

РОЗРОБКА ЛІНЕАРИЗОВАНОЇ ДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ МАГНІТНОЇ ПЕРЕДАЧІ

¹Коваленко М.А., к.т.н., доц., ²Коваленко І.Я., ст. викладач, ³Святненко В.А., ст. викладач, ¹Базаров О.О., аспірант, ¹Тітов Є.О., аспірант

КПІ ім. Ігоря Сікорського, ¹кафедра електромеханіки, ²кафедра відновлюваних джерел енергії, ³кафедра теоретичної електротехніки

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. 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 не вигідним, а часто й просто неможливим. Наприклад, існуюча тенденція збільшення потужності одиничної установки у вітроенергетиці вимагає відмови від прямого приводу електроджерела електричної енергії а вітряної 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 порівняні з ними масогабаритні показники [7].

Мета дослідження. Розробка лінаризованої динамічної моделі магнітної передачі для оцінки її параметрів та характеристик. В якості об'єкта дослідження використовується магнітна передача коаксіального типу. Предметом дослідження є основні вихідні параметри та характеристики досліджуваної передачі.

Матеріали та результати досліджень. Об'єктом дослідження є магнітна передача, виконана за коаксіальною планетарною топологією. Основні розміри магнітної системи досліджуваної передачі наведено на Рис. 1.

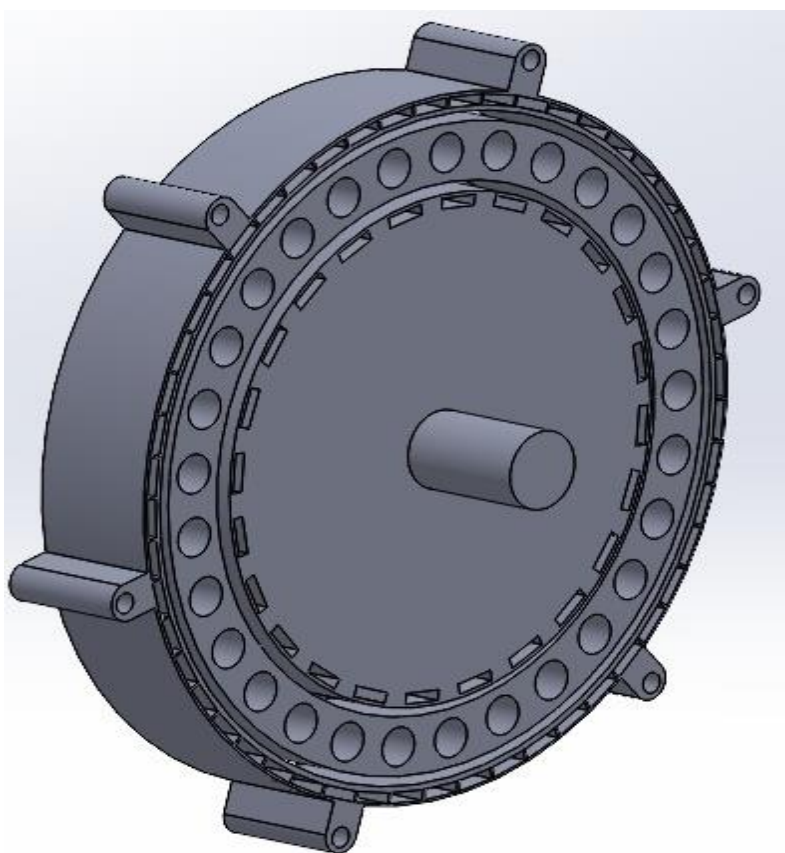


Рисунок 1 – Ескіз досліджуваного варіанта магнітної передачі

Динамічна модель магнітної передачі, заснована на нелінійній системі диференціальних рівнянь [8], дозволяє отримати точний результат з мінімальними спрощеннями. Однак така модель незручна для використання на початкових етапах проєктування з метою первинної оцінки параметрів коливань. Для цих цілей зручніше скористатися лінаризованою динамічною моделлю, в якій співвідношення між моментом, що виникає, і кутом навантаження представлене несинусоїдальною 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.

