

ТРИСТУПЕНЕВА ЕЛЕКТРИЧНА МАШИНА З ВНУТРІШНІМ ТА ЗОВНІШНІМ РОТОРОМ: ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ КЕРОВАНОСТІ

І.С. Петухов*, докт. техн. наук, **В.Г. Кіреєв****, канд. техн. наук, **К.П. Акінін*****, докт. техн. наук, **В.А. Лавриненко**
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.
E-mail: igor_petu@ukr.net

Розглянуто дві структури електричних машин з трьома ступенями свободи обертального руху ротора – з зовнішнім та внутрішнім ротором, що утримується на внутрішньому кардановому підвісі. Для порівняльного аналізу обрано симетричну в трьох площинах магнітну систему і обґрунтовано такий вибір. Сформульовано обмеження, що дають змогу розглядати ротор як консервативну механічну систему, а також вважати магнітне поле в електричній машині магнітостатичним. Наведено математичні моделі обертального руху тіла з нерухомим центром мас, а також силової взаємодії магнітного поля постійного магніту, розташованого на роторі, та обмотки управління, розташованої на статорі. Проаналізовано особливості розподілу електромагнітних зусиль у обох структурах і показано більшу ефективність формування цих зусиль у структурі з внутрішнім ротором. Отримано вирази для складових електромагнітного моменту задля використання їх в інтерфейсі «COMSOL Multiphysics». Проаналізовано примусовий прецесійний рух для обох структур у випадку рівності радіусів обмоток управління і випадку однакових габаритів магнітних систем. Визначено, що структура із зовнішнім магнітопроводом здатна забезпечити на порядок меншу кутову швидкість прецесійного руху i , в той же час, настільки ж менший розмах нутації. Бібл. 14, рис. 6, табл. 1.

Ключові слова: триступенева електрична машина, гіростабілізація, електромагнітний момент управління, обмотка управління, прецесія, нутація.

Вступ. Триступенева електрична машина, точніше – електрична машина з триступеневим ротором (ЕМТР), це електромеханічний перетворювач, ротор якого має три ступені свободи. Він має змогу обертатися навколо однієї з осей, а також змінювати напрям цієї осі в двох кутових координатах [1]. Існує декілька виконань електромеханічних перетворювачів з такою властивістю ротора, які відрізняються за типом електромеханічного перетворення, структурою, механічним утриманням ротора. Створено та досліджено декілька виконань багатополюсних триступневих двигунів, побудованих за кроковим принципом зі збудженням від постійних магнітів [2, 3, 4, 5], причому із зростанням потрібної точності зростало число полюсів та складність конструкції. Слід відмітити також триступневий виконавчий двигун, що побудований за принципом індукторної машини, за рахунок чого має дещо простішу конструкцію [6], ніж згадані вище. Серед машин розглянутого класу слід відмітити триступневий восьмиполюсний виконавчий двигун для стабілізації образу об'єкту спостереження [7, 8], а також виконавчий двигун з двополюсним постійним магнітом на роторі з рідинним підвісом [9]. Відмінністю ЕМТР [1] від вже згаданих триступневих виконавчих двигунів є швидкообертовий ротор. Така особливість надає механічній системі властивості гіростабілізації, тобто спроможності не реагувати на зміну орієнтації у просторі об'єкту, на якому встановлена ЕМТР. Тому сфера застосування даного типу машин охоплює системи спостереження та стеження на рухомих об'єктах, які здатні швидко змінювати своє положення, в загальному випадку стохастично.

Характерною особливістю структури ЕМТР є наявність компактного карданового підвісу, розташованого у внутрішній порожнині ротора, який і забезпечує можливість зміни його орієнтації руху у двох додаткових кутових координатах [1]. На відміну від ЕМТР ротор традиційних механічних гіроскопів встановлюється на зовнішньому кардановому підвісі і для корекції напрямку осі обертання використовує одновісні приводи по кожній з кутових координат. Таке технічне рішення постується рішенню із застосуванням ЕМТР за такими показниками як компактність, швидкодія, енергоспоживання. Дані роботи [1] свідчать, що за умов однакових масогабаритних показників обертові моменти управління обертальним рухом навколо осей карданового підвісу ЕМТР у кілька разів біль-

© Петухов І.С., Кіреєв В.Г., Акінін К.П., Лавриненко В.А., 2023

ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0003-1416-1174>; ** <https://orcid.org/0000-0002-9407-1074>;

*** <https://orcid.org/0000-0002-7830-2311>

ші і, відповідно, суттєво більша швидкодія. В разі порівняно близьких електромагнітних зусиль застосування ЕМТР дає змогу пропорційно зменшити енергоспоживання.

