

В.В. Римша, І.М. Радимов, М.В. Гулий, І.П.Бабич, О.А. Калиниченко, М.П. Деменко

Моделювання та дослідження магнітоелектричного перетворювача для гідро- та пневмоприводів

Наведено результати моделювання та практичної реалізації магнітоелектричного перетворювача для гідро- та пневмоприводів аерокосмічної галузі. На основі серії проектних розрахунків при різноманітній конфігурації магнітної системи перетворювача обрано варіант з чотирма зубцями на полюсі статору і отримані його основні характеристики. Результати розрахунків зіставлені з результатами експерименту на макетному зразку магнітоелектричного перетворювача. Бібл. 9, табл. 3, рис. 14.

Ключові слова: магнітоелектричний перетворювач, тривимірне магнітне поле, механічна характеристика, макетний зразок.

Вступ. У сучасних системах керування літальними апаратами, системах наведення та супроводу широке застосування знайшли гідро- та пневмоприводи, складовим елементом яких є безконтактний магнітоелектричний перетворювач (МЕП) [1-3]. МЕП призначений для перетворення вхідного електричного сигналу (струму), що подається на обмотку керування, в пропорційне кутове переміщення вихідного валу.

Першою та на даний час єдиною теоретичною роботою, яка присвячена розробці МЕП, в Україні є робота [4]. Щодо розробок подібних пристроїв за кордоном, то у відкритих джерелах будь-яка інформація відсутня або недоступна.

Наразі МЕП для авіаційної та космічної техніки в Україні не випускаються. У зв'язку з цим актуальною є розробка та освоєння виробництва вітчизняних МЕП. Ця мета вирішується в рамках науково-технічної співпраці між ДП «КБ «Південне» (м. Дніпро) та ТОВ «Електротехніка – Нові технології» (м. Одеса).

За конструкцією магнітної системи МЕП можуть виконуватися з електромагнітним збудженням та збудженням від постійних магнітів. Найбільше поширення отримали МЕП типу МП-220Б з постійними магнітами марки ЮНДК. В основу конструкції даного МЕП покладено принцип зведеного поляризованого реле (рис. 1) [5].

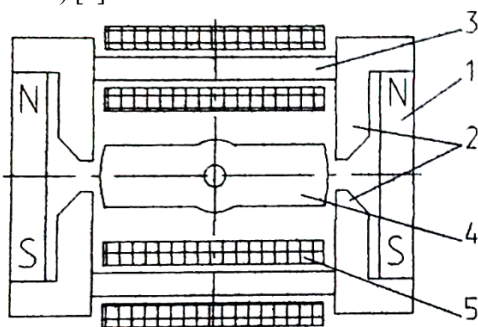


Рис. 1. МЕП типу МП-220Б: 1 – постійний магніт; 2 – полюсні наконечники; 3 – осердя; 4 – яркі; 5 – обмотка керування

Конструкція даного типу забезпечує стійке нейтральне положення, а також виникнення моменту, пропорційного величині кутового відхилення від нейтрального положення та спрямованого у бік, протилежний цьому відхиленню (ефект магнітної пружини).

Водночас МЕП в подібному виконанні мають ряд недоліків, пов'язаних з конструктивною та технологічною важкістю їх виготовлення [4].

Вплив вищевказаних недоліків можливо усунути шляхом зміни топології магнітного кола МЕП з прямокутного виду на концентричний зі збереженням принципу взаємодії магнітних потоків збудження та керування [4].

Для вирішення даної задачі пропонується виконувати магнітну систему МЕП подібно магнітній системі гібридного крокового двигуна [4, 6, 7]. Таке виконання магнітної системи МЕП, у порівнянні з магнітною системою МП-220Б, характеризується значно кращим використанням об'єму активного простору, питомими масо-габаритними показниками та адаптивністю до використання рідкоземельних магнітів [4]. Вперше дослідження МЕП з такою топологічною структурою магнітної системи здійснено в [4] на базі магнітних заступних схем з наступним визначенням магнітних провідностей методом імовірних шляхів магнітного потоку у модифікації Р. Поля. Не ставлячи під сумнів отримані в [4] результати все ж треба відмітити, що метод імовірних шляхів магнітного потоку має невисоку точність та обмеженість у використанні [8]. Враховуючи те, що в конструкції МЕП, яка побудована подібно магнітній системі гібридного крокового двигуна, складний шлях замикання магнітного потоку в об'ємі активної частини, в даному випадку є необхідним вирішення задачі розрахунку магнітного поля у тривимірній постановці одним з сучасних чисельних методів.

