

# МОМЕНТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНІТНОГО РЕДУКТОРА ПРИ РІЗНИХ КОНФІГУРАЦІЯХ ЙОГО МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ

Гайденко Ю.А., к.т.н., доцент, Семенюк О.С., магістрант  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра електромеханіки

**Вступ.** Магнітні передачі на основі постійних магнітів стають дуже популярними і перспективними, оскільки вони здатні передавати крутний момент без механічного контакту, не створюють додаткового шуму, не потребують змащування, мають високий ККД і надійність, більш довговічні, що дає можливість використовувати їх замість механічних редукторів, в тому числі для малопотужних автономних електрогенеруючих установок.

Разом з тим, через конструктивні особливості, під час його роботи магнітного редуктора виникають пульсації переданого крутного моменту. Основною причиною пульсацій є наявність зубцевого моменту. Тому при проектуванні магнітного редуктора слід прагнути до того, щоб величина зубцевого моменту була мінімальною, оскільки він викликає вібрації і шум в обладнанні і призводить до погіршення експлуатаційних характеристик магнітного редуктора, а отже, знижує ККД всієї установки.

**Мета роботи** – для заданих габаритів магнітного редуктора (зовнішній діаметр, осьова довжина редуктора) визначити конфігурацію і розміри магнітної системи, за якої досягаються задані значення моментів редуктора і забезпечується технологічність виготовлення і складання.

**Матеріали та результати досліджень.** На *рис. 1* показано загальний вигляд магнітного редуктора. Він має внутрішній високошвидкісний (ВШ) ротор, що складається з ярма (сталевго замкача) і постійних магнітів та зовнішній низькошвидкісний (НШ) ротор, що так само складається з постійних магнітів і ярма (сталевго замкача), а також модулятора зі сталевих нерухомих сегментів.

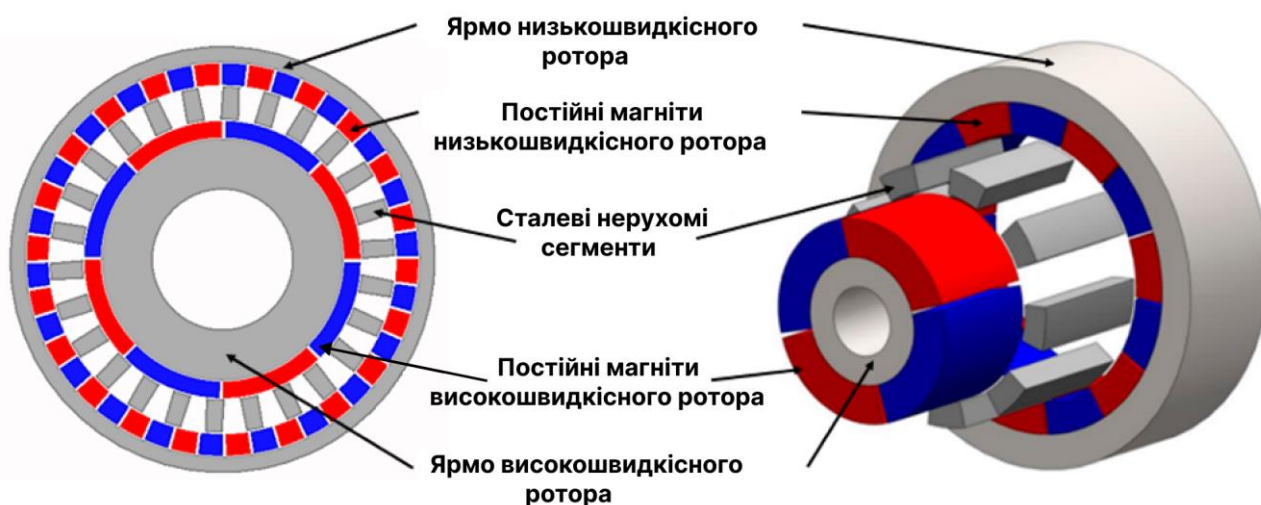


Рисунок 1 – Загальний вигляд магнітного редуктора

Передавальне відношення магнітного редуктора і число нерухомих сталевих сегментів визначається співвідношенням між числом пар полюсів на НШ (зовнішньому) і ВШ (внутрішньому) роторі [9]:

$$G_{\text{мр}} = p_{\text{вш}}/p_{\text{нш}}; \quad \omega_{\text{вш}} = - G_{\text{т}} \omega_{\text{нш}}; \quad n_s = p_{\text{нш}} + p_{\text{вш}},$$

де  $G_{\text{мр}}$  – передавальне відношення магнітного редуктора;  $p_{\text{нш}}$  – число пар полюсів НШ ротора;  $p_{\text{вш}}$  – число пар полюсів ВШ ротора;  $n_s$  – число нерухомих сталевих сегментів;  $\omega_{\text{нш}}$  – частота обертання НШ ротора;  $\omega_{\text{вш}}$  – частота обертання ВШ ротора (низькошвидкісний і високошвидкісний ротор обертаються в протилежних напрямках).

Конфігурація магнітної системи магнітного редуктора істотно впливає на його характеристики [8-9]. Вітрогенератори як з горизонтальною, так і з вертикальною віссю обертання, частота обертання яких за середньої швидкості вітру  $V = 5 \dots 10$  м/с досить мала і становить приблизно  $n = 300$  об/хв. Тихохідний електрогенератор для вітроустановки з такою частотою обертання при безпосередньому з'єднанні валу вітрової турбіни і електрогенератора має велику кількість полюсів і досить великі габарити.

Параметри досліджуваного редуктора: товщина постійних магнітів, висота нерухомих сталевих сегментів, варіювалися таким чином, щоб забезпечити величину електромагнітного моменту на зовнішньому низькошвидкісному роторі не менше, ніж  $M_{\text{НШmax}} = 200$  Н·м. При цьому задавалися такі співвідношення числа пар полюсів редуктора ( $p_{\text{вш}} / p_{\text{нш}}$ ): (3 / 26); (3 / 27); (4 / 34); (4 / 35). Величина зазору між зовнішнім ротором і сталевими сегментами  $\delta_1 = 1$  мм, а також між внутрішнім ротором і сталевими сегментами  $\delta_2 = 1$  мм.

Найважливішими характеристиками магнітного редуктора як пристрою, що передає і перетворює механічну енергію обертання, є залежності моментів, що діють на його ротори як функції положення (кутів повороту роторів) [3]. Це періодичні функції, максимуми і мінімуми яких за однакових геометричних розмірів і використовуваних матеріалах залежать від співвідношення кількостей пар полюсів на роторах магнітного редуктора.

Проведення досліджень характеристик магнітного редуктора було здійснено в пакеті COMSOL Multiphysics. На *рис. 2* наведено максимальні значення моментів на високошвидкісному  $M_{(\text{ВШ})\text{max}}$  та низькошвидкісному  $M_{(\text{НШ})\text{max}}$  роторі для різних співвідношень пар полюсів.

