

ВПЛИВ ЧИСЛА ФАЗ ОБМОТКИ ОБЕРТАННЯ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МАШИНИ З ТРИСТУПЕНЕВИМ РОТОРОМ

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

Розглянуто структуру електричної машини з ротором, що має три ступені свободи обертання (ЕМТР) і складається з зовнішнього та внутрішнього магнітопроводів, між якими в повітряному проміжку сферичної конфігурації розташовано т-фазну обмотку обертання та обмотку управління. Збудження магнітного поля в ЕМТР здійснюється за допомогою постійних магнітів, розташованих на зовнішньому магнітопроводі. Окреслено сферу застосування ЕМТР в системах стабілізації, спостереження та стеження, де ротор відіграє функцію гіростабілізуючого елемента. З огляду на структуру розглянутої ЕМТР обґрунтовано відсутність в конструкції впливу вихрових струмів і придатність математичної моделі статичного магнітного поля. Виконано розрахунок обертового моменту ЕМТР з дво- та трифазними обертовими обмотками за умов різного кута нахилу ротора відносно осі статора. Показано перевищення моменту обертання трифазної обмотки на 20% у порівнянні з двофазною. Відмічено значний вплив обмотки управління на обертовий момент трифазної обмотки і приблизно однаковий вплив дво- та трифазної обмотки обертання на прецесійний момент за умов значної величини кута нахилу ротора. Бібл. 7, рис. 8, табл. 1.

Ключові слова: триступенева електрична машина, гіростабілізований ротор, прецесія, трифазна обмотка, двофазна обмотка.

Вступ. Електричні машини з триступеневим ротором (ЕМТР) складають окремий клас електро-механічних перетворювачів енергії, в яких ротор, що обертається з високою швидкістю, може змінювати напрям осі обертання відносно двох кутових координат [1, 2]. Таким чином, ЕМТР здатні змінювати положення виконавчого органу, жорстко пов'язаного з ротором, за двома кутовими координатами, причому стабілізація цього положення забезпечується явищем гіростабілізації. Поява та розробка таких машин пов'язана з потребою підвищення експлуатаційних показників пристроїв та систем, в яких необхідно реалізувати вищезгадану функцію орієнтації, оскільки можливості традиційних кінематичних схем із застосуванням приводів по кожній з кутових координат практично вичерпані [1].

Здебільшого ЕМТР використовується в режимі двигуна і застосовується в системах стабілізації, спостереження та стеження, де ротор, як вже відмічено, відіграє функцію гіростабілізуючого елемента. За принципом функціонування такі машини, вочевидь, мають властивості гіроскопу, оскільки їм притаманна здатність реагувати на зміну кутової орієнтації об'єкту, на якому вони встановлені, відносно інерційної системи відліку. Але на відміну від класичного гіроскопу, де для примусової зміни орієнтації осі ротора використовуються спеціальні приводи по кожній з двох осей, в ЕМТР зміна орієнтації осі ротора виконується за рахунок дії магнітного поля обмотки управління, змінний струм якої створює відповідний коригуючий момент. Ця властивість ЕМТР зумовлює притаманні їй такі важливі експлуатаційні якості як швидкодія, малі масогабаритні показники, низьке енергоспоживання у порівнянні з багатомашинними кінематичними системами. Далі буде розглянуто саме ЕМТР з управлінням напрямком осі обертання ротора, який виконує, в свою чергу, функцію інерційного стабілізатора.

Збудження магнітного поля ЕМТР здійснюється розташованою на роторі системою постійних магнітів. З появою високоерцитивних постійних магнітів на основі інтерметалічних сполук самарію та неодиму така система збудження стала фактично безальтернативною, за винятком тих випадків, коли поле збудження треба регулювати. Простота конструкції ротора дещо урівноважується складністю конструкції статора, де потрібно розмістити обмотки, що забезпечують обертання ротора, та об-

© Петухов І.С., Кіреєв В.Г., Акинін 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>