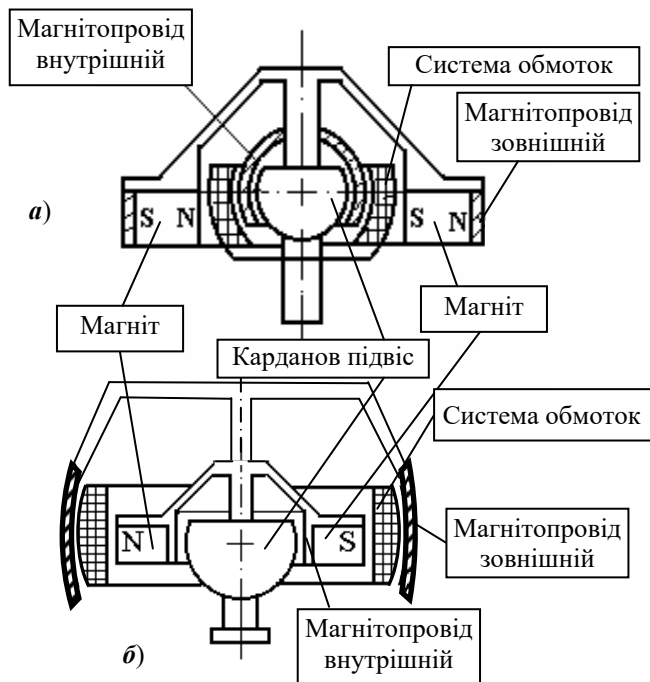


Рис. 1

момент інерції, потребує більших зусиль для корекції напрямку осі обертання і в той же час забезпечує кращу стабілізацію. Конструкція з внутрішнім ротором, здається, не має переваг: в неї менший момент інерції рухомих частин і менший об'єм постійного магніту. Але за відмови від зовнішнього магнітопроводу така структура стає технологічно простішою і дає змогу відвести більший об'єм під систему обмоток або збільшити діаметр внутрішнього ротору за умов збереження зовнішнього діаметру магнітної системи. Також розглянуті структури мають відмінності у розподілі потоків розсіювання. Потoki розсіювання наводять вихрові струми у електропровідних елементах конструкції, створюючи паразитні моменти, що порушують стабілізацію ротора. Тому внутрішній магнітопровід, що екранує карданів підвіс, обов'язково повинен бути присутнім у конструкції із зовнішнім ротором. В структурі з внутрішнім ротором відмова від зовнішнього магнітопроводу є можливою.

Хоча в роботі [1] структуру з внутрішнім ротором наведено без зовнішнього магнітопроводу, задля повноти розгляду можливих виконань ЕМТР далі буде розглянуто варіанти як з зовнішнім магнітопроводом, так і без нього. Також треба відмітити, що різного роду втрати є другорядними факторами, що впливають на показники керованості ЕМТР, і вплив від деяких з них можна обмежити або повністю його позбавитись, як зазначено вище. Головними факторами ж будемо вважати інертні властивості ротора та електромагнітні моменти для управління його рухом.

Системи спостереження та стеження встановлюються на рухомих об'єктах, що функціонують в різних умовах: на землі, в повітрі, під водою та в космічному просторі, тому вивчення можливих показників всіх доступних виконань ЕМТР є важливим завданням. Тому **метою роботи** є порівняння структур із зовнішнім та внутрішнім ротором за такими показниками як *моменти управління* та характеристики примусового прецесійного руху, який є кінцевим результатом функціонування всієї системи. Під характеристиками прецесійного руху розумітимемо швидкість примусової прецесії та амплітуду нутацій, які впливають на точність відтворення образу об'єкту спостереження на чутливому елементі пристрою.

Структури магнітної системи ЕМТР. Для розрахункового аналізу зупинимося на ідеалізованих структурах, позбавлених елементів, пов'язаних з другорядними факторами впливу на показники машини. На рис. 2 наведено: *a* – структуру магнітної системи ЕМТР з зовнішнім ротором та сегментованим магнітом; *b* – з внутрішнім ротором з кільцевим магнітом. Статором в цих структурах виступає компаундована монолітна система обмоток. На рис. 2 показано тільки обмотку управління. Обмотки

Досвід створення гіростабілізованого пристрою на базі ЕМТР дає змогу виділити дві структури, що розрізняються за взаємним розташуванням постійних магнітів системи збудження [1] (рис. 1). В першому випадку використовується зовнішній ротор (рис. 1, *a*), в другому ж – внутрішній (рис. 1, *b*). Зображення магнітопроводів та обмоток на рис. 1, *b* з циліндричними поверхнями в активній зоні принципового значення не має; ці елементи також можуть бути виконані зі сферичними поверхнями, як це показано на рис. 1, *a*. Зазначимо, що виконання магнітопроводів такими, що синхронно обертаються, є дієвим заходом зниження втрат на вихрові струми [1].

Можна виділити такі основні відмінності розглянутих структур. Це, безумовно, дещо більший момент інерції в першій структурі, а також різниця в розподілі магнітних потоків системи збудження. Як перший, так і другий фактори є першорядними за впливом на показники керованості і точності пристрою. Так зовнішній ротор, що має більший

обертального руху займають шар під обмоткою управління. Їхні струми за умов ненульового кута нутації β теж створюють відхиляючі моменти, але, оскільки метою дослідження є аналіз моментів управління у порівнювальних структурах, впливом обертальних обмоток управління знехтуємо.