Метою статті є розробка тривимірних математичних моделей та аналіз характеристик магнітоелектричного перетворювача, магнітна система якого виконана подібно магнітній системі гібридного крокового двигуна.

Основні технічні вимоги до електромеханічних параметрів МЕП.

1. МЕП повинен забезпечити лінійність та необхідну жорсткість механічних характеристик при різних струмах в обмотці керування. Механічною характеристикою є залежність моменту M , створюваного МЕП, від кута повороту його валу θ , тобто $M = f(\theta)$.

2. МЕП повинен забезпечити лінійність та необхідну жорсткість механічної характеристики $M = f(\theta)$ при струмі керування у його обмотках рівному нулю (характеристика магнітної пружини). Нахил цієї механічної характеристики визначає жорсткість магнітної пружини, яка повинна бути не менше 0,0106 Нм/град.

3. При номінальному струмі керування $I = 50$ мА та нульовому положенні валу момент на валу МЕП повинен становити не менше 0,0624 Нм, а при навантаженні

зовнішньою пружиною з жорсткістю $0,0236 \text{ Нм/град}$ та кути повороту валу 1.5° , момент повинен становити не менше $0,0354 \text{ Нм}$.

Опис та принцип дії обраної конструкції МЕП.

За аналогією з гібридним кроковим двигуном магнітна система розробленого МЕП складається з зубчастих статора та ротора (рис. 2). Статор 1 виконаний у вигляді явнопольсної структури з котушками 4 на зубчастих полюсах. Ротор 2 розділений на дві частини, між якими розташований циліндричний постійний магніт, намагнічений в осьовому напрямку. Верхня та нижня частини ротора 2 зміщені відносно один одного на 90° та мають зубцеві зони з проміжками, що відрізняє їх від зубцевих зон крокового двигуна, які виконуються без проміжків. Для виключення магнітного гістерезису магнітопровід МЕП виготовляється з пермалою марки 50 Н.

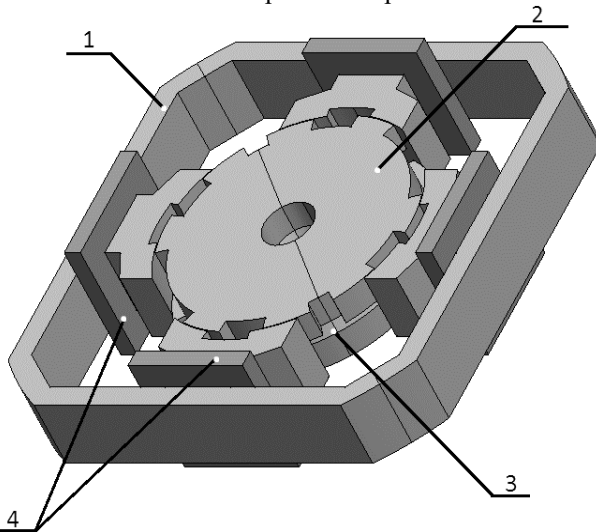


Рис. 2. Активна частина МЕП: 1 – статор; 2 – ротор; 3 – постійний магніт; 4 – обмотка

Принцип дії МЕП, що розглядається, полягає в наступному. За відсутності струму в обмотці збудження намагнічений ротор займає нульове положення, за якого напроти зубця статора симетрично розташовується половина верхнього та нижнього зубців ротора.

При відхиленні ротора від нульового положення змінюється площа перекриття між зубцями статора і зубцями верхньої та нижньої частини ротора (наприклад, зверху зменшується, знизу збільшується в залежності від напрямку повороту ротора) і відбувається зміна магнітного потоку у відповідних повітряних зазорах. При цьому виникають сили магнітного тяжіння, що прагнуть повернути ротор у стійке нульове положення. Таким чином, магнітна система МЕП має властивості механічної пружини.

При протіканні струму в обмотці управління створюється магніторухлима сила, яка призводить до зміни розподілу магнітного потоку в повітряному зазорі між статором і половинками ротора. Як наслідок, виникають електромагнітні сили і момент, що прагнуть відхилити ротор від центрального положення.