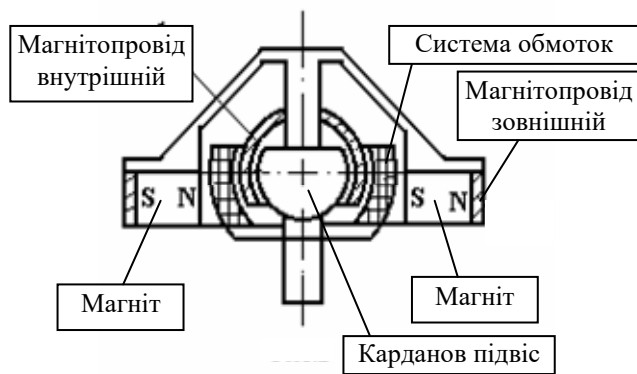


Рис. 1

електромеханічної структури ЕМТР класичного типу наведено на рис. 1, де систему збудження магнітного поля постійними магнітами розташовано на зовнішньому магнітопроводі. У цій структурі зовнішній та внутрішній магнітопроводи жорстко з'єднані між собою, при цьому вони охоплюють систему обмоток, внаслідок чого в процесі обертання ротору виключаються втрати на перемагнічування та вихрові струми в магнітопроводах, а також зменшуються потоки розсіювання [1]. В той же час система обмоток, розташованих у обмеженому просторі повітряного проміжку, є складним об'єктом як конструктивно, так і технологічно, оскільки її структура та точність виконання впливає на всі показники ЕМТР.

Для реалізації можливості трьох ступенів свободи обертання ротора використовуються різноманітні електромагнітні структури. У роботі [5] досліджено ЕМТР, яка працює за принципом індукторної машини. Вона містить два поєднаних статори для обертального та хитального руху відповідно з системою з восьми обмоток для кожного з п'яти можливих фіксованих кутів нахилу ротора. Можна відмітити низку досліджень так званих двигунів сферичного типу, де для збудження магнітного поля використовується постійний магніт, а регулювання за трьома координатами реалізується за принципом крокового двигуна, що містить у своїй структурі обмоток 12 або 24 секції. Ці технічні рішення описано відповідно в роботах [6, 7]. Кожен зі згаданих принципів – принцип індукторної машини та принцип крокового двигуна – для своєї реалізації потребують досить складної конструкції магнітної системи і не можуть бути використаними для забезпечення швидкообертового руху ротора та безступінчастої зміни кута нахилу його осі обертання через наявність магнітного тяжіння між статором та ротором. В представленій структурі ЕМТР (рис. 1) на статорі двигуна відсутні будь-які феромагнітні матеріали, що обумовлює можливість плавного регулювання кута нахилу ротора і відсутність шкідливих моментів, які б призводили до його некерованої прецесії.

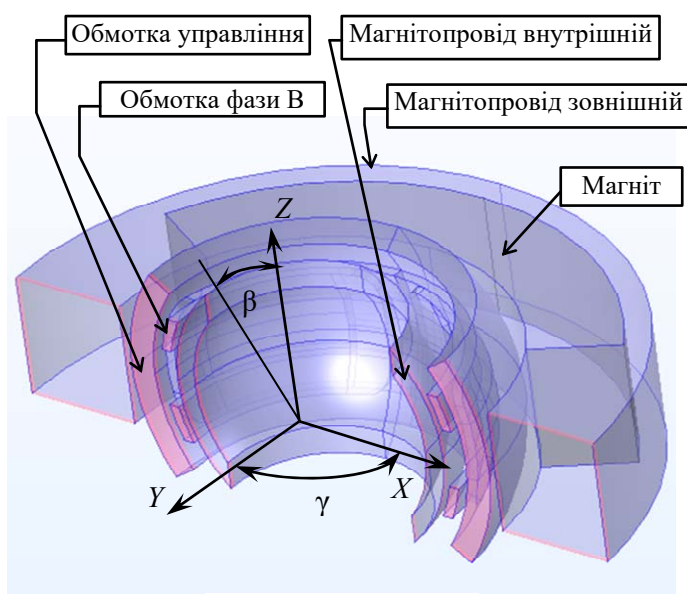


Рис. 2

мотку управління для коригування напрямку осі обертання. Електричні двигуни, що реалізують тривимірний рух ротора чи керовану просторову орієнтацію осі пристрою за двома кутовими координатами, мають значне поширення та досліджуються протягом тривалого часу. Зустрічаються серед них такі, що мають класичну структуру, обертаний рух ротору яких реалізується за принципом синхронної машини [2–4]. Управління просторовою орієнтацією в таких пристроях відбувається завдяки реалізації процесу прецесії, тобто в них активно використовується гіроскопічний ефект. Тому обмотку управління часто в літературі називають обмоткою прецесії. Варіант

Аналіз особливостей ЕМТР, а також наявність нових магнітних матеріалів і електронних комплектуючих для систем керування спонукають до подальшого удосконалення цього класу електричних машин, а підвищений попит на сучасні системи пошуку та стеження підтверджують актуальність зазначеної тематики.

Традиційно в ЕМТР для забезпечення розгону та стабілізації обертів ротору використовується двофазна обмотка [1, 2, 4]. Але з класичної теорії електричних машин відомо, що трифазна схема живлення має деякі переваги перед двофазною і тому **метою даної роботи** є визначення можливості використання трифазної обмотки в обраній структурі ЕМТР та проведення порівняльного аналізу характеристик двигуна у разі застосування двох схем обмоток різної фазності.

