

М.А. КОВАЛЕНКО, І.В. ТКАЧУК, І.Я. КОВАЛЕНКО, С.О. ЖУК, О.О. КРИШНЬОВ

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ МАГНІТНОЇ ПЕРЕДАЧІ

В роботі проведено дослідження безконтактного електромеханічного перетворювача енергії із постійними магнітами, що відомий як магнітна передача. 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 редукторів в автономних вітрових електростанціях може бути більш перспективним з економічної та технічної точок зору порівняно з традиційними механічними передачами. Розроблено чисельну імітаційну математичну модель магнітної передачі із постійними магнітами. Використання магнітної передачі, наприклад, для автономних вітроелектричних систем дозволяє підвищити надійність роботи таких установок, зменшити експлуатаційні витрати та підвищити ефективність їх роботи. В аварійних режимах роботи використання магнітної передачі дозволяє уникнути руйнувань або аварійних зупинок роботи електрообладнання. 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. Особливістю розробленої моделі системи магнітної передачі є те, що зміна навантаження електроджерела електричної енергії а призводить до зміни робочої точки на механічній характеристиці ротора вітроустановки. І навпаки, при зміні параметрів вітру змінюються вихідні параметри джерела електричної енергії: потужність, напруга, струм та електромагнітний момент.

Ключові слова: магнітна передача, чисельне імітаційне моделювання, постійні магніти, електромеханічний перетворювач, динамічна модель.

M. A. KOVALENKO, I. V. TKACHUK, I. Y. KOVALENKO, S. O. ZHUK, O. O. KRYSHNOV

DYNAMIC MODEL OF MAGNETIC TRANSMISSION

In the work, a non-contact electromechanical energy converter with permanent magnets, which is known as magnetic transmission, is studied. Magnetic transmissions have certain structural advantages compared to mechanical transmissions, namely: high reliability, efficiency, lower losses, non-contact transmission of mechanical power, no maintenance costs, and simplicity of construction. The use of magnetic transmissions for systems of conversion of low-potential mechanical energy into electrical energy is especially relevant: wind energy, water energy, energy of mechanical vibrations, etc. The use of magnetic gearboxes in autonomous wind power plants can be more promising from an economic and technical point of view compared to traditional mechanical transmissions. A numerical simulation mathematical model of magnetic transmission with permanent magnets has been developed. The use of magnetic transmission, for example, for autonomous wind power systems allows to increase the reliability of the operation of such installations, reduce operating costs and increase the efficiency of their operation. In emergency modes of operation, the use of magnetic transmission allows to avoid destruction or emergency shutdowns of electrical equipment. The developed simulation model of magnetic transmission takes into account the pulsations of the electromagnetic moment due to the discrete structure of the magnetic transmission and the change of the model parameters when the input moment changes: pulsations, losses in the magnetic core and permanent magnets, the change of the load angle and the transmitted electromagnetic moment. A feature of the developed model of the magnetic transmission system is that a change in the load of the electric power source leads to a change in the operating point on the mechanical characteristics of the rotor of the wind turbine. Conversely, when the wind parameters change, the output parameters of the source of electrical energy change: power, voltage, current and electromagnetic moment.

Keywords: magnetic transmission, numerical simulation, permanent magnets, electromechanical converter, dynamic model.

Вступ. Магнітні передачі представляють собою важливий клас електромеханічних пристроїв, які використовуються для перетворення енергії з механічної форми в електричну [1-3]. Цей тип перетворювачів став доступним завдяки значному розвитку по потужності та розробці нових типів постійних магнітів з високою коерцитивною силою. Магнітні редуктори використовуються у широкому спектрі галузей, таких як вітроенергетика, автомобілебудування, суднобудування, нафтовидобуток, хімічна та харчова промисловість. Ці пристрої в основному використовуються в механізмах з низькою швидкістю обертання, де частота обертання валу може бути відносно низькою [4-5].

Магнітні редуктори мають потенціал для застосування в автономних вітрових електростанціях. Традиційні вітрові турбіни використовують механічні передачі (мультиплікатори) для перетворення низької швидкості обертання лопатей у високу швидкість обертання генератора. Однак механічні передачі мають свої недоліки, такі як низька надійність та потреба в постійному обслуговуванні [6-9]. Використання магнітних передач може бути більш вигідним рішенням, оскільки вони пропонують ефективніший та менш обтяжливий

спосіб конвертації енергії [10, 11].

Таким чином, застосування магнітних редукторів в автономних вітрових електростанціях може бути більш перспективним з економічної та технічної точок зору порівняно з традиційними механічними передачами [12-17].

Розв'язання цієї проблеми вже давно відоме: для зменшення розмірів електричних машин потрібно збільшити їх номінальну швидкість. Однак це вимагає використання підвищувальних передавальних передач (мультиплікаторів) [18]. Ефективність такого підходу полягає в тому, що номінальний механічний момент зубчастій передачі значно перевищує аналогічний параметр сучасних синхронних електричних машин з постійними магнітами [19, 20]. Це забезпечує кращу продуктивність загалом для високошвидкісних електричних машин порівняно з системою безпосереднього приводу [21].

