

М.А. КОВАЛЕНКО, М.О. РЕУЦЬКИЙ, І.Я. КОВАЛЕНКО, Є.О. ТІТОВ, О.О. БАЗАРОВ

ЛІНЕАРИЗОВАНА ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ МАГНІТНОЇ ПЕРЕДАЧІ

Робота присвячена розробці лінеаризованої чисельної математичної моделі безконтактного електромеханічного перетворювача енергії із постійними магнітами – магнітної передачі. Магнітні передачі мають певні конструктивні переваги порівняно із механічними передачами, а саме: висока надійність, ефективність, менші втрати, безконтактна передача механічної потужності, відсутність витрат на технічне обслуговування, простота конструкції. Особливо актуальним є використання магнітних передач для систем перетворення низькопотенційної механічної енергії в електричну: енергія вітру, енергія води, енергія механічних коливань і т.ін. Застосування магнітних передач в автономних вітрових електростанціях може бути більш перспективним з економічної та технічної точок зору порівняно з традиційними механічними передачами. В якості альтернативи динамічній моделі, що є незручна для використання на початкових етапах проектування з метою первинної оцінки параметрів коливань розроблено лінеаризовану динамічну модель магнітної передачі, в якій співвідношення між моментом і кутом навантаження представлене несинусоїдальною функцією, а її лінійною апроксимацією в області робочого моменту. За допомогою розробленої моделі досліджено параметри та характеристики не лише магнітної передачі, а і інших складових системи: електроджерела електричної енергії а, вітрової турбіни, навантаження і т.ін., що підвищує варіативність та можливості для проведення наукових досліджень пошукового характеру. Розроблена імітаційна модель магнітної передачі враховує пульсації електромагнітного моменту через дискретну структуру магнітної передачі та зміну параметрів моделі при зміні вхідного моменту: пульсацій, втрат в магнітному осерді та постійних магнітах, зміну кута навантаження та передавального електромагнітного моменту.

Ключові слова: магнітна передача, математичне моделювання, постійні магніти, електромеханічний перетворювач, динамічна модель, перехідні процеси.

М.А. KOVALENKO, M.O. REUTSKYI, I.Y. KOVALENKO, Y.O. TITOV, O.O. BAZAROV

LINEARIZED DYNAMIC MODEL OF MAGNETIC TRANSMISSION

The work is devoted to the development of a linearized numerical mathematical model of a contactless electromechanical energy converter with permanent magnets - magnetic transmission. Magnetic transmissions have certain design advantages compared to mechanical transmissions, namely: high reliability, efficiency, lower losses, contactless transmission of mechanical power, no maintenance costs, simplicity of design. The use of magnetic transmissions for systems for converting low-potential mechanical energy into electrical energy is especially relevant: wind energy, water energy, mechanical vibration energy, etc. The use of magnetic transmissions in autonomous wind power plants may be more promising from an economic and technical point of view compared to traditional mechanical transmissions. As an alternative to the dynamic model, which is inconvenient to use at the initial stages of design, for the purpose of initial assessment of oscillation parameters, a linearized dynamic model of magnetic transmission has been developed, in which the relationship between the moment and the load angle is represented by a non-sinusoidal function, and its linear approximation in the operating torque domain. Using the developed model, the parameters and characteristics of not only the magnetic transmission, but also other components of the system have been investigated: an electric source of electric energy, a wind turbine, load, etc., which increases the variability and opportunities for conducting scientific research of an exploratory nature. The developed simulation model of magnetic transmission takes into account the pulsations of the electromagnetic moment through the discrete structure of the magnetic transmission and the change in the model parameters when the input torque changes: pulsations, losses in the magnetic core and permanent magnets, a change in the load angle and the transmitted electromagnetic moment.

Keywords: magnetic transmission, mathematical modeling, permanent magnets, electromechanical converter, dynamic model, transient processes.