Всі структурні елементи на рис. 2 відповідають таким на рис. 1 і тому не всі мають позначення. Для розрахункового дослідження оберемо саме симетричну конфігурацію відносно площини, нормальної до осі обертання (площина xOy), та симетричну відносно площин (yOz) та (xOz) (рис. 2) для статора і ротора, коли вісь обертання останнього співпадає з віссю z статора. Зауважимо, що на практиці такі симетричні структури дуже складно технологічно створити, але обрана ідеалізація дає змогу отримати екстремальні характеристики та показники. Дійсно, будь яке порушення симетрії, наприклад, обмотки на рис. 1, *a* зменшує її середню довжину витка обмотки і, як слідство, викликає зменшення створюваного магнітного потоку та електромагнітного моменту. Магнітопровід зовнішнього ротора на рис. 2, *a* і один з сегментів магнітних полюсів показано контурами. Також на рис. 2, *a* показано кути φ та θ сферичної системи координат, пов'язаної зі статором. Ці кути буде використано для розгляду залежності локальних електромагнітних зусиль, що виникають в наслідок взаємодії поля збудження та струму обмотки управління.

Задля моделювання прецесійного руху ротора необхідно виконувати перетворення координат, а саме повороти. Для повороту системи координат часто використовують кути Ейлера α , β , γ – відповідно кути прецесії, нутації та обертання [10]. Традиційно вони використовуються в послідовності Z-X-Z (послідовність осей, навколо яких відбувається поворот), в тому числі і в програмному комплексі «Comsol Multiphysics» [11]. В нашому випадку ЕМТР, яка за принципом дії є синхронною, доцільно використовувати послідовність Z-Y-Z [12], яка більш прийнятна з причини бажання залишити напрямки поля збудження по повздовжній осі машини. На рис. 2, *b* показано два послідовні повороти на кути α та β переходу від системи координат статора (x, y, z) до системи координат ротора (X, Y, Z) , вісь Z якої співпадає з віссю обертання ротора.

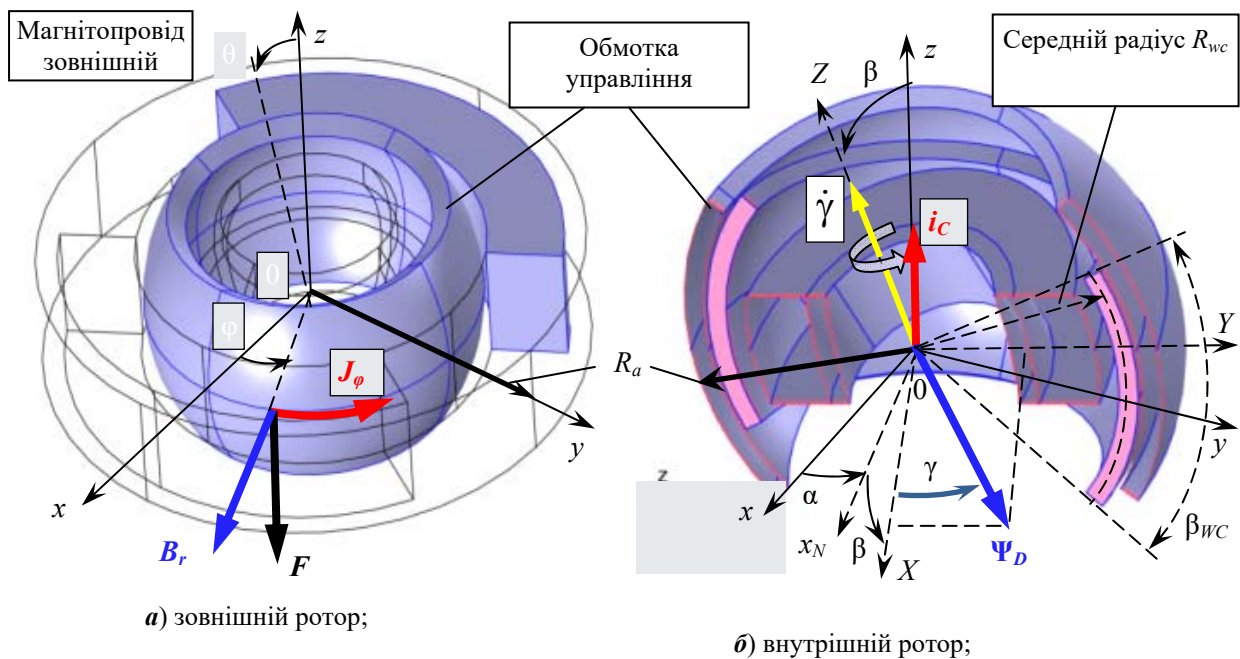


Рис. 2

Ще одна ідеалізація пов'язана з зображеними на рис. 2, *b* векторами взаємного потокозчеплення намагніченого ротора Ψ_D з обмоткою управління та струму цієї обмотки i_c . Взаємодію цих величин як просторових векторів можна аналізувати, коли величини, що їх моделюють згадані вектори, розподілені у просторі за гармонічним законом, тобто є синусоїдами. Ця ідеалізація традиційно використовується в теорії електричних машин і для ЕМТР також може бути застосована [13]. Це робить обґрунтованим подальше отримання виразів для складових електромагнітного моменту, що прикладений до обмотки статора з боку поля збудження ротора.

