoli Li, Lufeng Ju, Rui Zhou, Cungang Hu Design and Analysis of a Novel Spherical Motor Based on the Principle of Reluctance. IEEE International *Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*. Shenzhen, China, November 4-7, 2018. Pp. 7–13. DOI: <https://doi.org/10.1109/PEAC.2018.8590483>.

Надійшла 04.05.2022

Остаточний варіант 27.06.2022