Розрахункові структури та математична модель. На рис. 2 наведено поперечний переріз магнітної системи обраної структури в системі координат (X, Y, Z) , пов'язаній зі статором, де кут β , так званий кут нутації, є кутом відхилення осі ротора від осі Z . Щоб виключити вплив другорядних особливостей конструкції на результати моделювання, магнітну систему зведено до ідеалізованої симетричної геометрії і з неї виключено елементи карданова підвісу (рис. 1). В розглянутій переріз потрапляють секції фази B . Секції фази A , що має просторовий зсув на 90° уздовж кутової координати γ , мають скорочений крок і тому в наведений переріз не потрапляють. Вони займають шар між фазою B та обмоткою управління. Зображення двофазної обмотки наведено на рис. 3, де секції двох фаз позначено різними кольорами.

Особливості практичної реалізації двофазної обмотки визначають її принципові недоліки. Основним недоліком є те, що неможливо уникнути прилягання секцій, які розташовані в сусідніх шарах та мають приналежність до різних фаз. Цей недолік призводить до зниження надійності обмотки та ускладнень з її виготовлення. Позбутися його можна виконавши обмотку з фазною зоною не більшою ніж 90° , але в цьому випадку амплітуда першої гармоніки МРС складає лише 63 % від першої гармоніки обмотки обраної структури.

Секції обох обмоток в розглянутій моделі виконані з дещо скороченим кроком (рис. 3), що незначно знижує МРС, але це зниження не є критичним і становить приблизно 2 % від амплітуди першої гармоніки (за заданої ширини секції обмотки). До того ж слід додати, що проміжки між секціями відіграють позитивну роль, оскільки зменшують лобові частини, які сформовано горизонтальними ділянками обмотки на рис. 3, що, звичайно, зменшує індуктивність розсіювання та опір неактивних ділянок обмотки.

Геометричні дані обмоток і магнітної системи наведено у таблиці. Лінійні розміри подані віднесені до величини полюсного поділу.

Параметр	Розмір відносно полюсного поділу
Повний повітряний проміжок між магнітопроводами 4,5 мм	0,104
Товщина шару обмоток 3,5 мм	0,081
Висота ярма внутрішнього Магнітопроводу 1,5 мм	0,035
Висота ярма зовнішнього магнітопроводу 2 мм	0,045
Висота магніту 7 мм	0,162
Кутовий розмір магніту (площина X, Y)	120°
Кутовий розмір обмотки управління (площина X, Z)	70°
Кутовий крок секції обмотки обертання (площина X, Y)	154°
Кутлова ширина активної частини секції обмотки обертання	13°
Співвідношення товщини шарів обмоток управління і обертання	8/3
Коефіцієнт заповнення обмоток міддю	0,34
Матеріал постійного магніту	КС37А
Повітряний проміжок між рухомими і нерухомими частинами 0,5 мм	0,0116

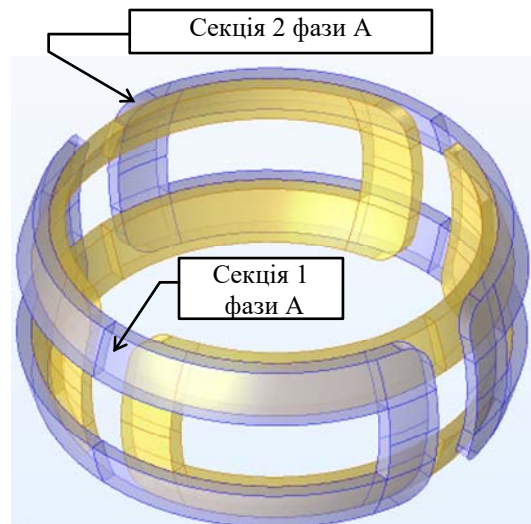


Рис. 3

Трифазну обмотку розташувати у два шари, як це мало місце з двофазною, технологічно набагато складніше. Тому трифазну обмотку вимушено можна виконати дещо «виродженою» і розташованою в один шар, що наведено на рис. 4.

Зважаючи на кутову ширину активної частини секції обмотки (табл.), яку для порівняльного аналізу залишимо такою ж, кутовий крок секції (середній кутовий розмір) складатиме $120^\circ - 13^\circ = 107^\circ$. Секції вважалися укладеними без проміжків між активними частинами (рис. 4).