Порівняння структур виконаємо для двох випадків: 1) однакові розміри обмотки управління; 2) однакові габарити – зовнішній радіус ротора та зовнішній радіус статора для структур рис. 2, а та 2, б позначений як R_a . Структура з зовнішнім ротором зображена з постійними магнітами, виконаними у вигляді двох сегментів з кутовим розміром $\Delta\varphi=120^\circ$ (рис. 2, а). При цьому кутовому розмірі досягається максимум електромагнітного моменту [1]. Проте в подальшому порівняльному аналізі для зовнішнього магнітопроводу розглянуто також кільцевий магніт системи збудження. У разі внутрішнього магнітопроводу розглядався тільки кільцевий магніт.

Математична модель. Як вже відзначалося, для порівняльного аналізу обраних структур ЕМТР в якості основних показників виступають характеристики прецесійного руху. Тому в математичній моделі будемо нехтувати усіма другорядними факторами, які можуть залежати від конкретного виконання конструкції пристрою або умов його функціонування. Обираючи для дослідження симетричну магнітну систему, отримаємо орієнтир, який дозволить оцінити ступінь наближення показників розроблюваної конструкції до ідеалу. Другою ідеалізацією в дослідженні з вищезазначених причин буде нехтування впливом обмоток обертального руху. Обмотки обертального руху за умов нахилу ротора і порушення таким чином симетрії своїм магнітним полем створюють паразитний момент. Але оскільки ці обмотки можливо створити як у двофазному, так і трифазному виконанні аналіз їхнього впливу є самостійною задачею, і в даному дослідженні цей вплив не враховується. Зазвичай ці обмотки виконуються безпосередньо прилеглими до обмотки управління. В структурах на рис. 2 їхнє місце відображено підвищеним повітряним проміжком.

Ще однією ідеалізацією буде нехтування будь якими силами, які роблять систему неконсервативною. Поява таких зусиль може бути пов'язана з тертям у підшипниках, аеродинамічними втратами, а також втратами, як зазначено вище, від вихрових струмів, магнітного гістерезису та дією пристроїв для демпфування коливань осі ротора, тощо. Нехтування вихровими струмами в магнітній системі та елементах конструкції обґрунтовано можливостями виготовлення цих елементів з матеріалів що мають низьку електропровідність.

Нарешті, будемо розглядати рух ротора в інерційній системі координат.

В підсумку для формулювання математичної моделі приймемо наступні припущення.

1. Центр мас ротора ЕМТР є нерухомим.
2. Вплив обмоток обертання на момент обмотки управління відсутній.
3. На ротор діють тільки електромагнітні моменти управління, а будь які моменти, що чинять механічний опір, не враховуються.

У випадку обертального руху тіла відносно нерухомої точки, якщо осі системи координат лежать у площинах симетрії, ці осі є головними осями інерції. Тоді динамічні рівняння Ейлера мають вигляд [14]

$$\begin{cases} I_{xx}\dot{\omega}_x - (I_{yy} - I_{zz})\omega_y\omega_z = M_x \\ I_{yy}\dot{\omega}_y - (I_{zz} - I_{xx})\omega_z\omega_x = M_y, \\ I_{zz}\dot{\omega}_z - (I_{xx} - I_{yy})\omega_x\omega_y = M_z \end{cases} \quad (1)$$

де I_{xx} , I_{yy} , I_{zz} – моменти інерції тіла відносно відповідних осей; ω_x , ω_y , ω_z – кутові швидкості відносно зазначених осей, точка над змінною позначає повну похідну за часом; M_x , M_y , M_z – зовнішні моменти. Розв'язання рівнянь (1) реалізовано в інтерфейсі «Multibody Dynamics» пакету «Comsol Multiphysics», в якому враховуються всі особливості, притаманні гіроскопічному ефекту, і де вхідними даними є геометрія тіла, властивості матеріалів та вищезгадані електромагнітні моменти, що входять до правої частини рівнянь (1).

Завдяки нехтуванню вихровими струмами та магнітним гістерезисом магнітне поле можна вважати магнітостатичним, а електромагнітні моменти, точніше їхні залежності від кутів орієнтації можна обчислювати завчасно, а не розраховувати в процесі інтегрування рівнянь руху (1). Розрахунок цих залежностей виконувався в інтерфейсі «Magnetic Fields» також пакету «COMSOL Multiphysics». Магнітостатичне поле в тривимірній моделі магнітної системи з нелінійними характеристиками феромагнітних матеріалів та за умов наявності залишкової намагніченості описується системою рівнянь відносно змінної векторного магнітного потенціалу \mathbf{A} :

$$\begin{cases} \nabla \times \left(f(\|\mathbf{B}\|) \frac{\mathbf{B}}{\|\mathbf{B}\|} - H_c \frac{\mathbf{e}}{\|\mathbf{e}\|} \right) = \mathbf{J}_{wc}, \\ \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \end{cases} \quad (2)$$

де ∇ – оператор Гамільтона; $f(\|\mathbf{B}\|)$ – залежність напруженості поля від магнітної індукції; \mathbf{B} – вектор магнітної індукції; H_c – величина коерцитивної сили постійного магніту у відповідних областях; \mathbf{J}_{wc} – густина струму в межах області обмотки управління.