Механічне з'єднання в зубчастих передачах має свої недоліки, такі як низька надійність, потреба в змащенні та обслуговуванні, можливість пожежі, великий рівень шуму та обмежена здатність до перевантаження. Розробка нових пристроїв, які б вирішили ці

проблеми, зберігаючи переваги передач, є важливим завданням в галузі електромеханіки. Одним з таких пристроїв, що допомагає вирішити цю технічну задачу, є магнітна передача, де крутний момент передається не механічним зачепленням, а через взаємодію магнітних полів [22]. Це дозволяє досягти безконтактного перетворення швидкості та крутного моменту, усуваючи при цьому деякі недоліки, характерні для їх механічних аналогів, і зберігаючи компактні розміри.

Актуальність роботи 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.

Отже, актуальним науковим завданням, яке має важливе практичне значення, є розробка на основі результатів математичного і фізичного моделювання системи перетворення низькопотенційної механічної енергії в електричну на основі магнітної передачі. Розробка даної системи повинна починатись із розробки динамічної моделі магнітної передачі, яка є невід'ємною частиною будь-якої системи перетворення низькопотенційної механічної енергії в електричну.

Метою роботи є розробка динамічної моделі магнітної передачі в системі для чисельного імітаційного моделювання для оцінки її параметрів та характеристик.

Об'єкт дослідження. В даній роботі динамічна модель магнітної передачі побудована для варіанта магнітної системи магнітної передачі, виконаної за коаксіальною планетарною топологією. Основні розміри магнітної системи досліджуваної передачі наведено на рис. 1.

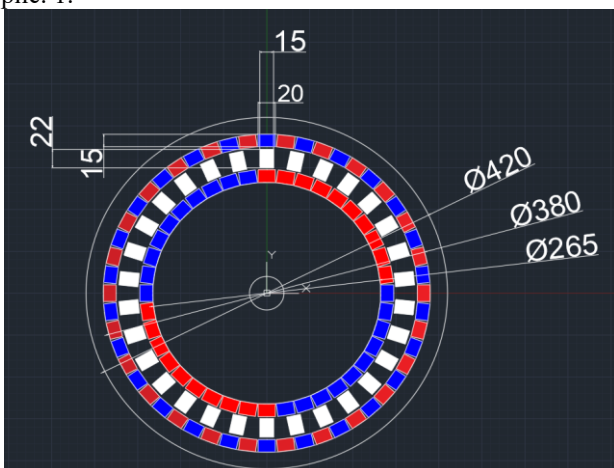


Рис. 1. Основні розміри магнітної системи досліджуваного варіанта магнітної передачі

Чисельна імітаційна математична модель магнітної передачі. Магнітна передача є системою з двома магнітно-пов'язаними елементами, що обертаються з

різними швидкостями, – високошвидкісним і низькошвидкісним роторами. Торсійна жорсткість магнітних передач приблизно на три порядки нижче, ніж у їх зубчастих аналогів, що відбивається на їх динамічні характеристики. Динаміка роботи магнітної передачі розглянута лише у кількох роботах. Однак у жодній з відомих робіт не представлені математичні макромоделі магнітної передачі та оцінки впливу параметрів кожного з роторів окремо на частоту вільних коливань.

Для певності надалі робота магнітної передачі розглядається в режимі мультиплікатора, тобто до низькошвидкісного ротора прикладено момент від приводу, а до високошвидкісного ротора – момент навантаження. Однак усі наведені нижче міркування справедливі й у режимі редуктора. Таким чином, у загальному вигляді рівняння, що описують рухи низько- та високошвидкісного роторів, записуються згідно з другим законом Ньютона як:

$$\begin{cases} J_H \frac{d\omega_H}{dt} = T_{пр} - T_H - T_{нав\ H}, \\ J_B \frac{d\omega_B}{dt} = T_B - T_{нав\ B} - T_{нав}, \end{cases} \quad (1)$$

де J_H, J_B – моменти інерції низько-і високошвидкісного роторів, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

ω_H, ω_B – кутові швидкості низько-і високошвидкісного роторів, рад/с ;

$T_{пр}$ – момент приводу, $\text{Н} \cdot \text{м}$;

T_B – електромагнітний момент на високошвидкісному роторі, $\text{Н} \cdot \text{м}$;

T_H – електромагнітний момент на низькошвидкісному роторі, $\text{Н} \cdot \text{м}$;

$T_{нав\ H}$ – момент втрат, що діє на низькошвидкісний ротор, $\text{Н} \cdot \text{м}$;

$T_{нав\ B}$ – момент втрат, що діє на високошвидкісний ротор, $\text{Н} \cdot \text{м}$;

$T_{нав}$ – момент навантаження, $\text{Н} \cdot \text{м}$.