Конструкцію МЕП такого типу можна виповнити з різним числом зубців і полюсів на статорі та роторі. Наприклад, конструкція з двома зубцями на полюсі статора зображена на рис. 2, а з трьома та чотирма зубцями – відповідно на рис. 3 та рис. 4.

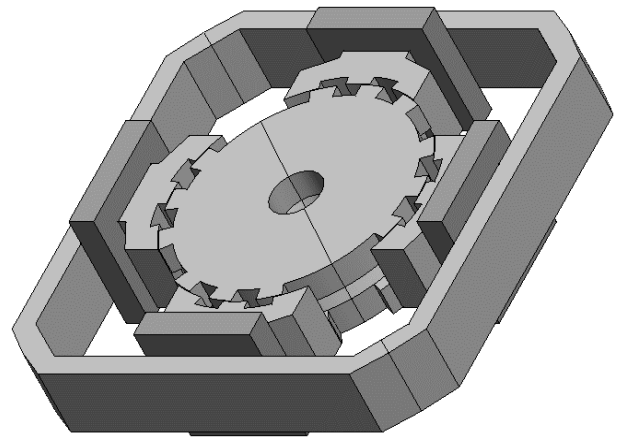


Рис. 3. Активна частина МЕП з трьома зубцями на полюсі статору

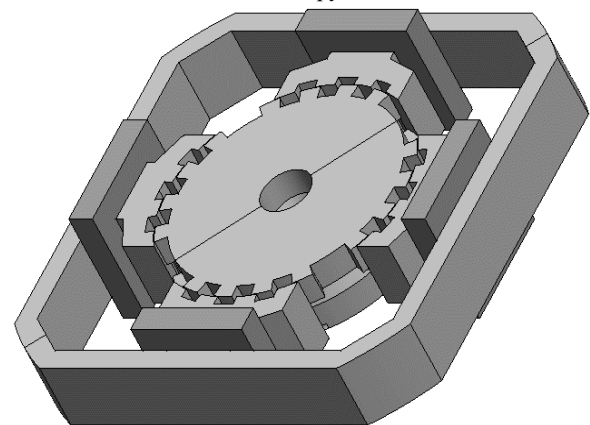


Рис. 4. Активна частина МЕП з чотирма зубцями на полюсі статору

Для вибору конструктивного виконання активної частини МЕП, представлених на рис. 2 – рис. 4, та розрахунку характеристик обраної конструкції необхідно провести моделювання магнітного поля для кожного з варіантів активної частини МЕП.

Польові моделі МЕП та результати проектних розрахунків. Розрахунки тривимірного магнітного поля були проведені методом скінчених елементів для чотирьох варіантів чотирипольсної активної частини МЕП з двома, трьома, чотирма та п'ятьма зубцями на полюсі статору. У всіх варіантах розрахунку число елементів скінчено-елементної сітки 3D моделі становило в середньому 240.000 . При такій кількості елементів сітки досягається достатньо детальна апроксимація геометрії МЕП.

Як приклад, на рис. 5 представлена польова тривимірною математичною моделлю МЕП з трьома зубцями на полюсі, що розроблена в ліцензійній програмі JMAG-Designer [9], а на рис. 6 – результати розрахунку магнітного поля у вигляді магнітних силових ліній.

На основі результатів серії розрахунків магнітного поля розглянутих чотирипольосних варіантів було отримано сімейство характеристик магнітних пружин та механічних характеристик МЕП. Аналіз отриманих характеристик показав наступне:

- зі збільшенням числа зубців зростає жорсткість магнітної пружини;
- момент при номінальному струмі та нульовому положенні ротора практично не залежить від кількості зубців на полюсі статору;

- нахил механічних характеристик збільшується зі зростанням числа зубців на полюсі статора.

Результати розрахунків зведені у табл. 1.

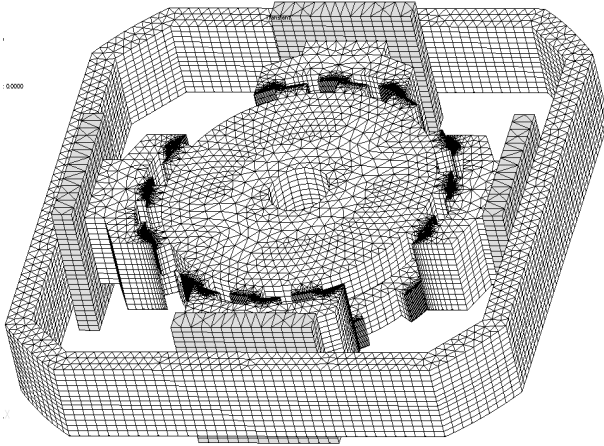


Рис. 5. Тривимірна скінчено-елементна модель активної частини МЕР з трьома зубцями на полюсі статора