В областях з магнітним яким феромагнетиком в рівняннях (2) коерцитивна сила H_c дорівнює нулю, а в лінійних в магнітному відношенні областях нелінійна функція $f(\|\mathbf{B}\|)$ суть – \mathbf{B}/μ , де μ – магнітна проникність. Задля більшої точності моделювання поля розсіяння за межами зовнішнього магнітопроводу повітряне середовище сферичної конфігурації вважалося розповсюдженим на відстань в чотири зовнішні радіуси R_a цього магнітопроводу, а під поверхнею цієї сфери було виділено шар завтовшки $0,5 R_a$, заповнений нескінченими елементами [11].

Обчислення складових електромагнітного моменту, що входять до системи рівнянь (1), в інтерфейсі «Magnetic Fields» виконується інтегруванням відповідних електромагнітних зусиль. В даній безпазовій структурі ЕМТР для обчислення електромагнітних зусиль доцільно використовувати [11] формулу Лоренца

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}, \quad (3)$$

де \mathbf{J} – вектор густини струму; \mathbf{B} – вектор магнітної індукції. В свою чергу компоненти електромагнітного моменту M_x, M_y в системі координат статора (x, y, z) можна отримати інтегруванням просторових складових електромагнітної сили $F_{x,y,z}$ по об'єму V_C обмотки управління за виразами

$$\begin{cases} M_x = \int_{V_C} (F_x \cdot z - F_z \cdot x) dV, \\ M_y = \int_{V_C} (-F_y \cdot z + F_z \cdot y) dV, \end{cases} \quad (4)$$

де F_x, F_y – відповідні складові сили Лоренца (3).

Електромагнітні моменти управління прецесією. Зважаючи на правомірність застосування магнітостатичної постановки задачі розрахунку магнітного поля, після моделювання за формулами (4) визначалися залежності вищезгаданих складових від орієнтації ротора. Для порівняння структур з зовнішнім та внутрішнім ротором у статичному стані обмежимося обчисленням максимального відхиляючого моменту, що досягається за умов нульового кута нутації β .

Дослідження за критерієм рівності розмірів обмотки управління виявило суттєво більший електромагнітний момент, притаманний структурі з внутрішнім ротором. За результатами розрахунків співвідношення для внутрішнього та зовнішнього виконання ротору з кільцевого магніту з однакою поперечним перерізом площиною ($y = 0$) і, відповідно, з однаковою густиною струму обмотки управління складає 1,66 на користь першого. Така велика різниця не є очевидною. Дійсно, об'єм магніту зовнішнього ротора суттєво більший, і такий магніт дещо «концентрує» поле у внутрішній області, де розташовано обмотку.

Задля прояснення цього уявного протиріччя були проведені розрахунки розподілу складових питомого локального моменту вздовж меридіану (вздовж «середньої лінії») обмотки управління радіусом R_{wc} (рис. 2, б) в площині $y = 0$. Графіки розподілу складових моменту, що входять до виразів (4), наведено на рис. 3, а, б для зовнішнього та внутрішнього виконання ротора відповідно. З графіків випливає, що для внутрішнього ротора навіть складова моменту, викликана вертикальною компонентою електромагнітного зусилля F_z , має більше значення скрізь в області обмотки управління. Більш того, складова, викликана компонентою F_x , у випадку зовнішнього ротора має скрізь від'ємне значення, що зменшує результуючий електромагнітний момент.

Простежити візуально причину такої різниці у силевій взаємодії можна, розглянувши також у площині $y = 0$ розподіл індукції магнітного поля. На рис. 4 наведено картини розподілу модуля магнітної індукції за допомогою тонування та напрямку вектору магнітної індукції за допомогою стрілок. Перше поле розраховано за умов кута обертання ротора $\gamma = 45^\circ$. Це зроблено для того, щоб густиною тону графічно продемонструвати інтенсивність поля в магнітопроводі, яке здебільшого є тангенціальним і досягає максимуму за умов кута обертання 90° , а за умов нульового кута обертання в розглянутому перетині амплітуда магнітної індукції мінімальна. Поле ж напрямку вектора магнітної індукції розраховано за умов нульового кута обертання, оскільки за цих умов в області обмотки цей напрям найбільше наближений до нормального (радіального), який і створює електромагнітне зусилля.

словальних ресурсів. Тому потрібно отримати апроксимацію складових моменту в залежності від кутів Ейлера для використання цих залежностей в процесі розв'язання нестационарних рівнянь динаміки (1).