Вступ. Питомі масогабаритні показники електричної машини великою мірою залежить від номінальної частоти обертання ротора, що більше частота обертання, то менше габарити електричної машини. Можливість вибору номінальної частоти обертання з широкого діапазону при проектуванні електричної машини дозволяє отримати оптимальні масогабаритні та вартісні показники електроустановки в цілому [1, 2]. Однак номінальна частота обертання найчастіше визначається не так прагненням створити оптимальну електричну машину, скільки вимогами споживача механічної енергії коли це електродвигун або джерелом механічної енергії у випадку електроджерела електричної енергії а. Такі області застосування електричних машин як вітроенергетика, автомобілебудування, кораблебудування, нафтовидобуток, деякі напрямки легкої та харчової промисловості та інших характеризуються вкрай низькими швидкостями обертання, на рівні десятків обертів на хвилину. У цих випадках пряме з'єднання валу електричної машини з навантаженням стає економічно невигідним, а часто й просто неможливим. Наприклад, існуюча тенденція збільшення потужності

одиночної установки у вітроенергетиці вимагає відмови від прямого приводу електроджерела електричної енергії а вітрової турбіни через зростання масогабаритних показників джерела електричної енергії а до значень, що ускладнюють транспортування та монтаж такої електричної машини [3]. Зниження масогабаритних показників електричних машин у подібних випадках можливе лише шляхом значного збільшення їхньої номінальної швидкості обертання, що веде до необхідності використання зубчастих передач як узгоджувальний пристрій між джерела електричної енергії та навантаженням. Ефективність такого підходу зумовлена тим, що номінальний механічний момент зубчастої передачі більш ніж удвічі вищий у порівнянні з сучасною синхронною електричною машиною із збудженням від постійних магнітів [4, 5]. За рахунок цього забезпечуються найкращі масогабаритні показники комплексу високошвидкісної електричної машини – зубчаста передача у порівнянні із системою прямого приводу. Однак наявність зубчастого зачеплення в механічних трансмісіях призводить до появи низки недоліків, таких як: низька надійність, необхідність мастила та

періодичного технічного обслуговування, пожежонебезпечність, високий рівень шуму, а також низька перевантажувальна здатність [6]. Створення нових узгоджувальних пристроїв перетворення механічної енергії, які не мають зазначених недоліків і зберігають переваги зубчастих передач, є актуальним завданням електромеханіки. Одним з таких пристроїв є магнітна передача, в якому момент передається не за рахунок зубчастого зачеплення, а за допомогою силової взаємодії магнітних полів. Це робить можливим безконтактне перетворення швидкості та моменту, а отже і механічної енергії в подальшому в електричну, завдяки чому магнітним передачам не властиві характерні для їх зубчастих аналогів недоліки, зберігаючи при цьому порівнянні з ними масогабаритні показники [7].

В енергетичних установках із встановленою потужністю в кілька мегават, наприклад у вітроенергетиці, застосування магнітних передач замість зубчастих може бути спрямоване на досягнення технічних переваг і подолання існуючих у промисловості технологічних труднощів виробництва якісних зубчастих коліс великого діаметра для передач мультимегаватного класу [8, 9]. Складна технологія виробництва зубчастих передач підвищує ризик застосування цих пристроїв [10, 11]. У той самий час виробництво магнітних передач як електромеханічних пристроїв вимагає освоєння передових технологій у механообробці і може бути здійснено на наявній базі з виробництва електричних машин.

Актуальність. На сьогоднішній день актуальним науково-практичним напрямком є використання магнітних передач на базі висококоерцитивних рідкоземельних постійних магнітів для систем перетворення низькопотенційної енергії в електричну. Підвищити надійність та ефективність роботи таких систем можливо за рахунок заміни традиційних зубчастих передач (мультиплікаторів), наприклад у вітроустановках, на магнітні передачі.

Особливо актуальним та привабливим з технічної точки зору та практичної реалізації виглядає використання магнітних передач в системах перетворення механічної енергії вітру в електричну, як найбільш розповсюджене та доступне джерело механічної потужності. Існуючі технічні рішення передбачають реалізацію вітроустановок з прямим приводом (безмультиплікаторні установки) та із використанням класичних зубчастих передач (мультиплікаторів). Використання установок із прямим приводом призводить до підвищення вартості, зниження надійності, погіршення вагогабаритних показників електроджерела електричної енергії а, з іншого боку мультиплікаторні установки потребують проведення регулярних технічних оглядів, мають меншу надійність та цілий ряд експлуатаційних недоліків.

Актуальність використання магнітних передач, також полягає в підвищенні механічної надійності та ефективності перетворення низькопотенційної механічної енергії в електричну за рахунок використання магнітних передач замість класичної зубчастої передачі. Це дозволить знизити експлуатаційні витрати, підвищити надійність роботи, покращити ефективність

перетворення, зменшити рівень акустичного шуму такої системи, в аварійних режимах роботи вітроустановки відпадає необхідність у використанні спеціальних технічних рішень, спрямованих на фіксацію ротора вітроустановки.