Якщо припустити, що пристрій обертається від ідеального джерела моменту та момент навантаження визначено, то в системі рівнянь (1) невідомими змінними є $\omega_H, \omega_B, T_H, T_B, T_{нав\ H}, T_{нав\ B}$. Таким чином, для її вирішення необхідно додати чотири додаткові рівняння. Перші два додаткові рівняння відображають залежність моментів втрат від швидкості обертання роторів

$$\begin{cases} T_{нав\ H} = k_{2H} \cdot \omega_H + k_{1H}, \\ T_{нав\ B} = k_{2B} \cdot \omega_B + k_{1B}, \end{cases} \quad (2)$$

де k_{2H}, k_{2B} – коефіцієнти дисипації потужності за рахунок індукованих струмів для низько- та високошвидкісного роторів, $\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/рад}$;

k_{1B}, k_{1H} – коефіцієнти дисипації потужності за рахунок гістерезису для низько- та високошвидкісного роторів, $\text{Н} \cdot \text{м}$.

Відповідно до принципу роботи магнітної передачі та отриманих в результаті його моделювання статичним моментним характеристикам відношення електромагнітних моментів, що діють на низько- та високошвидкісної ротори магнітної системи, зберігається постійним і рівним передатному відношенню, звідки слідує третє додаткове рівняння до системи (1)

$$\frac{T_H}{T_B} = -i. \quad (3)$$

У повітряних проміжках коаксіальної планетарної

магнітної передачі магнітне поле не обмежується однією просторовою гармонікою, а має кілька гармонійних складових, серед яких можна виділити і робочу гармоніку - гармоніку, що бере участь у передачі потужності. За результатами моделювання робоча гармоніка у зовнішньому немагнітному зазорі має p_v пар полюсів, а у внутрішньому – p_n пар полюсів. Інші гармоніки спектру не беруть участь у передачі потужності, створюючи реактивний момент. Тому з метою спрощення моделі, гармоніки, які беруть участь у передачі потужності, не враховуються. Таким чином, приймаючи припущення про синусоїдальність кутової характеристики електромагнітного моменту можна показати електромагнітний момент через кут навантаження. Для певності надалі розглядатимуться магнітні поля в внутрішньому немагнітному зазорі. З принципу дії магнітної передачі відомо, що при обертанні його низькошвидкісного ротора з кутовою частотою ω_n збуджуване ним поле у внутрішньому немагнітному проміжку обертається з частотою $\omega_n \cdot i$ і має робочу гармоніку з парами полюсів. Таким чином, електричний кут повороту робочої гармоніки магнітного поля, що збуджується системою статор – модулятор у внутрішньому немагнітному проміжку

$$\varphi_{нав\ n} = p_n \cdot i \int \omega_n(t) dt. \tag{4}$$

Електричний кут повороту поля високошвидкісного ротора у внутрішньому немагнітному зазорі

$$\varphi_{нав\ v} = p_v \cdot i \int \omega_v(t) dt. \tag{5}$$

Отже, електричний кут між полями (кут навантаження) у кожний момент часу

$$\theta = \varphi_{нав\ n} - \varphi_{нав\ v} = p_v \cdot (i \int \omega_n(t) dt - \int \omega_v(t) dt). \tag{6}$$

Так як магнітна передача працює в режимі мультиплікатора, то момент, що діє на низькошвидкісний ротор, повинен мати характер, що гальмує. Залежність моменту від кута навантаження представлена як:

$$T_n = -T_{n\ max} \sin \theta, \tag{7}$$

де $T_{n\ max}$ – максимальний електромагнітний момент, що розвивається низькошвидкісним ротором.

Спільно системи утворюють додаткове четверте рівняння. Таким чином, повна система рівнянь, що описує динаміку роботи магнітної передачі, має такий вигляд

$$\begin{cases} J_n \frac{d\omega_n}{dt} = T_{пр} - T_n - k_{2n} \cdot \omega_n - k_{1n}, \\ J_v \frac{d\omega_v}{dt} = T_v - k_{2v} \cdot \omega_v - k_{1v} - T_{нав}, \\ \frac{T_n}{T_v} = -i, \\ T_n = -T_{n\ max} \sin \theta, \\ \theta = p_v \cdot (i \int \omega_n(t) dt - \int \omega_v(t) dt). \end{cases} \tag{8}$$

З системи видно, що миттєве значення відношення частот обертання низько і високошвидкісного роторів може відрізнятися від передавального відношення, що не характерно для зубчастих передач, де швидкості валів пов'язані жорстко через передавальні відносини. У випадку з магнітною передачею дане співвідношення виконується тільки в режимі, який характеризується сталістю частот обертання роторів.

Рішення нелінійної системи рівнянь (1) зроблено у програмному середовищі Matlab/Simulink (рис. 2). Еквівалентна схема магнітної передачі побудована за принципом прямої моделі, тобто механічні та електромагнітні моменти в системі є фазовими змінними типу

потоків, а частоти обертання – типу потенціалу.