Для порівняння обраних структур обмоток будемо розглядати усталений синхронний режим обертання ротора за умов живлення обмоток синусоїдальним струмом. Відмітимо, що змінне магнітне поле, яке створюється змінними струмами обмоток, та магнітне поле збудження ротора, що обертається, не викликають появи вихрових струмів в магнітопроводах, оскільки магнітопроводи «обертаються разом з полем». Також припустимо, що обмотки намотуються досить тонким проводом, що

застосовується в більшості випадків, і тому вихровими струмами в дротах можна знехтувати. В результаті попереднього аналізу структур обмоток з урахуванням висунутих припущень визначимо показники та критерії, за якими можна виконати порівняння обраних варіантів:

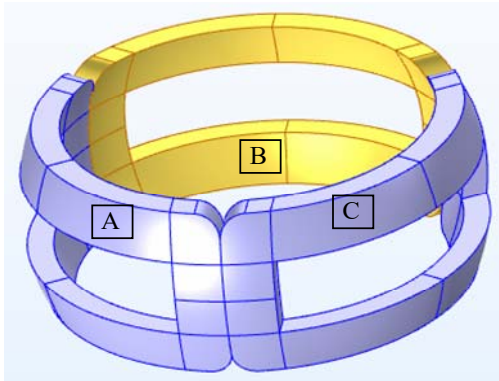


Рис. 4

- а) величина створюваного обертового моменту;
- б) величина впливу обмотки управління на обертовий момент;
- в) величина впливу обмоток обертання на момент, створюваний обмоткою управління;
- г) надійність та технологічність.

Зроблені припущення, обраний режим та критерії порівняння дають змогу використати для дослідження математичну модель магнітостатичного поля, в якій розраховується тривимірне поле векторного магнітного потенціалу \mathbf{A} на основі рівнянь

$$\nabla \frac{1}{\mu(\mathbf{B})} \nabla \mathbf{A} = \mathbf{J}, \quad (1)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \quad (2)$$

де μ – магнітна проникність середовища; \mathbf{B} – вектор магнітної індукції; \mathbf{J} – вектор густини струму, що протікає в обмотках. Як було обґрунтовано раніше, вихровими струмами в електропровідних областях можна знехтувати. Нелінійними в магнітному відношенні вважалися магнітопроводи, а також матеріал магніту, властивості яких задавалися характеристиками намагнічування та розмагнічування відповідно.

Математичне моделювання виконувалося в середовищі пакету «COMSOL Multiphysics» в інтерфейсі «Magnetic fields». Розрахункова область обмежувалася сферою з чотирикратним по відношенню до зовнішнього радіуса ротора радіусом R_{inf} . Для більш точного моделювання розповсюдження магнітного поля на нескінченність перед зовнішньою границею було виділено шар завтовшки $0,1 R_{inf}$, розподілений на три шари з нескінченими елементами, які передбачені в інтерфейсі «Magnetic Fields». На комп'ютері з частотою процесора 4 ГГц розрахунок одного варіанту за умов помірної густоти сітки скінчених елементів складав близько півтори хвилини.

Для обчислення вектору електромагнітної сили \mathbf{f} , що діє на ротор, використовувалася формула Лоренца

$$\mathbf{f}_L = \mathbf{J} \times \mathbf{B}. \quad (3)$$

Оскільки моделювався усталений режим роботи ЕМТР, фазові зсуви синусоїдальних струмів в обмотках задавалися так, щоб забезпечувалася максимальний обертовий момент. Таким чином, якщо в початковий момент часу вісь поля збудження ротора співпадає з віссю фази A , то система струмів фаз i_A, i_B повинна мати таку залежність від кута обертання γ

$$\begin{cases} i_A(\gamma) = I_m \sin \gamma \\ i_B(\gamma) = -I_m \cos \gamma \end{cases}, \quad (4)$$

де I_m – амплітуда струму, що визначається за припустимою відповідно до теплового режиму густиною струму, площиною поперечного перерізу обмотки та коефіцієнтом заповнення об'єму обмоток міддю (табл.).

Обертовий момент M_z (момент відносно осі Z , рис. 2) обчислювався інтегруванням складових сили Лоренца за об'ємом кожної з обмоток за формулою

$$M_z = \int_{V_{wa}} (-f_x \cdot Y + f_y \cdot X) dV + \int_{V_{wb}} (-f_x \cdot Y + f_y \cdot X) dV, \quad (5)$$

де V_{wa}, V_{wb} – об'єми, що займають обмотки фаз A та B відповідно (для випадку двофазної обмотки); f_x, f_y – складові сили Лоренца, до яких є доступ безпосередньо з інтерфейсу «Magnetic Fields». За аналогічною формулою обчислювався обертовий момент для трифазної обмотки, тепер вже шляхом інтегруванням за їхніми об'ємам (рис. 4).