Розширити можливості для наукового дослідження електромеханічних процесів магнітних передач дає застосування сучасних засобів чисельного моделювання, які представлені програмним пакетом, що реалізує метод скінченних елементів Comsol Multiphysics та пакетом MATLAB-Simulink, що дозволяє реалізувати чисельну імітаційну модель [12, 13]. Застосування даних програмних продуктів, або їх аналогів, дозволяє підвищити точність розрахунків, враховувати конструктивні особливості, тривимірний характер замикання основного магнітного потоку та електромагнітних сил, нелінійність конструктивних матеріалів, проводити імітаційні моделювання будь-яких процесів для оцінки ефективності, підтвердження працездатності і т.ін [14-16].

Основною задачею даного дослідження є розробка лінеаризованої динамічної моделі магнітної передачі, що дозволяє спростити результати розрахунків та моделювання із використанням певних припущень.

Метою роботи є розробка лінеаризованої динамічної моделі магнітної передачі для оцінки її параметрів та характеристик.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є магнітна передача, виконана за коаксіальною планетарною топологією. Основні розміри магнітної системи досліджуваної передачі наведено на рис. 1.

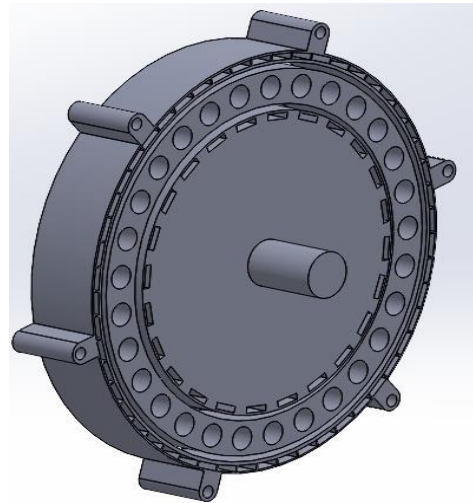


Рис. 1. Ескіз досліджуваного варіанта магнітної передачі

Основні параметри та геометричні дані зразка магнітної передачі, що використовується в даному дослідженні, показано в табл. 1.

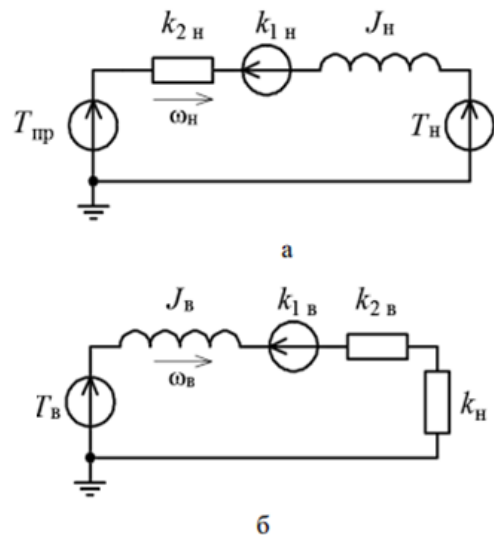
Таблиця 1 – Основні розрахункові параметри експериментального зразка магнітної передачі

Основні параметри	Розрахункові значення	Дані прототипу
Максимальний електромагнітний момент, Нм	66	0,137
Аксiальна довжина, мм	80	30
Передавальне відношення	8,667	8,73
Кiлькiсть пар полюсiв швидкохiдного ротора	3	3
Кiлькiсть пар полюсiв тихохiдного ротора	26	26
Кiлькiсть сталевих сегментiв модулятора	29	29
Ширина феромагнiтних вставок модулятора, мм	12	12
Швидкiсть обертання внутрiшнього (швидкохiдного) ротора, об/хв	1735	1735
Швидкiсть обертання зовнiшнього (тихохiдного) ротора, об/хв	200	200
Ширина повітряного проміжку, мм	4	4
Електропровiднiсть постійних магнiтiв, МСм/м	0,56	0,56
Електропровiднiсть Samoloy, МСм/м	0,14	0,14
Висота постійних магнiтiв, bmag, мм	22	22

Методика складання лінеаризованої динамічної моделі. Динамічна модель магнітної передачі, заснована на нелінійній системі диференціальних рівнянь [17], дозволяє отримати точний результат з мінімальними спрощеннями. Однак така модель незручна для використання на початкових етапах проектування з метою первинної оцінки параметрів коливань. Для цих цілей зручніше скористатися лінеаризованою динамічною моделлю, в якій співвідношення між моментом, що виникає, і кутом навантаження представлене несиноусоїдальною функцією, а її лінійною апроксимацією в області робочого моменту. При такому припущенні стає можливим виконати розрахунок системи частотної області.