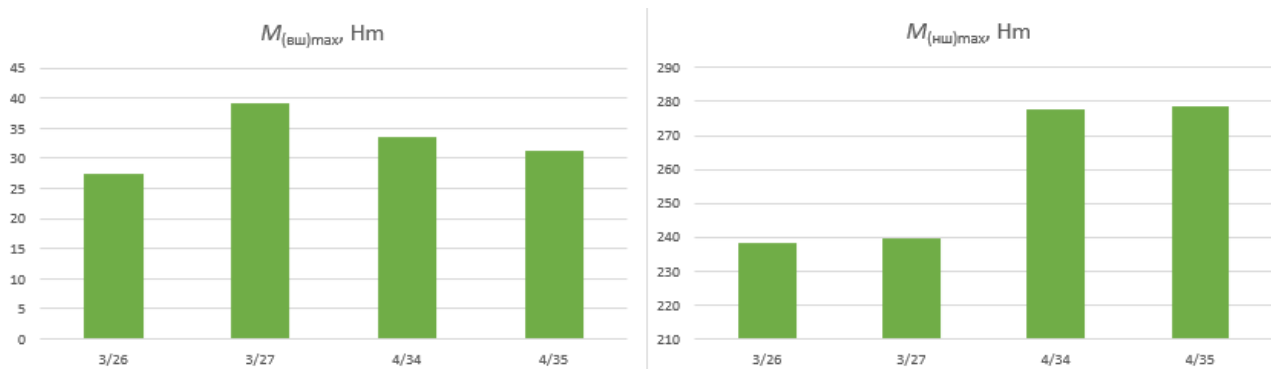


Рисунок 2 – Залежність максимальних значень моменту на високошвидкісному ( $M_{(вш)max}$ ), та низькошвидкісному ( $M_{(нш)max}$ ) роторі

Як видно з діаграм, всі співвідношення числа пар полюсів редуктора ( $p_{ВШ}/p_{НШ}$ ), що розглядалися, дають необхідне значення моментів, як на ВШ, так і на НШ роторі.

Разом з тим, для цілочисельних значень коефіцієнта редукції (в нашому випадку це  $p_{НШ}/p_{ВШ} = 27/3 = 9$ ) присутнє явище зубцевого моменту, що проявляється в появі пульсацій залежності загального крутного моменту від кута навантаження (рис. 3). Таке явище можна пояснити тим, що при цілочисельних значеннях коефіцієнта редукції кожен із полюсів ротора перебуває в геометрично однаковому положенні щодо нерухомих феромагнітних елементів модулятора і моменти, що діють на ці полюси, мають однакові знаки і підсумовуються. Для нецілочисельних значень коефіцієнта редукції моменти, що діють на полюси через їхнє різне положення відносно феромагнітних елементів модулятора, різноспрямовані, і результуючий момент виявляється меншим [6], що продемонстровано на рис. 3.