Результати моделювання. На рис. 5 наведено графіки залежності відносного значення моменту обертання M_z від кута обертання γ в діапазоні кута нутації $\beta \sim 0 \dots 30^\circ$: а) для випадку двофазної обмотки та б) -трифазної обмотки за умов відсутності струму в обмотці управління. За базове значення було прийнято середнє за період обертання значення обертового моменту $M_{z2,avg0}$ (рис. 5) для

двофазної обмотки за умов нульового кута нутації. Тут і надалі розрахунок кутових залежностей проводився з кроком $\pi/16$ по куту обертання, а графіки будувалися без процедури згладжування.

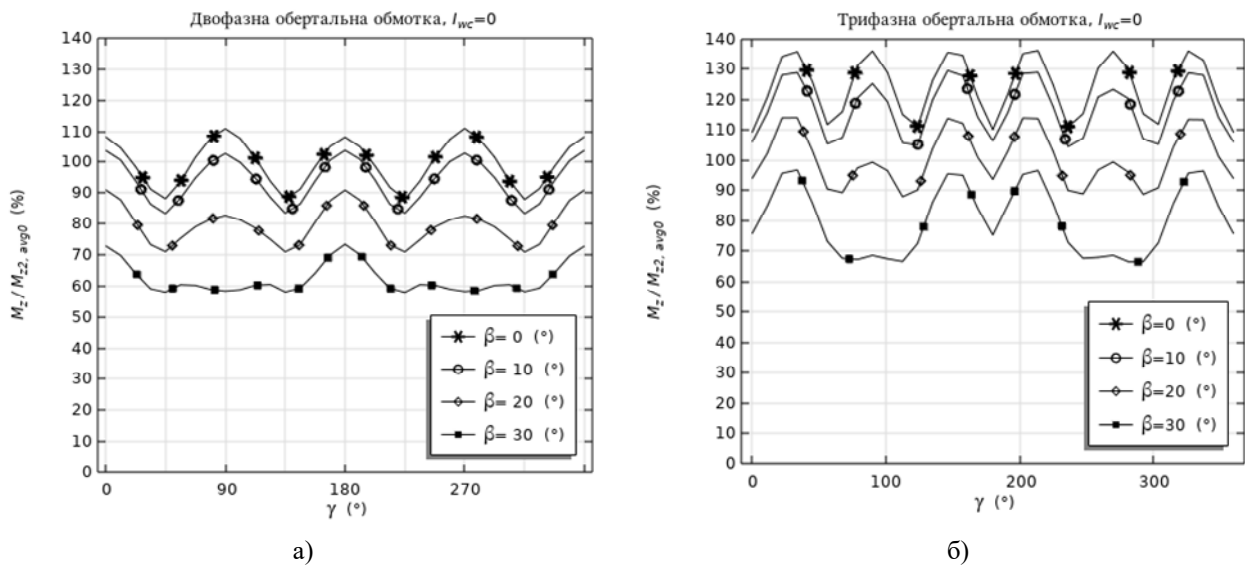


Рис. 5

Ппульсуючий характер моменту в обох випадках викликаний, безперечно, зосередженим виконанням обмоток і особливостями структури магнітної системи. Середня величина моменту для всього діапазону кута нутації β у випадку трифазної обмотки більша на $\sim 20\%$ ніж для двофазної обмотки, що говорить про ефективність першої. Амплітуда пульсацій в обох випадках приблизно однакова. В умовах керованої прецесії в обмотці управління формують синусоїдальний струм I_{wc} тоді, коли необхідно змінити нахил осі обертання ротора.

За умов нульового кута нахилу ротора β внаслідок симетрії магнітної систем поточкозчеплення між обмотками обертання і магнітами ротора має максимальну величину, а похідна від цього значення по куту β дорівнює нулю. Відповідно, складова моменту, що призводить до відхилення вісі обертання ротору, буде відсутня. Під час нахилу ротора під впливом моменту, створюваного обмоткою управління, втрачається вищезгадана симетрія і з'являється горизонтальна складова (в площині (X, Y) , рис. 2) магнітного поля обмотки, а з нею і пульсуючий момент, який збурює момент обервального руху. Це збурення є більш вираженим у випадку трифазної обмотки, що відображено кривими для $\beta > 0$ на рис. 6 у порівнянні з графіками на рис. 5. Зауважимо, що збільшення коливань моменту в розглянутому випадку не призводить до зміни його середнього значення.

Залежності середніх значень обервальных моментів від кута нахилу ротора β , що відповідають залежностям (рис. 5, 6), наведено на рис. 7 (залежність для двофазної обмотки тут не наводиться, оскільки близькість середніх значень моменту на рис. 5, а та рис. 6, а є очевидною). Слід зазначити, що згадане пульсуюче збурення має фазовий зсув, який залежить від фазового зсуву струму обмотки управління. Таке збурення може викликати опосередкований вплив на прецесійний рух. Але більш докладне дослідження впливу управляючого струму на пульсації моменту обертання та, таким чином, опосередковано на прецесійний рух ротора виходить за рамки даного дослідження.