Найбільш зручно скласти звернену механічну модель, в якій момент є фазовою змінною типу потенціалу, а кутова швидкість обертання – фазовою змінною типу потоку. На рис. 2 представлено механічні підсистеми окремо для низько- та високошвидкісного роторів, складені за зверненою моделлю.

Відповідно до цієї механічної моделі момент приводу представлений ідеальним джерелом механічної ЕРС, коефіцієнти в'язкого тертя – механічними опорами, коефіцієнти сухого тертя – механічними ЕРС, моменти інерції – механічними індуктивностями. Моменти, які діють низько- і високошвидкісної ротори системи, представлені джерелами механічних ЕРС.



а – низькошвидкісного; б – високошвидкісного
Рис. 2. Еквівалентні схеми механічних підсистем роторів магнітної передачі

Враховуючи, що моменти низько- та високошвидкісного роторів відносяться як передатне відношення, то для зручності аналізу схеми зроблено приведення високошвидкісного ротора магнітної передачі до його низькошвидкісного ротора. Процес приведення полягає у прирівнюванні моментів низько- та високошвидкісного роторів та наступної модифікації інших елементів еквівалентної схеми відповідно до балансу потужностей. Для електромагнітних моментів можна записати наступне співвідношення:

$$T_в = T_н = -i \cdot T_в \quad (1)$$

де $T_в$ – приведений момент високошвидкісного ротора, Н·м.

Механічна потужність, що передається на високошвидкісний ротор до і після приведення, має бути незмінною, звідки:

$$T_в \cdot \omega_в = T_н \cdot \omega_н \quad (2)$$

де $\omega_в$ – приведена кутова швидкість високошвидкісного ротора, рад/с.

Зі співвідношень (1) і (2) випливає:

$$\omega_в = \frac{\omega_н}{i} \quad (3)$$

Значення моментів інерції роторів та коефіцієнтів дисипації потужності при приведенні повинні бути обрані таким чином, щоб задовольнялися енергетичні співвідношення. Енергія, запасена в обертотворі до приведення, повинна дорівнювати її значенню після приведення, отже:

$$\frac{J_н \omega_н^2}{2} = \frac{J_в \omega_в^2}{2} \quad (4)$$

$$J_в = J_н \cdot \left(\frac{\omega_н}{\omega_в}\right)^2 = J_н \cdot i^2 \quad (5)$$

де $J_в$ – приведений момент інерції високошвидкісного ротора, кг·м².

Аналогічно для потужностей, що виділяються в дисипативних елементах:

$$k_{2в} \cdot \omega_в^2 = k_{2н} \cdot \omega_н^2 \quad (6)$$

$$k_{2в} = k_{2н} \cdot \left(\frac{\omega_н}{\omega_в}\right)^2 = k_{2н} \cdot i^2 \quad (7)$$

$$k_{1в} \cdot \omega_в^2 = k_{1н} \cdot \omega_н^2 \quad (8)$$

$$k_{1B} = k_{1B} \cdot \frac{\omega_B}{\omega_B} = k_{1B} \cdot i \quad (9)$$

де k_{1B} – приведений коефіцієнт дисипації потужності за рахунок гістерезису для високошвидкісного ротора, Н·м;

k_{2B} – приведений коефіцієнт дисипації потужності за рахунок індукованих струмів для високошвидкісного ротора, Н·м/с/рад.

Операція приведення дозволяє об'єднати механічні підсистеми високо- та низькошвидкісного роторів в одну еквівалентну схему (рис. 3).

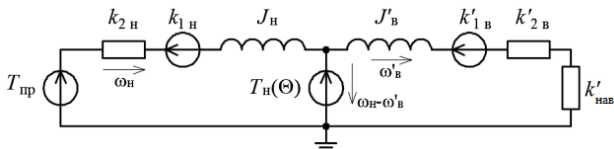


Рис. 3. Еквівалентна схема механічної підсистеми після приведення високошвидкісного ротора до низькошвидкісного ротора

При припущенні, що амплітуда коливань електромагнітного моменту менша за максимальний момент магнітної передачі, можна лінеаризувати систему, ввівши в неї замість джерела електромагнітного моменту пружний елемент (рис. 4) – кутову пружину. Коефіцієнт пружності пружини щодо низькошвидкісного ротора визначається як похідна від навантажувальної характеристики у точці робочого моменту

$$k_y = \left| \frac{dT_{нmax} \sin \theta}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_p} = T_{нmax} \cos \theta_p = T_{нmax} \cos \left(\arcsin \left(\frac{T_p}{T_{нmax}} \right) \right) = T_{нmax} \sqrt{1 - \left(\frac{T_p}{T_{нmax}} \right)^2} = \sqrt{T_{нmax}^2 - T_p^2} \quad (10)$$

де T_p – робочий момент, Н·м;

θ_p – робочий кут навантаження, рад.