Виразом для електромагнітного моменту від взаємодії струму обмотки управління i_C та потокозчеплення намагніченого ротора з обмоткою управління $\Psi_D = (\Psi_x, \Psi_y, \Psi_z)$ є векторний добуток

$$\mathbf{M} = -\det \begin{bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \Psi_x & \Psi_y & \Psi_z \\ 0 & 0 & i_C \end{bmatrix}, \quad (5)$$

звідки отримаємо складові в системі статора

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Psi_y \\ \Psi_x \end{bmatrix} i_C. \quad (6)$$

В системі координат ротора (X, Y, Z) складові потокозчеплення є гармонічними функціями кута обертання

$$\begin{bmatrix} \Psi_x \\ \Psi_y \end{bmatrix} = \Psi_D \begin{bmatrix} \cos \gamma \\ \sin \gamma \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Помножимо вираз (7) зліва на матриці зворотного повороту на кут $(-\beta)$ та на кут $(-\alpha)$

$$\begin{bmatrix} \Psi_x \\ \Psi_y \end{bmatrix} = \Psi_D \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma \\ \sin \gamma \end{bmatrix}, \quad (8)$$

і в результаті отримаємо шукані вирази для складових електромагнітного моменту

$$\begin{cases} M_x = -\Psi_D (\sin \alpha \cos \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma) i_C \\ M_y = \Psi_D (\cos \alpha \cos \beta \cos \gamma - \sin \alpha \sin \gamma) i_C \end{cases}. \quad (9)$$

Отримані залежності слугують вхідними даними для завдання складових моменту в інтерфейсі «Multibody Dynamics» пакету «COMSOL Multiphysics».

Динаміка прецесійного руху та нутація. Порівняльні чисельні дослідження проводилися для випадку старту примусової прецесії з нульового значення кута нутації β тобто збігу осі обертання з віссю z . Зміна орієнтації осі ротора організовувалася його поворотом відносно осі y . Для цього навколо осі x прикладався електромагнітний момент, що мав позитивну постійну складову. Такий момент можна здійснити за допомогою живлення обмотки управління синусоїдальним струмом частоти обертання ротора і відповідної фази [1]. На рис. 5 представлені графіки зміни кута нутації в залежності від часу в діапазоні від 0 до 0,1 секунди, на рис. 6 – годографи кута нутації в двох кутових координатах статора (θ, φ) . Щоб запобігти накладанню графіків годографи зображені зі зміщенням по кутовій координаті φ на 4 градуси, хоча всі розглянуті процеси починаються з нульових кутів. Слід зазначити, що в реальних системах стеження процес часто зустрічається і у зворотному напрямку, тобто у напрямку зменшення кута θ .

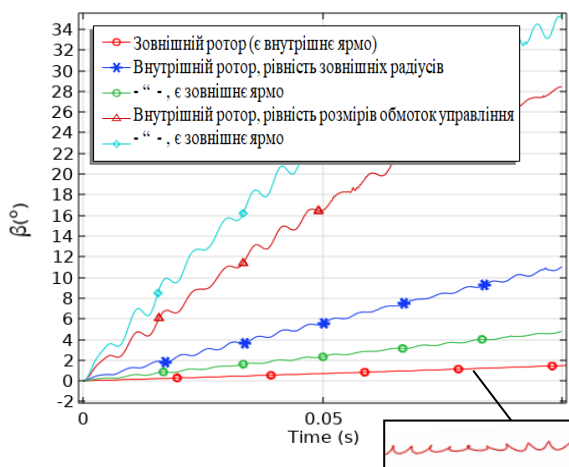


Рис. 5

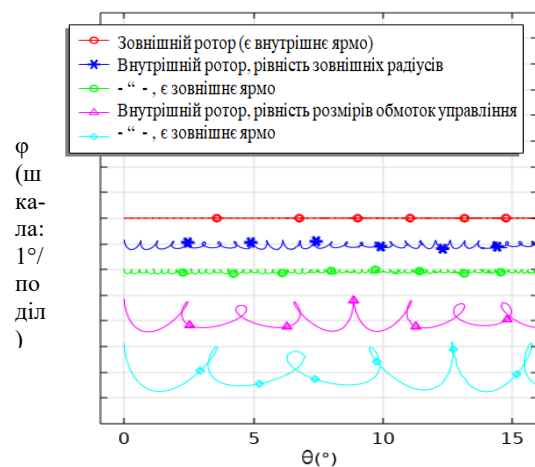





Рис. 6

Огляд результатів показує, що структура із зовнішнім ротором має менше варіантів виконання. Це відбувається через те, що в конструкції обов'язково повинен бути присутнім внутрішній магнітопровід, який екранує карданів підвіс, а також і зовнішній магнітопровід через потреби формування розподілу магнітного поля. В структурі з внутрішнім ротором можливо відмовитися від зовнішнього магнітопроводу в разі виготовлення корпусу та оточуючих магнітну систему елементів конструкції з не електропровідних матеріалів. В роботі розглянуто тільки структури з однаковим кутовим розміром обмотки управління $\beta_{WC}=70^\circ$ (рис. 2, б). Однак у структурі з внутрішнім ротором зовнішній магнітопровід можна виконати з меншим кутовим розміром, що додає свободи у проектуванні такої конструкції.