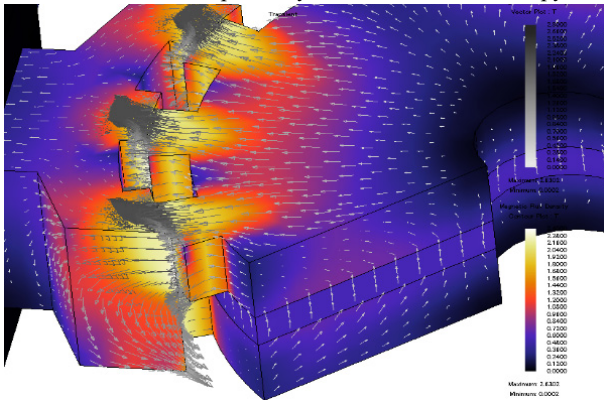


Рис. 6. Силві лінії магнітного поля в активній частині МЕР з трьома зубцями на полюсі статора

Таблиця 1

Результати розрахунків МЕР

Кількість зубців на полюсі статора	Жорсткість магнітної пружини, Нм/град.	Момент при нульовому положенні ротора, Нм
2	0,00059	0,055
3	0,0063	0,0617
4	0,0117	0,067
5	0,0183	0,0676

З даних табл. 1 видно, що варіант активної частини МЕР з чотирма зубцями на полюсі статора та високоерцитивним постійним магнітом марки NdFeV повністю задовольняє основним технічним вимогам до електромеханічних параметрів МЕР, а його виготовлення є більш технологічним, ніж виготовлення активної частини МЕР з п'ятьма зубцями на полюсі статора.

Конструктивне виконання пропонуваного МЕР зображено на рис. 7. Основні геометричні розміри та матеріали активної частини обраного варіанту МЕР наведені в табл. 2.

Враховуючи симетрію конструктивного виконання активної частини МЕР при вирішенні тривимірної польової задачі прийняті граничні умови періодичності зміни векторного магнітного потенціалу, що дозволило обмежити область розрахунку половиною 3D моделі МЕР та знизити час аналізу магнітного поля.

Таблиця 2

Геометричні розміри та матеріали активної частини МЕР

Найменування	Значення
Габаритні розміри активної частини, мм	46×46×14
Внутрішній діаметр статора, мм	24
Довжина активної частини, мм	14
Повітряний проміжок, мм	0,1
Товщина магніту, мм	2
Матеріал магнітопроводу статора та ротора	Пермалой 50Н
Матеріал постійного магніту	N38EH
Магнітуруюча сила котушки, А	20
Робочий діапазон кутів повороту ротора, мех. град	±2
Число витків котушки	200

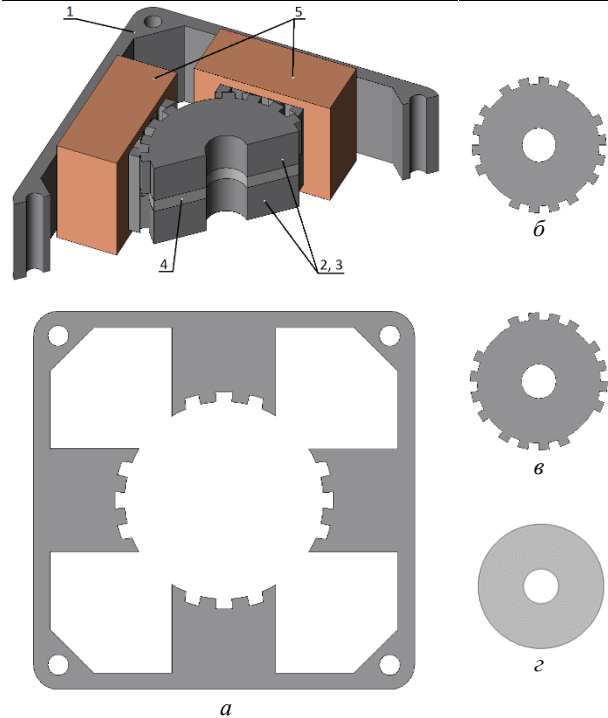


Рис. 7. Конструктивні елементи активної частини МЕР: а – загальний вигляд (1 – магнітопровід статора, 2, 3 – магнітопроводи частин ротора, 4 – постійний магніт, 5 – котушки обмотки керування) та переріз магнітопроводу статора; б, в – переріз частин магнітопроводу ротора; з – переріз постійного магніту

На рис. 8 зображено тривимірну скінчено-елементну модель МЕР з чотирма зубцями на полюсі статора, а на рис. 9 – розподіл магнітного поля у його активній частині.