Структурно модель складається з трьох основних частин, що відповідають низькошвидкісному ротору, високошвидкісному ротору і магнітному зв'язку між ними, складеною відповідно до системи рівнянь (8).

Привід представлений у моделі ідеальним джерелом моменту $T_{пр}$ з використанням блоку "Ideal Torque Source". Моменти інерції роторів J_v, J_n представлені за допомогою блоків "Inertia". Дисипативні елементи представлені за допомогою блоків "Rotational Friction", які дозволяють визначати коефіцієнти $k_{2n}, k_{2v}, k_{1n}, k_{1v}$ системи рівнянь (8). Навантаження моделюється введенням додаткового коефіцієнта в'язкого тертя $k_{нав}$. Зв'язок механічних підсистем низько- та високошвидкісного роторів магнітної передачі здійснена за допомогою додавання співвідношення між електромагнітними моментами T_v, T_n , що діють на кожен із роторів. Електромагнітні моменти представлені за допомогою керованих джерел "Ideal Torque Source". Миттєві значення електромагнітних моментів T_v, T_n визначаються трьома останніми рівняннями системи (8). Миттєві значення кутів повороту роторів системи розраховуються інтегруванням кутової швидкості обертання, що розраховується за допомогою блоку "Ideal Rotational Motion Sensor".

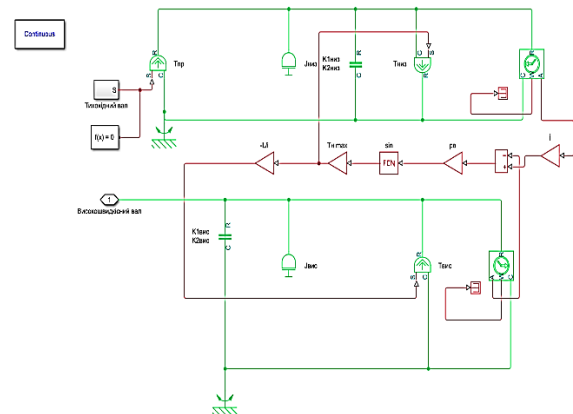


Рис. 2. Динамічна модель магнітної передачі в Matlab/Simulink

Основними параметрами макромоделі, які необхідно визначити для вирішення системи рівняння (3.8), є максимальний електромагнітний момент ($T_{n\ max}$), передавальне відношення (i), число пар полюсів високошвидкісного ротора (p_v) та статора (p_n), а також моменти інерції роторів (J_v, J_n) та узагальнені коефіцієнти дисипації потужності для низькошвидкісного (k_{1n}, k_{2n}), та високошвидкісного (k_{1v}, k_{2v}) роторів.

Як числовий приклад далі розглядається варіант магнітної передачі, максимальний момент якого становить 66 Н·м. Число пар полюсів на роторах задається при проектуванні і для варіанта магнітної системи, що розглядається, дорівнює 26 і 3 відповідно. Передатне відношення при заблокованому зовнішньому магнітному колесі дорівнює 8,667 відповідно до формули (7). Моменти інерції роторів розраховані за допомогою 3D моделі і склали $13 \cdot 10^{-3}$ кг·м² та $1,1 \cdot 10^{-3}$ кг·м² для низько- та високошвидкісного роторів відповідно.

Узагальнений коефіцієнт втрат потужності k_2 за рахунок індукованих струмів становить $1,1 \cdot 10^{-3}$ Н·м·с/рад. Узагальнений коефіцієнт втрат потужності k_1 за рахунок втрат на гістерезис становить $9,3 \cdot 10^{-2}$ Н·м. Втрати потужності в системі, пропорційні другому ступеню кутової частоти

$$P_2 = k_2 \omega_B^2 = k_{2B} \omega_B^2 + k_{2H} \omega_H^2. \quad (9)$$

У зв'язку з тим, що немає можливості розрахувати коефіцієнти окремо для кожного з роторів прийнято припущення, що $k_{2H} = k_{2B} = k_{2\Sigma 2}$

$$P_2 = k_2 \omega_B^2 = k_{2B} \omega_B^2 + k_{2H} \omega_H^2 = k_{2\Sigma 2} (\omega_B^2 + \omega_H^2) = k_{2\Sigma 2} \left(1 + \frac{1}{i^2}\right) \cdot \omega_B^2, \quad (10)$$

звідки

$$k_{2B} = k_{2H} = \frac{k_2 \cdot i^2}{1+i^2} = \frac{1,1 \cdot 10^{-3} \cdot 8,667^2}{1+8,667^2} = 1,1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}. \quad (11)$$

За аналогією втрати потужності в обох роторах системи, пропорційні першій ступені кутової частоти також складаються

$$P_1 = k_1 \omega_B = k_{1B} \omega_B + k_{1H} \omega_H. \quad (12)$$

і при припущенні, що $k_{1H} = k_{1B} = k_{1\Sigma 1}$ отримуємо

$$P_1 = k_2 \omega_B = k_{1B} \omega_B + k_{1H} \omega_B = k_{1\Sigma 1} (\omega_B + \omega_H) = k_{1\Sigma 1} \left(1 + \frac{1}{i}\right) \cdot \omega_B, \quad (13)$$

Звідки

$$k_{1B} = k_{1H} = \frac{k_1 \cdot i}{1+i} = \frac{9,3 \cdot 10^{-2} \cdot 8,667}{1+8,667} = 8,6 \cdot 10^{-2} \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (14)$$

Результати моделювання динамічних процесів.