Отримані результати дають змогу оцінити вплив інерційних властивостей на швидкість примусової прецесії для структур із зовнішнім та внутрішнім ротором. Так, швидкість зміни кута нутації в заданому напрямку для структури із зовнішнім ротором на порядок менша. Також цій структурі властива на порядок менша амплітуда нутації. Чисельні значення розглянутих показників руху, а також розглянуті вище інші показники і геометричні дані структур з зовнішнім та внутрішнім ротором наведено у таблиці, де також наведено показники структури з внутрішнім ротором без магнітопроводу статора. Зеленим кольором помічені вічка з кращими показниками, рожевим – з гіршими показниками. Відсутність кольору позначає або нейтральне, або довідкове значення показника; темно сірий колір – дані не розраховувались. Спільними параметрами для обох структур є наступні:

- густина струму в міді обмотки – 10 А/мм²;
- матеріал постійного магніту – КС37А; швидкість обертання ротора – 6000 об./хв.;
- висота ярма магнітопроводу з системою збудження – 9 мм;
- висота ярма екрануючого магнітопроводу – 1,5 мм;
- довжина постійного магніту в напрямку намагнічування – 7 мм ;
- технологічний повітряний проміжок – 0,5 мм;
- кутовий розмір обмотки управління (у вертикальному перерізі) 70°.

Структура (варіанти внутрішнього ротора з зовнішнім магнітопроводом та без нього)	Зовнішній ротор, сегментовані по 120 °магніти 	Внутрішній ротор	
		критерій порівняння – рівність радіусів обмотки управління*	критерій порівняння – рівність зовнішніх радіусів**
			
Середній відносний*** радіус обмотки управління	0,58	0,83	0,878
Мінімальний відносний внутрішній радіус магнітної системи***	0,32	0,26	0,47
Максимальний момент управління (у.о./Н·м):			
Зовнішній магнітопровід	1,0 /0,0133	1,70 /0,0226	3,57 /0,0475
Зовнішній магнітопровід (магніт кільцевий)	1,022 /0,0136-		-
Без зовнішнього магнітопроводу	-	1,18 /0,0157	2,44 /0,0325
Моменти інерції J_{zz} (кг·м ²)/($J_{xx},=J_{yy}$)			
Кільцевий магніт****	4,25·10 ⁻⁵ /2,21·10 ⁻⁵		
Зовнішній магнітопровід		1,92·10 ⁻⁶ /1,19·10 ⁻⁶	4,57·10 ⁻⁵ /2,72·10 ⁻⁵
Без зовнішн. магнітопроводу		1,97·10 ⁻⁶ /1,22·10 ⁻⁶	1,32·10 ⁻⁵ /7,12·10 ⁻⁶
Швидкість примусової прецесії			
Зовнішній магнітопровід	22 °/с	110 °/с	340 °/с
Без зовнішн. магнітопроводу		150 °/с	280 °/с
Розмах коливань кута β			
Зовнішній магнітопровід	0,05 °	0,15 °	0,58 °
Без зовнішн. магнітопроводу		0,92 °	0,39 °

* У порівнянні з зовнішнім ротором конструктивний діапазон кутів регулювання значно менший.

** Зовнішній діаметр обмотки управління не змінено при «видаленні» магнітопроводу.

*** Розміри визначаються по відношенню до зовнішнього радіуса структури R_a (рис. 2).

**** У випадку сегментованого магніту значення моментів інерції J_{xx} , J_{yy} децю відрізняються.

Висновки. Порівняльний аналіз симетричної в трьох площинах структури з зовнішнім та внутрішнім ротором за умов **однакових**: *радіальних розмірів обмотки; б) зовнішніх радіальних розмірів магнітної системи; розмірів радіального перерізу постійного магніту збудження, розташованого на роторі; висоти ярем магнітопроводів та відсутності в конструкції будь яких демпфуючих коливань елементів* показав, що:

- 1) електромагнітний момент управління у 2,44 рази більший для структури з внутрішнім ротором навіть за умов відсутності зовнішнього магнітопровода;
- 2) швидкість примусової прецесії та розмах нутації на порядок менший у структурах із зовнішнім ротором;
- 3) розподіл магнітної індукції в об'ємі обмотки управління у структурі з внутрішнім ротором є більш оптимальним для отримання екстремальних величин електромагнітного моменту управління.

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

1. Антонов А.Е. Электрические машины магнитоэлектрического типа. К.: Институт электродинамики НАН Украины, 2011. 216 с.
2. Jiabin Wang, Weiya Wang, Geraint W. Jewel, David Howe A novel spherical permanent magnet actuator with three degrees-of-freedom. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1998. Vol. 34. No 4. Pp. 2078–2080.
3. 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>.
4. Yan Wen, Guoli Li, Qunjing Wang, Xiwen Guo, Wenping Cao Modeling and Analysis of Permanent Magnet Spherical Motors by a Multitask Gaussian Process Method and Finite Element Method for Output Torque. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2021. Vol. 68. Issue 9. Pp. 8540–8549. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3018078>.
5. Wen Y., Li G., Wang Q., Tang R., Liu, Y., Li H. Investigation on the Measurement Method for Output Torque of a Spherical Motor. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10(7). 2510. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10072510>.
6. 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, 04-07 November 2018. Pp. 7–13. DOI: <https://doi.org/10.1109/PEAC.2018.8590483>.
7. 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. 54. No 6. Pp. 1563–1567. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2664144>.
8. Heya A., Hirata K. Experimental Verification of Three-Degree-of-Freedom Electromagnetic Actuator for Image Stabilization. *Sensors*. 2020. Vol. 20(9). Pp. 2485. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20092485>.
9. Li Z., Chen Q., Wang Q. Analysis of Multi-Physics Coupling Field of Multi-Degree-of-Freedom Permanent Magnet Spherical Motor. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2019. Vol. 55. No 6. Pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2019.2899259>.
10. Magnus K. Kreisel: Theorie und Anwendungen. Berlin: Springer, 1971. 493 p.
11. COMSOL multiphysics modeling and simulation software. URL: <https://www.comsol.com/documentation> (date accessed 05.05.2023).
12. Shuster M.D. A survey of attitude representations. *Journal of the Astronautical Sciences*. 1993. Vol. 41. No 4. Pp. 439–517.
13. Милях А.Н., Барабанов В.А., Двойных В.В. Трехстепенные электрические машины. К.: Наукова думка, 1979. 308 с.
14. Петрищев В.Ф. Элементы теории гироскопа и его применение для управления космическими аппаратами: Учеб. Пособие. Самар: Самар. гос. аэрокосм. ун-т., 2004. 68 с.