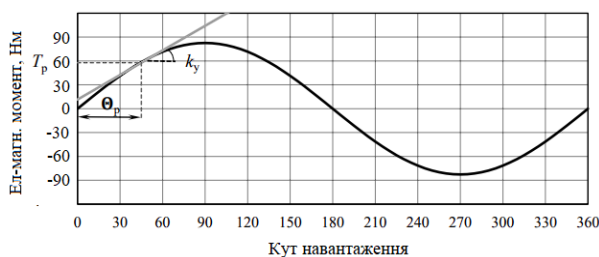


Рис. 4. Кутова характеристика електромагнітного моменту та її лінеаризація

Враховуючи лінеаризацію навантажувальної характеристики, момент магнітної передачі визначається виразом:

$$T_n = k_y \cdot \theta = k_y \cdot p_B (i \cdot \varphi_{пн} - \varphi_{пв}) = k_y \cdot p_B (i \int \omega_n(t) dt - \int \omega_v(t) dt) = k_y \cdot p_B \cdot i \int (\omega_n(t) - \omega'_v(t)) dt. \quad (11)$$

Таким чином, джерело моменту загальної системи на рис. 3.9 може бути представлений у вигляді еквівалентного механічного конденсатора (рис. 5) ємністю:

$$C_M = \frac{1}{k_y \cdot p_B \cdot i} \quad (12)$$

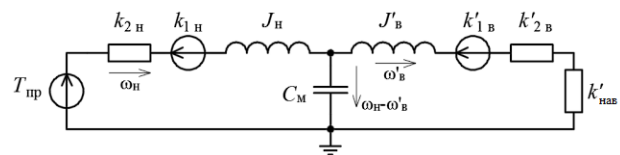


Рис. 5. Лінеаризована наведена еквівалентна механічна схема магнітної передачі

Змінна типу потенціалу на механічному конденсаторі визначає електромагнітний момент, що діє на низькошвидкісний і приведений високошвидкісний ротор магнітної системи.

Як тестовий приклад складена схема лінеаризованої механічної підсистеми магнітної передачі Matlab/Simulink (рис. 6). Параметри системи відповідають значенням, що використовуються в табл. 1. Для порівняння результатів механічна ємність еквівалентного конденсатора розрахована за формулою (12) саме для цього моменту:

$$C_M = \frac{1}{p_B \cdot i \cdot \sqrt{T_{нmax}^2 - T_p^2}} = \frac{1}{3 \cdot 8,667 \cdot \sqrt{60^2 - 30^2}} = 7,4 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{Н} \cdot \text{м}} \quad (13)$$

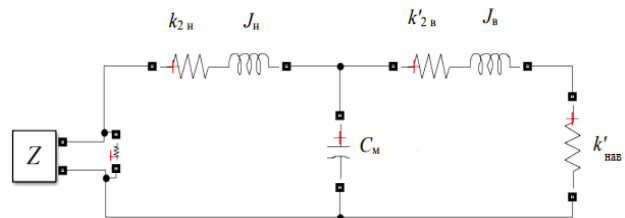


Рис. 6. Модель визначення власних частот в програмі Matlab/ Simulink

Результати розрахунку залежності вхідного опору системи від частоти наведено рис. 7.

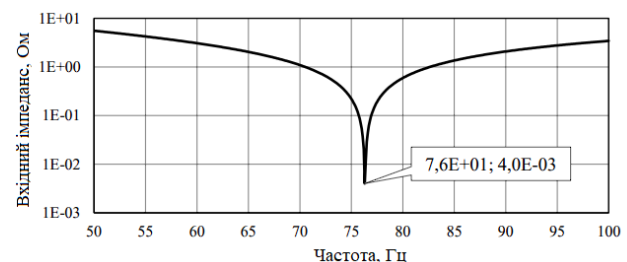


Рис. 7. ЛАЧХ наведеної механічної підсистеми магнітної передачі

Відповідно до ЛАЧХ системи резонансна частота становила 76,3 Гц. Похибка щодо нелінійної моделі становила 1%. Значення коефіцієнтів дисипації енергії та моментів інерції для низькошвидкісного та високошвидкісного роторів мають значення одного порядку. Однак наведені значення цих величин значно відрізняються один від одного.