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. В момент часу 1,5 с відбувається збільшення приводного моменту до 90 Н·м, що вище за максимальне значення моменту досліджуваної передачі (рис. 3).

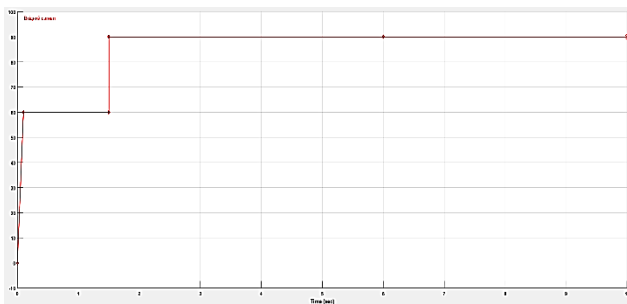
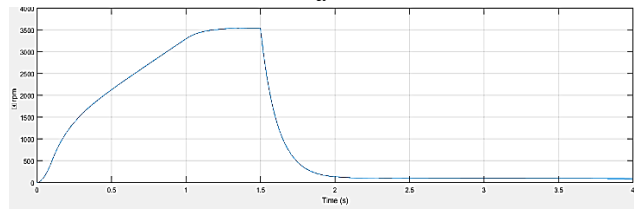
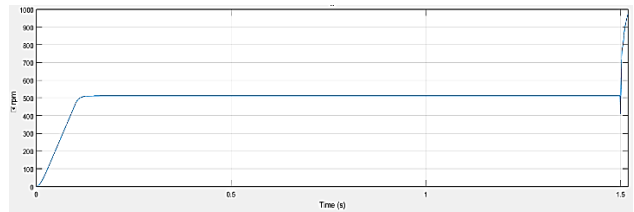


Рис. 3. Залежність моменту приводу від часу

При цьому відповідно змінюється швидкість обертання низькошвидкісного та високошвидкісного роторів магнітної передачі (рис. 4).



а – для високошвидкісного ротора;
б – для низькошвидкісного ротора

Рис. 4. Розрахункова залежність частоти обертання від часу

Розрахункова залежність моменту, що діє на високошвидкісний ротор в області «зриву» показано на рис. 5.

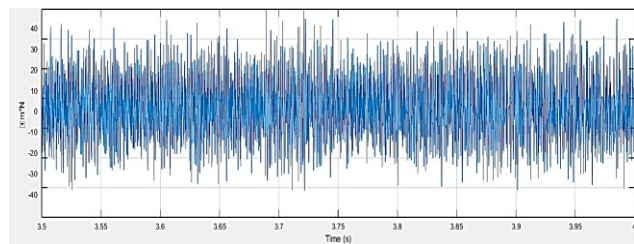


Рис. 5. Розрахункова залежність моменту, що діє на високошвидкісний ротор в області «зриву»

При перевищенні приводом значення максимального моменту магнітна передача виходить із синхронізму, і його вхідний ротор (низькошвидкісний) починає різко прискорюватися (рис. 4, а), а вихідний (високошвидкісний) ротор починає сповільнюватися (рис. 4, 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. 5), тобто фактично набуває реактивного характеру, так як не бере участі в передачі потужності.

При роботі магнітної передачі виникають різні зміни як приводного моменту так і навантаження. Це призводить до зміни кута навантаження θ та викликає коливальний процес роторів. Для моделювання процесів, що відбуваються при різкій зміні моменту приводу (наприклад, при різких поривах вітру), в математичній моделі магнітної передачі до тихохідного валу прикладений момент, що змінюється в часі відповідно до показаної на рис. 6 функції.

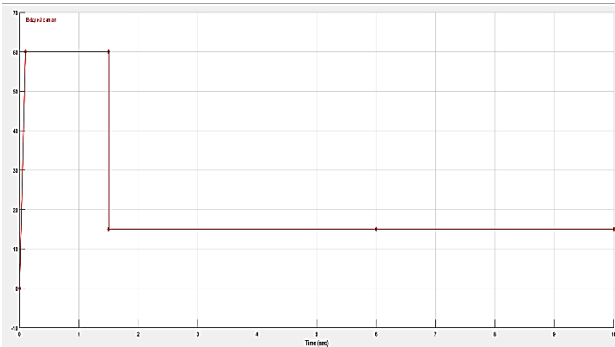


Рис. 6. Залежність моменту приводу від часу

Момент збільшується від нульового значення до номінального за 0,1 с. Далі момент має постійне значення, яке зберігається до моменту часу 1,5 с. За цей час частота обертання роторів досягає встановленого значення. Під впливом привідного моменту вітрової турбіни обидва ротори починають обертатися в протилежних напрямках, відповідно до принципу дії планетарної коаксальної магнітної передачі. У час 1,5 з відбувається скидання приводного моменту на 50 %, що викликає пульсації швидкості обертання та електромагнітного моменту роторів (рис. 7).