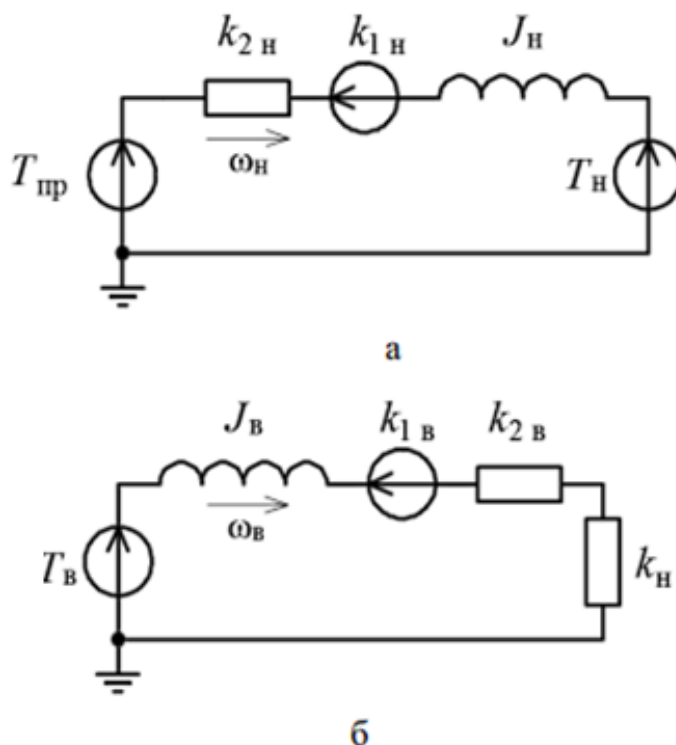


Рисунок 2 – Еквівалентні схеми механічних підсистем роторів магнітної передачі: а – низькошвидкісного; б – високошвидкісного

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.

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:

$$T_{\dot{в}} = T_{н} = -i \cdot T_{в} \quad (1)$$

де $T_{\dot{в}}$ – приведений момент високошвидкісного ротора, Н·м.

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

$$T_B \cdot \omega_B = T_B \cdot \omega_B \quad (2)$$

де ω_B – приведена кутова швидкість високошвидкісного ротора, рад/с.

Зі співвідношень (1) і (2) випливає:

$$\omega_B = \frac{\omega_B}{i}. \quad (3)$$

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

Відповідно до ЛАЧХ системи резонансна частота становила 76,3 Гц. Похибка щодо нелінійної моделі становить 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 гілці 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 проєктування можна знехтувати гілкою високошвидкісного ротора та скористатися спрощеною еквівалентною схемою (Рис. 3).

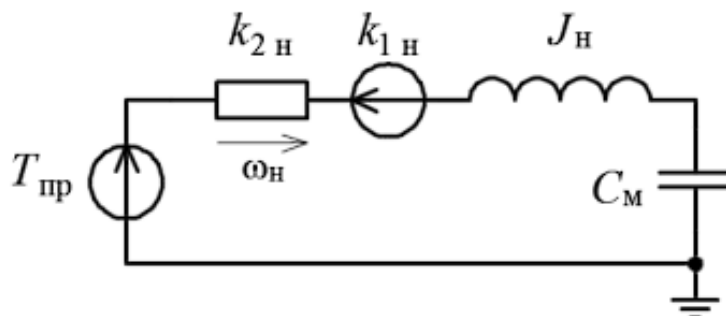


Рисунок 3 – Спрощена еквівалентна схема магнітної передачі

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.

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

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.

Висновки. 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.

Перелік посилань

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, <https://doi.org/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. <https://doi.org/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. 10.1088/1742-6596/2388/1/012142.
4. 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 magnetoelectric 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).
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. 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>.