Відповідно до отриманих даних розрахунків констатуємо тільки те, що за умови значення кута нутації близько 30° амплітуда пульсацій моменту обертання трифазної обмотки, який викликано впливом струму обмотки управління, може сягати 40% , що потребує досліджень впливу цих пульсацій на рух ротора. Треба зауважити, що такі великі значення цього кута, по-перше, зустрічаються тільки в екстремальних конструкціях, по-друге, система управління повинна дуже швидко відпрацювати на мінімізацію цього кута, по-третє, під час розгону ротора до номінальної швидкості обертання обмотка управління не працює, а оскільки номінальна швидкість за звичай досить велика, вилив обмотки управління нівелюється значним кінетичним моментом.

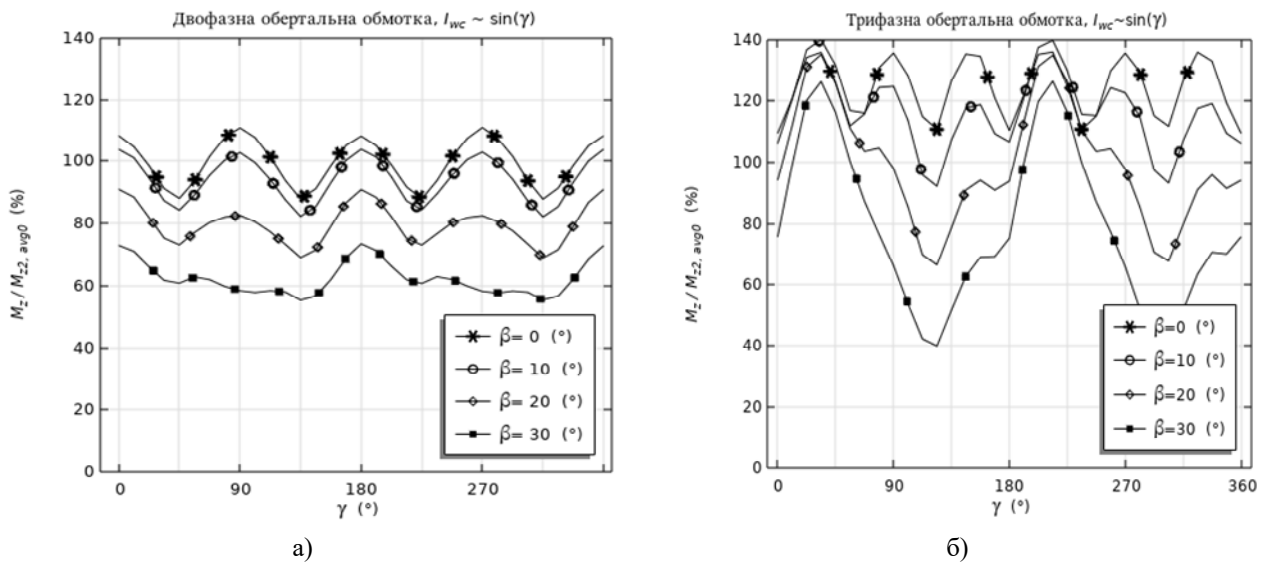


Рис. 6

Вище було відмічено можливість виконання двофазної обмотки (рис. 3) без проміжків між секціями з кутовим розміром 167° (по середній лінії) і відзначалось, що різниця між першими гармоніками МРС такої обмотки і обмотки з кутовим розміром 154° складає не більше двох відсотків. Розрахунок моменту обертання такої обмотки теж наведено на рис. 7 у вигляді точок, які практично співпадають для обох виконань двофазних обмоток.

Поряд з аналізом обервальних можливостей обох розглянутих схем обмоток для ЕМТР існує проблема безпосереднього впливу обервальних обмоток на прецесійний момент обмотки управління, який теж з'являється за умов нахилу ротора. Відомо, що небажаний момент будь якої природи, що діє на триступеневий ротор, викликає прецесію, яка має бути мінімізованою та компенсованою за допомогою системи управління для досягнення заданої точності орієнтації робочого органу. Оскільки за нульового кута β магнітна система є симетричною відносно горизонтальної площини, проведеної через центр мас (площина (X, Y) , рис. 2), моменти, що створюються лобовими частинами (горизонтальні