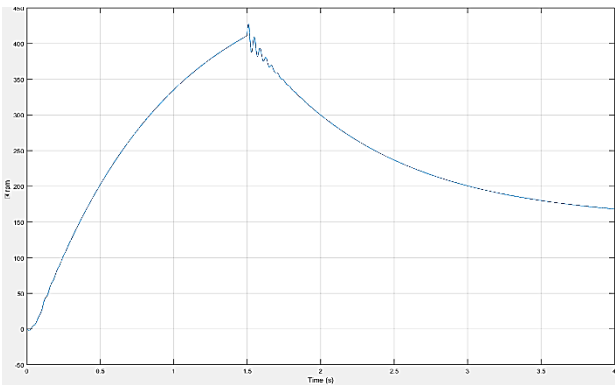
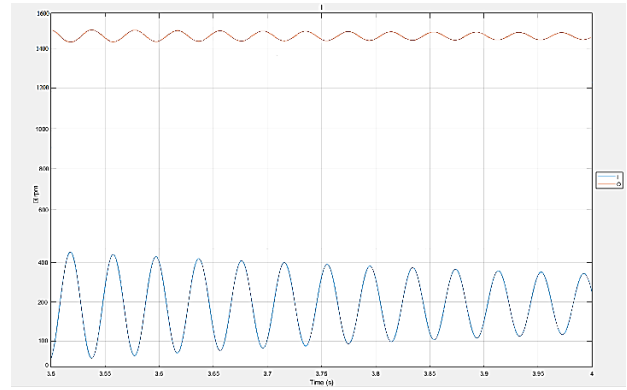


Рис. 7. Розрахункові залежності швидкості обертання для низькошвидкісного ротора

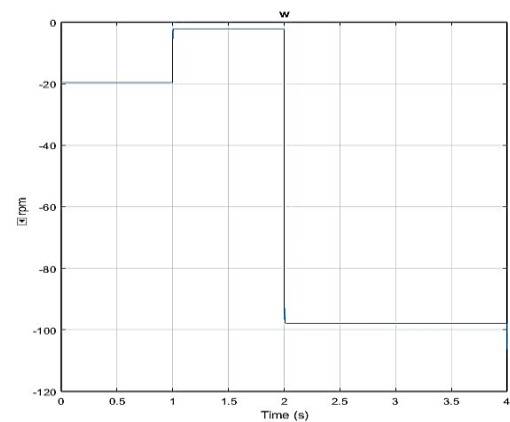
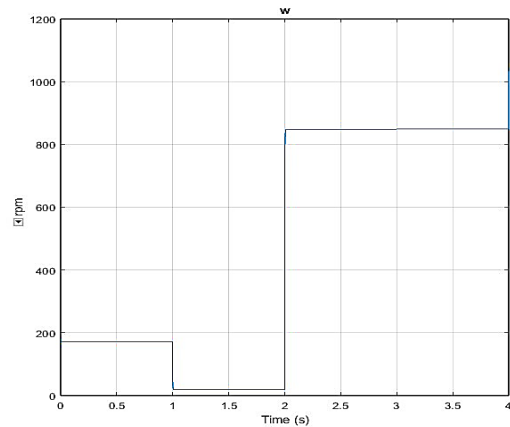
Частоти коливань, що виникають в обох роторах однакові, при цьому їх амплітуда на високошвидкісному роторі набагато менше, ніж на низькошвидкісному (рис. 8). У спектрі частот коливань також присутні субгармоніки, пов'язані з нелінійністю кутової характеристики електромагнітного моменту, але їхня амплітуда мала порівняно з амплітудою основної гармоніки.



1 – низькошвидкісний ротор, 0 – високошвидкісний ротор
Рис. 8. Розрахункові пульсації швидкості на проміжку часу від 3,5 до 4 с

Наявність пульсацій електромагнітного моменту (рис. 8) магнітної передачі та їх врахування в розробленій чисельній імітаційній моделі є ще однією характерною особливістю розробленої системи магнітної передачі, що відрізняє її від відомих аналогів.