При передавальному відношенні 8,667 у наведеній механічній підсистемі коефіцієнти дисипації, а також моменти інерції для наведеного високошвидкісного ротора відрізняються на два порядки від відповідних значень низькошвидкісного ротора. Крім того, у гілки високошвидкісного ротора є навантаження, що ще більше збільшує різницю між повними механічними опорами

гілок, що відповідають низькошвидкісному і високошвидкісному роторам. Отже, при оцінці власних частот коливань на перших етапах проектування можна знехтувати гілкою високошвидкісного ротора та скористатися спрощеною еквівалентною схемою (рис. 8).

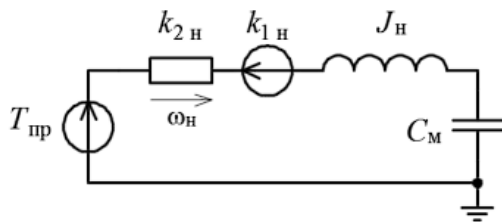


Рис. 8. Спрощена еквівалентна схема магнітної передачі

Так як моменти роторів магнітної передачі відносяться як передатне відношення, то коливання моментів, що виникають, мають однакову фазу пульсацій. Ці моменти призводять до виникнення коливань частоти обертання, початкові фази яких можуть відрізнятися. Відношення амплітуди пульсацій кутових швидкостей обертання на холостому ході визначається відповідно до виразу:

$$\frac{\omega_{нmax}}{\omega_{вmax}} \approx i \quad (14)$$

Коефіцієнти втрат потужності та моменти інерції для високо- та низькошвидкісного роторів зазвичай мають близькі значення. На холостому ході амплітуда пульсації кутової швидкості на низькошвидкісному роторі більше приблизно в передавальне число разів, ніж на високошвидкісному роторі. При додаванні навантаження пульсації на внутрішньому роторі ще більше зменшуються, тобто демпфуються навантаженням.

Слід також зазначити, що у зв'язку з тим, що комплексні значення механічних опорів гілок низько- і високошвидкісного роторів різні, початкові фази пульсацій їх кутових швидкостей також різні, що викликає яскраво виражену мінливість передатного відношення за швидкістю під час перехідного режиму, що необхідно враховувати під час проектування електромеханічних систем з магнітними передачами.

Результати досліджень магнітної передачі за допомогою лінеаризованої моделі. При роботі магнітної передачі можуть виникати такі режими, при яких момент приводу або навантаження перевищує максимальне значення електромагнітного моменту. У такому режимі спостерігається прослизання магнітної передачі («зрив»), у результаті припиняється передача потужності між її роторами.

Для розрахунку такого режиму на тихохідний вал моделі магнітної передачі був поданий момент скидання навантаження. Єдиною відмінністю є те, що в момент часу 1,5 с відбувається збільшення приводного моменту до 90 Н·м, що вище за максимальне значення моменту досліджуваної передачі (рис. 9).

При зміні навантаження, що передається через магнітну передачу, відбуваються перехідні процеси, що супроводжуються коливаннями швидкості та моменту (рис. 10).

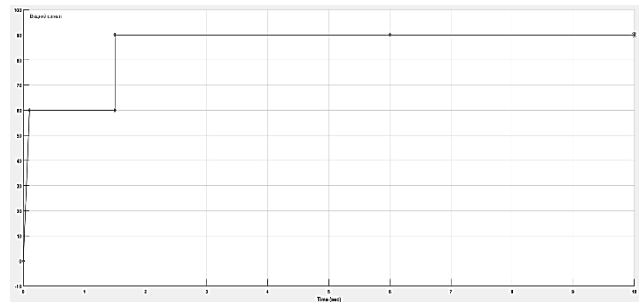
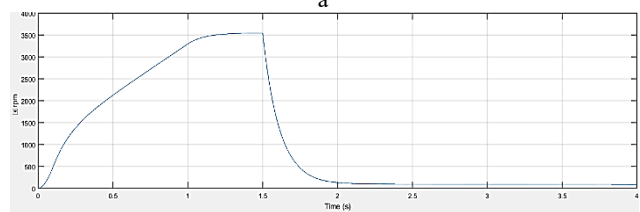
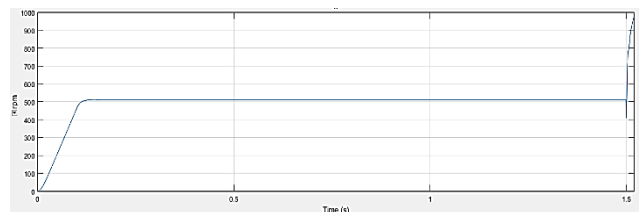


Рис. 9. Залежність моменту приводу від часу



а – для високошвидкісного ротора;
б – для низькошвидкісного ротора

Рис. 10. Розрахункова залежність частоти обертання від часу

Якщо момент навантаження перевищує максимальний електромагнітний момент, або присутні фактори, що впливають на стійкість системи, то магнітна передача може випасти із синхронізму (рис. 11).