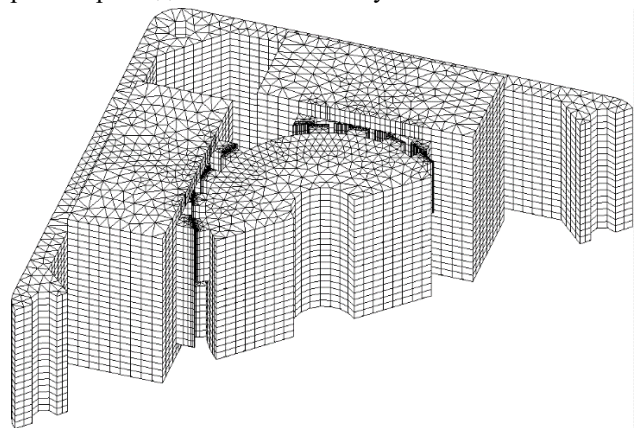


Рис. 8. Тривимірна скінчено-елементна модель активної частини МЕР з чотирма зубцями на полюсі статора

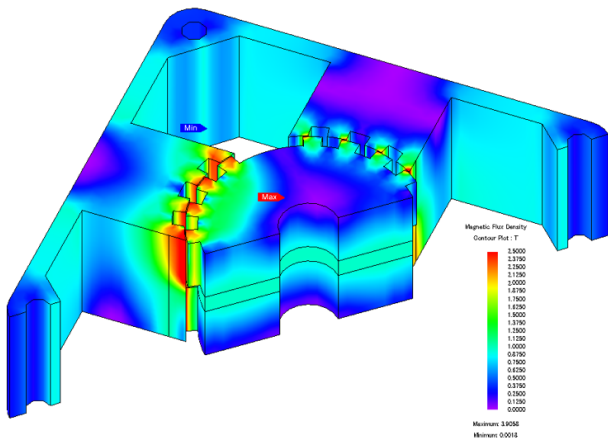


Рис. 9. Розподіл магнітної індукції в активній частині МЕП з чотирма зубцями на полюсі статора

В результаті серії розрахунків магнітного поля було отримано сімейство механічних характеристик МЕП (рис. 10).

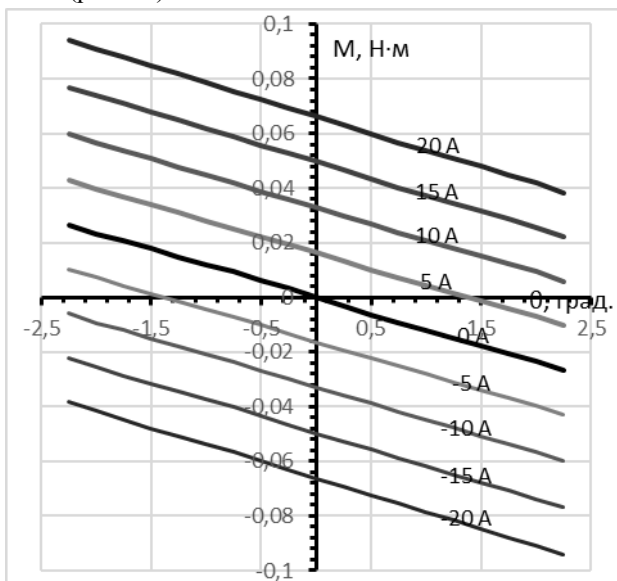


Рис. 10. Механічні характеристики МЕП з чотирма зубцями на полюсі статора

Розрахунок механічних характеристик проводився при зміні МРС котушок обмотки керування від 0 до 20 А. При цьому МРС котушки 20 А відповідає номінальному струму керування МЕП у 50 мА.