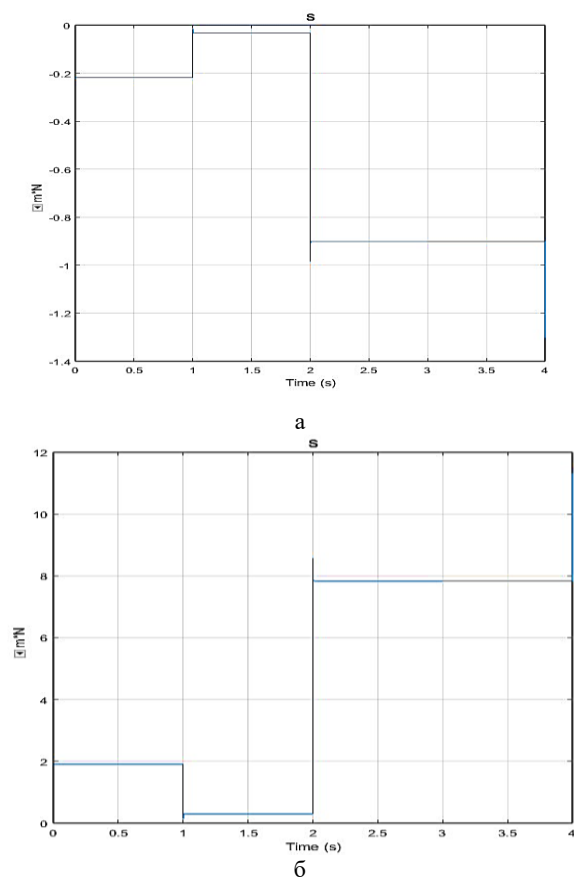
При змінній швидкості вітру змінюються і відповідні параметри магнітної передачі та вихідні параметри електроджерела електричної енергії. На рис. 9 показано зміну швидкості обертання низькошвидкісного та високошвидкісного ротора магнітної передачі.



а – високошвидкісного ротора;
б – низькошвидкісного ротора
Рис. 9. Зміна швидкості обертання при зміні швидкості вітру

Зона від 0-1 с на рис. 9, відповідає швидкості вітру 4,4 м/с, при цьому швидкість обертання ротора вітроустановки і низькошвидкісного ротора магнітної передачі становить 21 об/хв. При цьому швидкість обертання високошвидкісного ротора (вихідного ротора) становить 183 об/хв, що відповідає коефіцієнту редукції 8,7.

При зміні вхідної швидкості та навантаження джерела електричної енергії із постійними магнітами змінюється пропорційно величина електромагнітного моменту магнітної передачі, що показано на рис. 10.



а – високошвидкісного ротора,
б – низькошвидкісного ротора

Рис. 10. Залежність електромагнітного моменту магнітної передачі для

Очевидно, що момент високошвидкісного ротора менший моменту низькошвидкісного ротора. Наприклад для діапазону часу 2-4 с, момент високошвидкісного ротора становить $-0,91$ Н·м, тоді як момент низькошвидкісного ротора має величину $7,8$ Н·м, що відповідає передавальному коефіцієнту 8,6. Варто відмітити, що коефіцієнт передачі в даному випадку відрізняється від отриманого вище значення, оскільки в моделі враховано втрати в магнітному осерді магнітної передачі та механічні втрати. Оскільки низькошвидкісний ротор є привідним, то він створює гальмівний момент привідному механізму (наприклад, ротору вітрової турбіни) і має знак «+», а на високошвидкісний ротор діє момент джерела електричної енергії (наприклад, електрогенератора), тому він має знак «-».

Випадання магнітної передачі із синхронізму не розглядається як недолік при використанні у складі автономної вітроелектричної установки. Оскільки такий ефект дозволяє зберегти механічну частину вітроустановки та сприяє згладжуванню різких механічних коливань. Подібні явища при використанні механічних мультиплікаторів призвели б до аварійної зупинки установки або взагалі виходу її з ладу.

Висновки. Розроблено чисельну імітаційну математичну модель магнітної передачі із постійними магнітами. Використання магнітної передачі, наприклад, для автономних вітроелектричних систем дозволяє підвищити надійність роботи таких установок, зменшити експлуатаційні витрати та підвищити ефективність їх роботи. В аварійних режимах роботи використання магнітної передачі дозволяє уникнути руйнувань або аварійних зупинок роботи електрообладнання.

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. Особливістю розробленої моделі системи магнітної передачі є те, що зміна навантаження електроджерела електричної енергії а призводить до зміни робочої точки на механічній характеристиці ротора вітроустановки. І навпаки, при зміні параметрів вітру змінюються вихідні параметри джерела електричної енергії: потужність, напруга, струм та електромагнітний момент.

References

1. 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. doi: 10.1016/j.nanoen.2021.105846.
2. Radwan-Pragłowska, N., Wegiel, T., Borkowski, D. (2020). Modeling of Axial Flux Permanent Magnet Generators. *Energies*, no. 13 (21), 5741-5745. doi: 10.3390/en13215741.
3. 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. doi: 10.1088/1742-6596/2388/1/012142.
4. S. Djebbari, J. F. Charpentier, F. Scullier 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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. doi: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L80363.