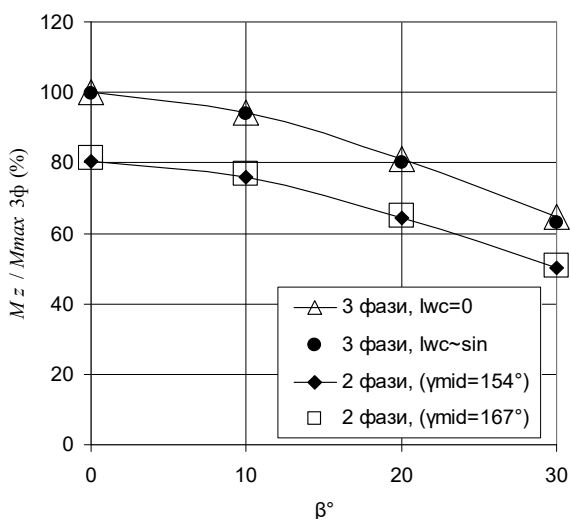


Рис. 7

частини секцій обмотки на рис. 3, рис. 4) врівноважуються за будь-яких значень кута обертання. За умов нахилу ротора відносно статора згадана симетрія не дотримується, що викликає момент збурення з боку обмоток обертання. На рис. 8 наведено залежності складових відхиляючого моменту від кута обертання γ в обервальній системі координат (d, q) , пов'язаній з ротором за умов нульової фази струму управління і величини кута нахилу $\beta - 15^\circ$. З огляду на наведені графіки можна відзначити, що середні значення складових моменту збурення приблизно однакові, але амплітудне значення збурення в разі двофазної обмотки незначно (на $\approx 1\%$) перевищує таке для трифазної обмотки. До того ж складові моменти збурення для двофазної обмотки мають дещо більш круті ділянки зростання, що може бути трактовано як наявність більшої частки вищих гармонічних складових у зусиллях, що діють на ротор. Зміна фази струму управління з метою зміни напрямку прецесійного руху, очевидно, призведе до «перерозподілу амплітуд» між складовими моменту M_d та M_q без суттєвої зміни у середніх та амплітудних співвідношеннях. Додамо також, що для інших значень кута нахилу ротора β залежності, подібні наведеним на рис. 8, тут не наводяться. Ці залежності можуть бути предметом окремого дослідження.

Наприкінці необхідно розглянути ще одну важливу особливість, на яку впливає вибір числа фаз обмотки обертяння ЕМТР. В першу чергу мова йде про особливості побудови структури системи формування змінних напруг, що подаються на обмотку обертяння ЕМТР. У випадках реалізації структури з дво- або трифазними обмотками обертяння ЕМТР, паралельно до силових обмоток намотуються також відповідні сигнальні обмотки, вихідні напруги яких використовуються як вхідні сигнали системи формування дво- або трифазної системи змінних керуючих напруг. Оскільки дво- та трифазні обмотки мають загальну точку, то в обох випадках приєднання силових та сигнальних обмоток до схеми керування відбувається за допомогою трьох проводів. Різниця

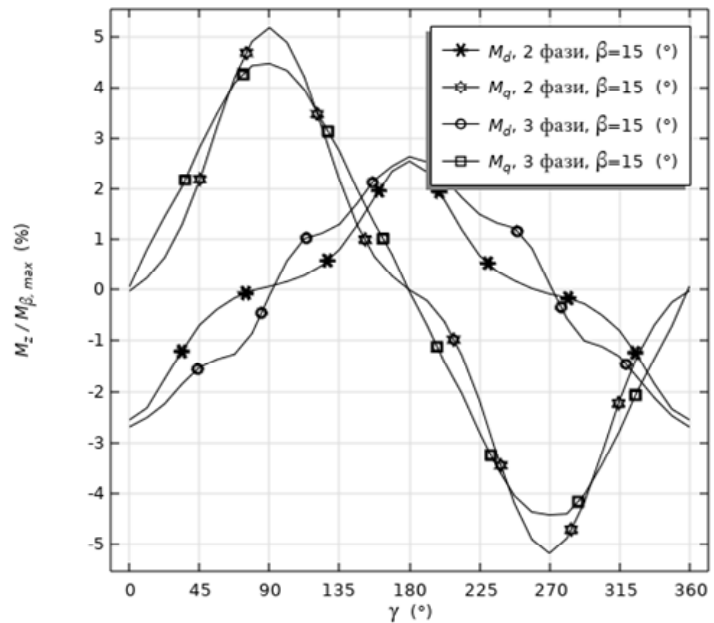


Рис. 8

полягає у тому, що для формування дво- або трифазної системи змінних напруг необхідна реалізація інвертора напруги, який містить більшу або меншу кількість силових транзисторів. Важливою умовою формування змінних керуючих напруг є підтримання нульового фазового зсуву між змінними струмами та ЕРС силових обмоток. На початку пуску ротора, коли сигнали, відповідні ЕРС, дорівнюють нулю, застосовуються способи синхронного пуску або формування спеціальних пускових імпульсів. Можна також зазначити, що використання дво- або трифазної системи сигналів для визначення положення ротора не відіграє суттєвого значення під час реалізації системи управління.