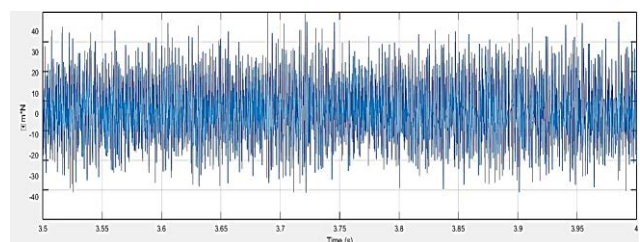


Рис. 11. Розрахункова залежність моменту, що діє на високошвидкісний ротор в області «зриву»

При перевищенні приводом значення максимального моменту магнітна передача виходить із синхронізму, і його вхідний ротор (низькошвидкісний) починає різко прискорюватися (рис. 10, а), а вихідний (високошвидкісний) ротор починає сповільнюватися (рис. 10, б) і в кінці втрачає постійну складову частоти обертання, роблячи коливання щодо нульового значення.

Момент магнітної передачі також втрачає постійну складову і коливається щодо нульового значення з амплітудою, що дорівнює максимальному моменту на відповідному роторі (рис. 11), тобто фактично набуває реактивного характеру, так як не бере участі в передачі потужності.

Висновки.

1. В якості альтернативи динамічній моделі, що є незручна для використання на початкових етапах проєктування з метою первинної оцінки параметрів коливань розроблено лінеаризовану динамічну модель магнітної передачі, в якій співвідношення між моментом і кутом навантаження представлене несинусоїдальною функцією, а її лінійною апроксимацією в області робочого моменту.

2. За допомогою розробленої моделі досліджено параметри та характеристики не лише магнітної передачі, а і інших складових системи: електроджерела електричної енергії а, вітрової турбіни, навантаження і т.ін., що підвищує варіативність та можливості для проведення наукових досліджень пошукового характеру.

3. Розроблена імітаційна модель магнітної передачі враховує пульсації електромагнітного моменту через дискретну структуру магнітної передачі та зміну параметрів моделі при зміні вхідного моменту: пульсацій, втрат в магнітному осерді та постійних магнітах, зміну кута навантаження та передавального електромагнітного моменту.

4. Отримані результати визначення втрат потужності показали, що крім магнітних втрат у магнітній системі, значну частину загальних втрат потужності складають механічні втрати в підшипниках, спричинені підвищенням навантаженням на них внаслідок наявності некомпенсованих радіальних електромагнітних зусиль, а також магнітні втрати в елементах конструкції, спричинені вираженими кінцевими ефектами.

References:

- Zheng Ma, Jingwei Ai, Yamei Yue, Kun Wang, Bin Su, A superhydrophobic magnetoelectric generator for high-performance conversion from raindrops to electricity, *Nano Energy*, Volume 83, 2021, 105846, ISSN 2211-2855, <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.105846>.
- Radwan-Pragłowska, N., Wegiel, T., Borkowski, D. (2020). Modeling of Axial Flux Permanent Magnet Generators. *Energies*, no. 13(21), 5741-5745. <https://doi.org/10.3390/en13215741>.
- Sadullaev, N & Nematov, Sh & Sayliev, F. (2022). Evaluation of the technical parameters of the generator for efficient electricity generation in low-speed wind and water flows. *Journal of Physics: Conference Series*. 2388. 012142. 10.1088/1742-6596/2388/1/012142.
- S. Djebbari, J. F. Charpentier, F. Scuiller and M. Benbouzid, "Design and Performance Analysis of Double Stator Axial Flux PM Generator for Rim Driven Marine Current Turbines," in *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 41, no. 1, pp. 50-66, Jan. 2016, doi: 10.1109/JOE.2015.2407691.
- M. A. Noroozi Dehdez and J. Milimonfared, "A Novel Radial-Axial Flux Switching Permanent Magnet Generator," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 12, pp. 12096-12106, Dec. 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3128901.
- F. Yu et al., "Design and Multiobjective Optimization of a Double-Stator Axial Flux SRM With Full-Pitch Winding Configuration," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 8, no. 4, pp. 4348-4364, Dec. 2022, doi: 10.1109/TTE.2022.3173938.
- J. Zhao, Y. Wang, J. Li and H. Hu, "Comparative Study on Torque Performance of Five-phase Single-Stator and Double-Stator Permanent Magnet Synchronous Motors," in *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 46-52, March 2022, doi: 10.30941/CESTEMS.2022.00007.
- Sun, Y. & Yu, F. & Yuan, Y. & Huang, Z. & Huang, Y. & Zhu, Z. (2019). A Hybrid Double Stator Bearingless Switched Reluctance Motor. *Diangong Jishu Xuebao/Transactions of China Electrotechnical Society*. 34. 1-10. 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L80363.
- Cendoya, M. & Talpone, Juan & Puleston, P.F. & Barrado, José Antonio & Martinez-Salamero, L. & Battaiotto, P.E. (2021). Management of a Dual-Bus AC+DC Microgrid Based on a Wind Turbine with Double Stator Induction Generator. *Wseas transactions on power systems*. 16. 297-307. 10.37394/232016.2021.16.30.
- Li, Zheng et al. "Design and Analysis of Underwater Power Generation Characteristics of Deflected Double-stator Switched Reluctance Generator". 1 Jan. 2022 : 1 – 20.
- Widyanto, Aji & Ariwidayati, Rahmat & Husnayaian, Faiz & Rahardjo, Amien & Utomo, A.R. & Ardita, I. (2022). Designing Air-Cored Axial Flux Permanent Magnet Generator with Double Rotor. *ELKHA*. 14. 46. 10.26418/elkha.v14i1.53048.
- Ostroverkhov, M., Chumack, V., Falchenko, M., & Kovalenko, M. (2022). Development of control algorithms for magnetoelectric generator with axial magnetic flux and double stator based on mathematical modeling. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (5 (120), 6–17. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.267265>.
- V.M. Golovko, M.Ya. Ostroverkhov, M.A. Kovalenko, I.Ya. Kovalenko, D.V. Tsyplenkov Mathematical simulation of autonomous wind electric installation with magnetoelectric generator // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2022, (5): 074 – 079. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/074>.
- Setyawan, E.Y., Soleh, C., Krismanto, A.U., Sujana, I. W., Djiwo, S., & Prihatni, T. N. (2022). Design and Performance Analysis of Double Axial Flux Permanent Magnet Generator. *Trends in Sciences*, 19(6), 3049. <https://doi.org/10.48048/tis.2022.3049>
- Prasertijo, Hari. (2022). Pengaruh Inti Stator Terhadap Performa Generator Magnet Permanen Fluks Aksial Satu Fasa. *JRST (Jurnal Riset Sains dan Teknologi)*. 6. 165. 10.30595/jrst.v6i2.13668.
- Wirtayasa, Ketut & Irasari, Pudji & Kasim, Muhammad & Widyanto, Puji & Hikmawan, Muhammad. (2019). Load characteristic analysis of a double-side internal coreless stator axial flux PMG. *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*. 10. 17. 10.14203/j.mev.2019.v10.17-23.
- M.A. Kovalenko, I.Ya. Kovalenko, I.V. Tkachuk, A.G. Harford, D.V. Tsyplenkov. (2024). Mathematical modeling of a magnetic gear for an autonomous wind turbine. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2024, (2): 088 – 095. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-2/088>.

Надійшла (received) 25.10.2024

Відомості про авторів / About the authors

Коваленко Михайло Анатолійович (Kovalenko Mykhaylo) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", доцент кафедри електромеханіки; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>; e-mail: kovalenko_ma@i.ua.

Реуцький Микола Олександрович (Reutskyi Mykola) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", доцент кафедри електромеханіки; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1870-2222>; e-mail: rmo318@i.ua.

Коваленко Ірина Яківна (Kovalenko Iryna) – асистент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", аспірант кафедри нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1097-2041>; e-mail: 2048141@ukr.net.

Тітов Єгор Олександрович (Titov Yehor) – аспірант, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", аспірант кафедри електромеханіки, <https://orcid.org/0009-0007-8222-7477>; e-mail: egor.shabadash@gmail.com.

Базаров Олег Олександрович (Bazarov Oleh) – аспірант, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", аспірант кафедри електромеханіки, <https://orcid.org/0009-0008-8491-2678>; e-mail: bazarov.oleh@gmail.com.