9. 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. doi: 10.37394/232016.2021.16.30.
10. Li, Zheng et al. 'Design and Analysis of Underwater Power Generation Characteristics of Deflected Double-stator Switched Reluctance Generator'. 1 Jan. 2022 : 1 – 20.
11. Widyanto, Aji & Ariwidayat, Rahmat & Husnayaian, Faiz & Rhardjo, Amien & Utomo, A.R. & Ardita, I. (2022). Designing Air-Cored Axial Flux Permanent Magnet Generator with Double Rotor. *ELKHA*. 14. 46. doi: 10.26418/elkha.v14i1.53048.
12. Ostroverkhov, M., Chumack, V., Falchenko, M., & Kovalenko, M. (2022). Development of control algorithms for magnetolectric generator with axial magnetic flux and double stator based on mathematical modeling. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(5 (120)), 6–17. doi: 10.15587/1729-4061.2022.267265.
13. V.M. Golovko, M.Ya. Ostroverkhov, M.A. Kovalenko, I.Ya. Kovalenko, D.V. Tsyplenkov Mathematical simulation of autonomous wind electric installation with magnetolectric generator // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2022, (5): 074 – 079. doi: 10.33271/nvngu/2022-5/074.
14. Setyawan, E. Y., Soleh, C., Krismanto, A. U., Sujana, I. W., Djiwo, S., & Prihatmi, T. N. (2022). Design and Performance Analysis of Double Axial Flux Permanent Magnet Generator. *Trends in Sciences*, 19(6), 3049. doi: 10.48048/tis.2022.3049
15. Prasetijo, Hari. (2022). Pengaruh Inti Stator Terhadap Performa Generator Magnet Permanen Fluks Aksial Satu Fasa. *JRST (Jurnal Riset Sains dan Teknologi)*. 6. 165. doi: 10.30595/jrst.v6i2.13668.
16. 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. doi: 10.14203/j.mev.2019.v10.17-23.
17. Lee, J.-Y.; Lee, J.-H.; Nguyen, T.K. Axial-Flux Permanent-Magnet Generator Design for Hybrid Electric Propulsion Drone Applications. *Energies* 2021, 14, 8509. doi: 10.3390/en14248509
18. Tokgoz, Furkan. (2022). Analytical Modelling and Multi-Objective Optimization of Axial-Flux Permanent Magnet Machine with Various PCB Stators and Development of a GaN Switched Integrated Motor Drive PCB Motor.
19. Kastawan, I & Rusmana. (2020). Pengujian pembangkitan tegangan generator axial-flux permanent magnet (AFPM) tiga-fasa ganda. *Jurnal Teknik Energi*. 6. 503-509. doi: 10.35313/energi.v6i2.1713.
20. Asfirane, S., Hlioui, S., Amara, Y., Gabsi, M. (2019). Study of a Hybrid Excitation Synchronous Machine: Modeling and Experimental Validation. *Mathematical and Computational Applications*, 24 (2), 34. doi: 10.3390/mca24020034
21. Wardach, M., Bonislowski, M., Palka, R., Paplicki, P., Prajzencanc, P. (2019). Hybrid Excited Synchronous Machine with Wireless Supply Control System. *Energies*, 12 (16), 3153. doi: 10.3390/en12163153
22. Chumack, Vadim and Bazenov, Volodymyr and Tymoshchuk, Oksana and Kovalenko, Mykhailo and Tsyvinskyi, Serhii and Kovalenko, Iryna and Tkachuk, Ihor, Voltage stabilization of a controlled autonomous magnetolectric generator with a magnetic shunt and permanent magnet excitation (2021). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(5 (114)), 56–62. doi: 10.15587/1729-4061.2021.246601 (ISSN 1729-3774).

Надійшла (received) 29.04.2024

Відомості про авторів / About the authors

Коваленко Михайло Анатолійович (Mykhaylo Kovalenko) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", доцент кафедри електромеханіки, тел.: (067) 656-36-51; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>; e-mail: kovalenko_ma@i.ua.

Ткачук Ігор Валерійович (Tkachuk Ihor) – аспірант кафедри електромеханіки, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", тел.: (097) 988-51-24; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5717-2458>; e-mail: baja0073@gmail.com.

Коваленко Ірина Яківна (Kovalenko Iryna) – асистент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", аспірант кафедри нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії, тел.: (097) 939-96-73; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>; e-mail: 2048141@ukr.net.

Жук Сергій Олександрович (Zhuk Serhiy) – менеджер ТОВ "НТТ Енергія", тел.: 099-489-39-15; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0409-5580>; e-mail: asmedia.zhuk@gmail.com.

Кришньов Олег Олександрович (Kryshnov Oleg) – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", 03056, м.Київ, пр. Перемоги 37, тел./факс +38-099-231-52-16, ORCID: 0009-0008-1140-5544, e-mail: okrihnov@gmail.com.