З рис. 10 видно, що механічні характеристики МЕП є лінійними. При номінальному струмі керування 50 мА та валу, загальмованому у нульовому положенні, момент, який розвиває МЕП, складає 0,067 Нм, що відповідає вимогам (не менше 0,0624 Нм). При повороті ротора на 1,5° момент МЕП дорівнює 0,0476 Нм, що також відповідає вимогам (не менше 0,0354 Нм). Жорсткість магнітної пружини складає 0,0117 Нм/град. (0,668 Нм/рад) та відповідає заданим вимогам (не менше 0,0106 Нм/град.).

Також виконано розрахунок характеристик обраної конструкції активної частини МЕП з чотирма зубцями на статорі з використанням замість постійного магніту марки NdFeB постійного магніту марки SmCo, що має більш високу температурну межу роботи, але дещо гірші магнітні та енергетичні характеристики. На рис. 11 зображені механічні характеристики

варіантів МЕП, що порівнюються. З наведених даних видно, що МЕП з постійним магнітом марки SmCo має меншу жорсткість магнітної пружини та менший момент при нульовому положенні ротора і номінальному струмі керування 50 мА.

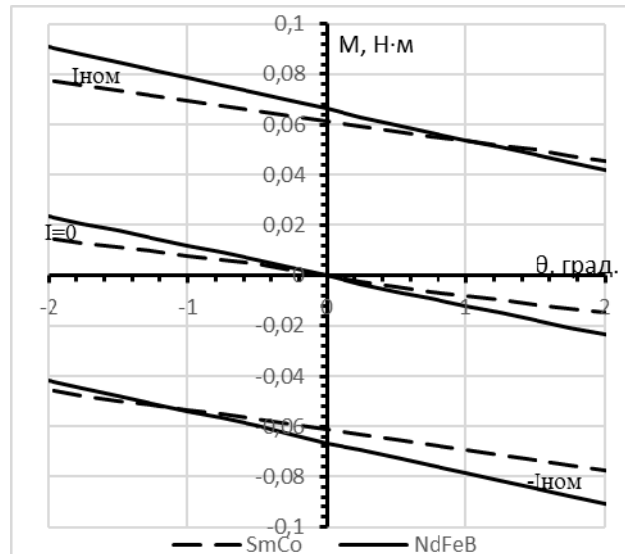


Рис. 11. Механічні характеристики МЕП з чотирма зубцями на полюсі статора з магнітами марки SmCo та NdFeB

Також проведено зіставлення розрахункових характеристик запропонованого МЕП з характеристиками прототипу МП-220Б (рис. 12).

Видно, що зіставлені характеристики близькі одна до одної. Проте, якщо для керування МП-220Б у номінальному режимі потрібна сумарна магніторухійна сила 300 А, то для пропонованого у цій статті МЕП усього 80 А, тобто енергоспоживання МЕП, що розробляється, суттєво менше, ніж в прототипу.

Таким чином, на основі аналізу результатів отриманих розрахунків, прийнято конструктивне виконання активної частини МЕП у вигляді чотириполюсної магнітної системи з чотирма зубцями на полюсі статора, основними геометричними розмірами та матеріалами, наведеними в табл. 2.

Макетування МЕП. З метою підтвердження працездатності та можливості реалізації основних технічних характеристик було виготовлено макетний зразок МЕП, зовнішній вигляд якого зображено на рис. 13.

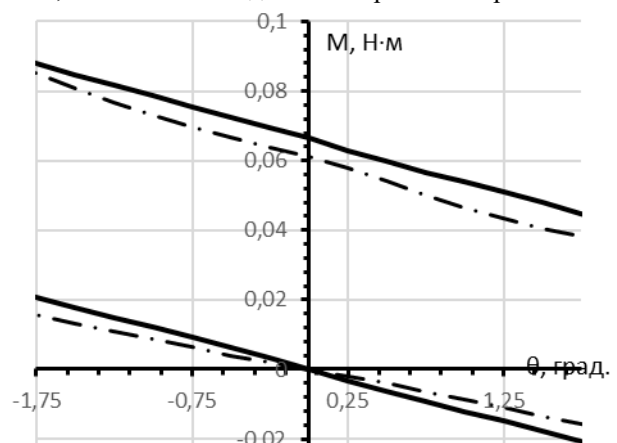


Рис. 12. Порівняння розрахункових механічних характеристик пропонованого МЕП (—) з чотирма зубцями на полюсі статора та МЕП МП-220Б (- - -)