Висновки. Порівняння двофазної двошарової обмотки обертяння ЕМТР, кожна фаза якої виконана з двох симетрично розташованих секцій, та трифазної одношарової обмотки, кожна фаза якої має лише одну секцію, дає змогу відзначити такі переваги та особливості обмотки обертяння трифазного виконання:

- обмотка створює обертальний момент, що більш ніж на 20% перевищує момент двофазної обмотки;
- вплив її струмів на момент обмотки управління дещо менший і за амплітудою, і за складом вищих гармонік;
- технологічність виготовлення краща і, як наслідок, надійність вища.

Разом з тим, трифазне виконання обмотки обертяння за умов ненульового кута нутації призводить до більшої, у порівнянні з двофазним виконанням, амплітуди коливання обертального моменту, що викликано впливом магнітного поля обмотки управління.

Розбіжності у реалізації систем управління ЕМТР з дво- або трифазними обмотками обертяння не є суттєвим фактором у розробці загальної структури такого спеціалізованого приводу. Пріоритетними та вирішальними мають бути фактори технологічності виготовлення електромеханічної частини приводу та досягнення високих показників ефективності електричної машини, які було розглянуто у статті.

В цілому можна констатувати, що трифазна одношарова обмотка може забезпечити суттєво більший обертальний момент ніж двофазна двошарова і дає змогу за умови заданого активного об'єму забезпечити кращі динамічні властивості ЕМТР.

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. Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2011. 216 с.

2. Милых А.Н., Барабанов В.А., Двойных В.В. Трехстепенные электрические машины. Киев: Наукова думка, 1979. 308 с.
3. Милых А.Н., Барабанов В.А., Лавриненко В.А., Киреев В.Г. Уравнения трехстепенных электрических машин с постоянными магнитами *Техническая электродинамика*. 1981. № 2. С. 65-70.
4. Соловьев А.Э., Теплова В.А. Особенности движения трехстепенной электрической машины с радиально намагниченным ротором и дополнительными статорными обмотками. *Известия ТулГУ. Технические науки. Электротехника*. 2016. Вып.7. Ч. 1. С. 175-183.
5. 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*. 2018. Pp. 7-13. DOI: <https://doi.org/10.1109/PEAC.2018.8590483>.
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. 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>.

INFLUENCE OF THE NUMBER OF ROTATION WINDING PHASES ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF ELECTRIC MACHINE WITH THREE DEGREES OF FREEDOM ROTOR

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

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

E-mail: petuhov@ied.org.ua.

The structure of an electric machine with a rotor, which has three degrees of freedom of rotation (EMTR) and consists of external and internal magnetic circuits, is considered. Between them, in the air gap of a spherical configuration, there is an m-phase rotation winding and a control winding. The excitation of the magnetic field in the EMTR is carried out by means of permanent magnets located on the external magnetic circuit. The scope of application of EMTR in systems of stabilization, observation, tracking, where the rotor performs the function of a gyro-stabilizing element, is outlined. Taking into account the structure of the considered EMTR, the absence of eddy currents in the design and the suitability of the mathematical model of the static magnetic field are substantiated. The calculation of the torque of the EMTR with two- and three-phase rotational windings at different angles of rotor's inclination relative to the stator axis has been performed. It is shown that the rotation torque of the three-phase winding is 20% higher than that of the two-phase winding. A significant influence of the control winding on the torque of the three-phase winding and approximately the same influence of the two- and three-phase rotation windings on the processional torque with a significant value of the rotor inclination angle are noted. References 7, figures 8, tables 1.

Key words: three-stage electric machine, gyro-stabilized rotor, precession, three-phase winding, two-phase winding.

1. Antonov A.E. Electric machines of magnetoelectric type. Kyiv: Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, 2011. 216 p. (Rus)
2. Milyakh A.N., Barabanov V.A., Lavrinenko V.A., Kireev V.G. Equations of three-degree-of-freedom permanent magnet electric machines *Tekhnichna elektrodynamika*. 1981. No 2. Pp. 65-70. (Rus)
3. Antonov A.E. Two-coordinate electric machines for tracking systems. Kyiv: Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, 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. 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*. 2018. Pp. 7-13. DOI: <https://doi.org/10.1109/PEAC.2018.8590483>.
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. 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>.

Надійшла 17.10.2022
Остаточний варіант 30.01.2023