THREE-DEGREE-OF-FREEDOM ELECTRIC MACHINE WITH INTERNAL AND EXTERNAL ROTOR: COMPARATIVE ANALYSIS OF CONTROL PERFORMANCE

I.S. Petukhov, V.G. Kireyev, K.P. Akinin, V.A. Lavrinenko
Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteyskiy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.
E-mail: igor_petu@ukr.net.

Two structures of electric machines with three degrees of freedom of the rotational movement of the rotor are considered - with an external and an internal rotor held on an internal cardan suspension. A three-plane symmetric magnetic system was chosen for the comparative analysis and such a choice was justified. Limitations are formulated that allow considering the rotor as a conservative mechanical system, as well as considering the magnetic field in the electric machine as magnetostatic. Mathematical models of the rotational motion of a body with a fixed center of mass, as well as the force interaction of the magnetic field of a permanent magnet located on the rotor and the control winding located on the stator, are given. The peculiarities of the distribution of electromagnetic forces in both structures are analyzed and the greater efficiency of the formation of these forces in the structure with an internal rotor is shown. Expressions for the components of the electromagnetic moment for use in the "COMSOL Multiphysics" interface are obtained. Forced precession movement for both structures was analyzed in the case of equal radii of the control windings and in the case of the same dimensions of the magnetic systems. It was determined that the structure with an external magnetic circuit is able to provide an order of magnitude smaller angular velocity of precessional movement and, at the same time, an equally smaller range of nutation. References 14, figures 6, table 1.

Key words: three-degree-of-freedom electric machine, gyro-stabilization, control electromagnetic moment, control winding, precession, nutation.

1. Antonov A.Ye. Electric machines of magnetolectric type. Kyiv: Instytut elektrodynamiky NAN Ukrainy, 2011. 216 p. (Rus)
2. Jiabin Wang, Weiya Wang, Geraint W. Jewel, David Howe A novel spherical permanent magnet actuator with three degrees-of-freedom. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1998. Vol. 34. No 4. Pp. 2078–2080.
3. 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>.
4. Yan Wen, Guoli Li, Qunjing Wang, Xiwen Guo, Wenping Cao Modeling and Analysis of Permanent Magnet Spherical Motors by a Multitask Gaussian Process Method and Finite Element Method for Output Torque. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2021. Vol. 68. Issue 9. Pp. 8540–8549. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3018078>.
5. Wen Y., Li G., Wang Q., Tang R., Liu, Y., Li H. Investigation on the Measurement Method for Output Torque of a Spherical Motor. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10(7). 2510. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10072510>.
6. 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, 04-07 November 2018. Pp. 7–13. DOI: <https://doi.org/10.1109/PEAC.2018.8590483>.
7. 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. 54. No 6. Pp. 1563–1567. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2664144>.
8. Heya A., Hirata K. Experimental Verification of Three-Degree-of-Freedom Electromagnetic Actuator for Image Stabilization. *Sensors*. 2020. Vol. 20(9). Pp. 2485. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20092485>.
9. Li Z., Chen Q., Wang Q. Analysis of Multi-Physics Coupling Field of Multi-Degree-of-Freedom Permanent Magnet Spherical Motor. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2019. Vol. 55. No 6. Pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2019.2899259>.
10. Magnus K. Kreisel: Theorie und Anwendungen. Berlin: Springer, 1971. 493 p.
11. COMSOL multiphysics modeling and simulation software. URL: <https://www.comsol.com/documentation> (date accessed 05.05.2023).
12. Shuster M.D. A survey of attitude representations. *Journal of the Astronautical Sciences*. 1993. Vol. 41. No 4. Pp. 439–517.
13. Miliakh A.N., Barabanov V.A., Dvoynikh V.V. Three-degrees-of-freedom electric machines. Kiev: Naukova dumka, 1979. 308 p. (Rus)
14. Petristev V.F. Elements of the gyroscope theory and its application for spacecraft control: training manual. Samara: Samarskii gosudarstvennyi aerokosmicheskii universitet, 2004. 68 p. (Rus)

Надійшла 24.05.2023
Остаточний варіант 27.07.2023