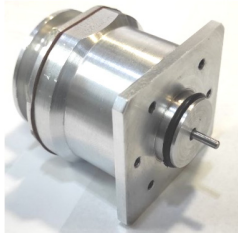
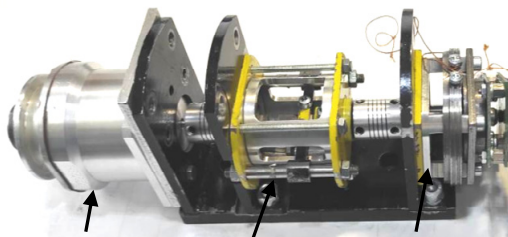


Рис. 13. Зовнішній вигляд макетного зразку МЕП

При макетуванні МЕП оцінювались наступні показники:

1. Жорсткість магнітної пружини.
2. Момент при нульовому положенні ротора.
3. Кут повороту ротора при моменті навантаження 0,0354 Нм.

Для оцінки вказаних вище показників МЕП було розроблено випробувальний стенд (рис. 14).



МЕП Навантажувальна пружина Енкодер

Рис. 14. Стенд для випробувань МЕП

Стенд складається з двох вузлів, механічно зв'язаних з валом МЕП: навантажувальної пружини та енкодера. Навантажувальна пружина призначена для створення навантаження на вал МЕП у функції його кута повороту. Магнітний енкодер, реалізований на датчику АЕАТ-6600, призначений для вимірювання кута повороту валу МЕП. Роздільна здатність енкодера складає 16 біт, що дозволяє визначати положення валу з точністю до 1 кутової хвилини.

Результати випробувань макетного зразка МЕП наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Результати випробувань МЕП

	Жорсткість магнітної пружини, Нм/град.	Момент при нульовому положенні ротора, Нм	Кут повороту ротора при моменті навантаження 0,0354 Нм, град
Макет МЕП	0,0115	0,064	1,7
Технічні вимоги	не менше 0,0106	не менше 0,0624	1,5

Висновки.

1. Показана можливість створення МЕП з необхідними технічними характеристиками та параметрами. На основі проектних розрахунків, проведених на базі моделювання магнітного поля в тривимірній постановці, обґрунтовано конструктивне виконання активної частини МЕП у вигляді чотириполюсної магнітної системи з чотирма зубцями на полюсі статора.

2. Механічні характеристики розробленого МЕП є лінійними у заданому діапазоні зміни кута повороту ротора. При номінальному струмі керування 50 мА та валі, загальмованому в нульовому положенні, розрахунковий момент, що розвивається спроектованим МЕП,

складає 0,064 Нм, що задовольняє технічним вимогам (не менше 0,0624 Нм). Жорсткість магнітної пружини складає 0,0115 Нм/град. та відповідає величині, зазначеній в технічних вимогах (не менше 0,0106 Нм/град).

3. Випробування макетного зразку МЕП підтвердили принципovu працездатність прийнятих проектних та конструктивних рішень.

Конфлікт інтересів. Автори статті заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Решетников Е.М., Саблин Ю.А., Григорьев В.Е. *Электромеханические преобразователи гидравлических и газовых приводов*. М.: Машиностроение, 1982. 144 с.
2. Канюк Г.И., Шуванов А.Н., Близниченко Е.Н. Гидравлические исполнительные механизмы для быстродействующих прецизионных электронно-гидравлических следящих систем (ЭГСС). *Электротехника і електромеханіка*, 2005, № 1, С. 44-46.
3. Карнаухов Н.Ф. *Электромеханические и мехатронные системы*. Ростов н/Д: Феникс, 2006. 320 с.
4. Харчишин Б.М. *Розроблення та дослідження нових конструкцій електромеханічних перетворювачів для пневмо-гідродісилювачів*. Автореф. дис. к.т.н.: 05.09.01 «Електричні машини і апарати». НУ «Львівська політехніка», Львів, 2003. 19 с.
5. Толмачев В.А., Демидова Г.Л. Математические модели и динамические характеристики электромеханических преобразователей с ограниченным углом поворота. *Изв. ВУЗов. Приборостроение*, 2008, т. 51, № 6, С. 18-23.
6. Столов Л.И., Афанасьев А.Ю. *Моментные двигатели постоянного тока*. М.: Энергоатомиздат, 1989. 223 с.
7. Емельянов А.В., Шилин А.Н. *Шаговые двигатели: учеб. пособие*. Волгоград, ВолГГТУ, 2005. 48 с.
8. Буль О.Б. *Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM: Учеб. пособие*. М.: Академия, 2005. 336 с.
9. *JMAG-Designer*. Available at: <https://www.jmag-international.com/products/jmag-designer> (accessed 10.01.2023).

REFERENCES

1. Reshetnikov E.M., Sablin Yu.A., Grigoriev V.E. *Electromechanical converters of hydraulic and gas drives*. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1982. 144 p. (Rus).
2. Kanuk G.I., Shuvanov A.N., Bliznichenko L.N. Hydraulic executive mechanisms for highspeed precision electronic hydraulic servomechanisms (EHSM). *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2005, no. 1, pp. 44-46. (Rus).
3. Karnaukhov N.F. *Electromechanical and mechatronic systems*. Rostov-on-Don, Phoenix Publ., 2006. 320 p. (Rus).
4. Kharchishyn B.M. *Designing and researching of new type of electromechanical converters for pneumatic and hydraulic amplifiers*. PhD Thesis, Lviv Polytechnic National University, 2003. 19 p. (Ukr).
5. Tolmachev V.A., Demidova G.L. Mathematical models and dynamic characteristics of electromechanical converters with a limited angle of rotation. *Journal of Instrument Engineering*, 2008, vol. 51, no. 6, pp. 18-23. (Rus).
6. Stolor L.I., Afanasiev A.Y. *DC torque motors*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 223 p. (Rus).
7. Emelyanov A.V., Shilin A.N. *Stepper motors. Textbook*. Volgograd, VolgGTU Publ., 2005. 48 p. (Rus).
8. Bul O.B. *Methods for calculating the magnetic systems of electrical devices. Magnetic circuits, fields and the FEMM program*. Moscow, Academy Publ., 2005. 336 p. (Rus).
9. *JMAG-Designer*. Available at: <https://www.jmag-international.com/products/jmag-designer> (accessed 10.01.2023).

Надійшла (Received) 07.03.2023
 Прийнята (Accepted) 13.05.2023
 Опублікована (Published) 02.11.2023

Римша Віталій Вікторович¹, д.т.н., проф.,
Радимов Ігор Миколайович¹, к.т.н., доц.,
Гулий Михайло Вікторович¹, к.т.н.,
Бабич Ігор Петрович²,

Калиниченко Олександр Андрійович²,
Деменко Микола Прокопович²,

¹ ТОВ «Електротехніка – Нові технології»,
65005, Одеса, вул. Мельницька, 26/2,
e-mail: rimsha61@gmail.com (Corresponding Author);
igor.radimov@gmail.com;

mv.skbs@gmail.com; office@ukrainemotors.com.ua
² ДП «КБ «Південне»,
49008, Дніпро, вул. Криворізька, 3,
e-mail: igorbabich@hotmail.com; alex_kalinichenko@i.ua
info@yuzhnoe.com

V.V. Rymsha¹, I.N. Radimov¹, M.V. Gulyy¹, I.P. Babych²,
A.A. Kalinichenko², N.P. Demenko²

¹ Ltd. «Electrical Engineering – New Technology», Ukraine,
26/2, Melnytska Str., Odesa, 65005, Ukraine.

² State Design Office «Pivdenne»,
3, Kryvorizka Str., Dnipro, 49008, Ukraine.

How to cite this article:

Rymsha V.V., Radimov I.N., Gulyy M.V., Babych I.P., Kalinichenko A.A., Demenko N.P. Modeling and research of a magneto-electric converter for hydro and pneumo actuators. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 6, pp. 21-26. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.6.04>

Modeling and research of a magnetolectric converter for hydro and pneumo actuators.

Purpose. Presentation of the results of modeling and practical implementation of a magnetolectric converter for hydraulics and pneumatics systems of the aerospace industry. **Methodology.** Calculations of three-dimensional magnetic fields are carried out with the Finite Element Method by JMAG program. The solution of the differential equations connecting the input voltage, current, magnetic flux and torque is performed by numerical integration.

Results. As a result of calculations, the converter configuration was obtained. Tests of the prototype model of the converter confirmed the principle workability of the adopted design and design solutions in its development. **Practical value.** Tests of the converter prototype sample confirmed the fundamental performance of the adopted design and constructive solutions. References 9, tables 3, figures 14.

Key words: magnetolectric converter, three-dimensional magnetic field, mechanical characteristic, prototype sample.