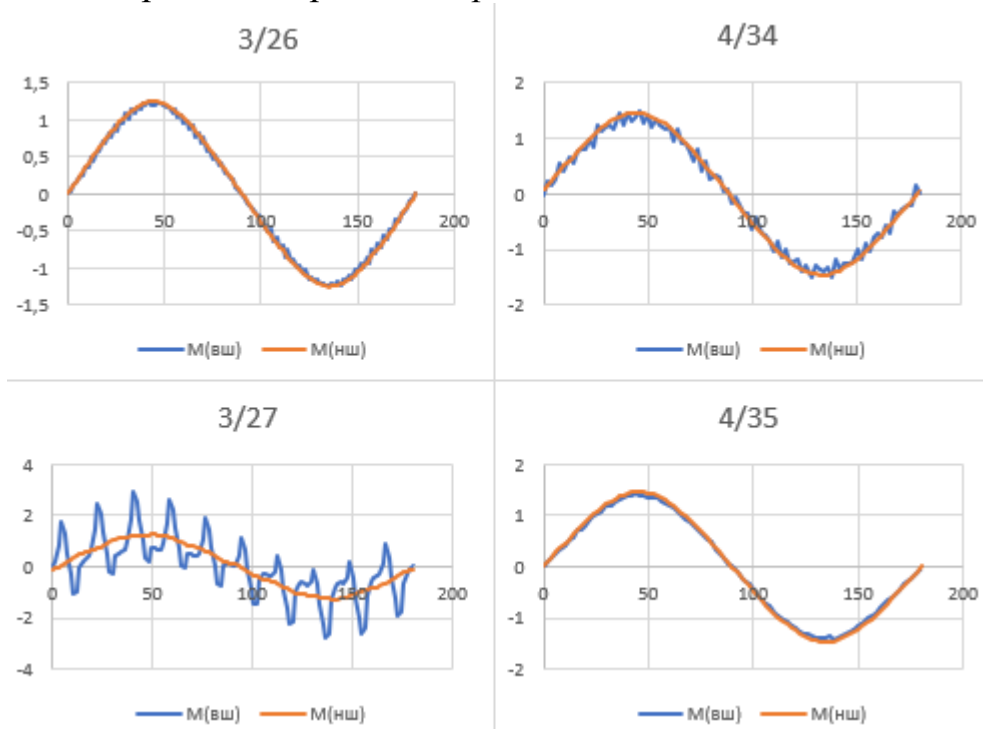


Рисунок 3 – Кутові характеристики для моментів магнітних редукторів з співвідношеннями чисел пар полюсів: (3 / 26); (3 / 27); (4 / 34); (4 / 35)

У результаті досліджень, було визначено, що найменші пульсації моменту на низькошвидкісному та високошвидкісному роторах магнітного редуктора отримуємо при співвідношення числа пар полюсів (3 / 26) і (4 / 35).

На *рис. 4* представлено загальну картину розподілу магнітного поля редуктора, отриману в результаті моделювання методом кінцевих елементів за допомогою програмного пакета COMSOL Multiphysics. При цьому враховувалися нелінійні магнітні характеристики як електротехнічної сталі, так і постійних магнітів.

Результати моделювання показали, що середнє значення магнітної індукції у феромагнітних елементах роторів магнітного редуктора не перевищує  $1,6 \text{ Тл}$ , модулятора –  $1,7 \text{ Тл}$ , істотних потоків розсіювання не спостерігається. Таким чином, задані геометричні параметри редуктора дозволяють концентрувати магнітне поле в сталевих елементах модулятора і забезпечують ефективну передачу крутного моменту від одного ротора до іншого.

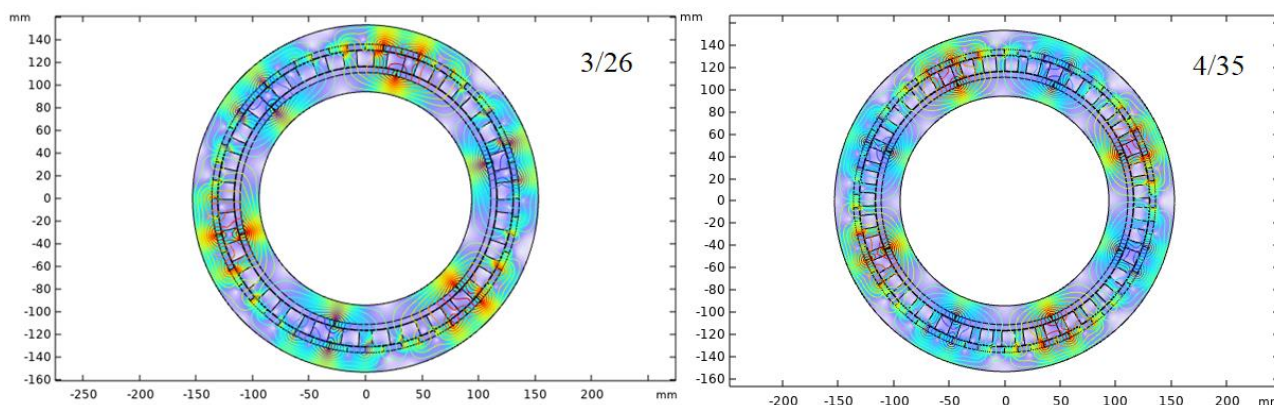


Рисунок 4 – Розподіл магнітної індукції (колір) і векторного магнітного потенціалу (ізолінії) в поперечному перерізі редуктора для співвідношення пар полюсів (3/26) і (4 / 35)

Однією з переваг магнітного редуктора перед механічним є те, що під час перевантаження не відбувається механічного руйнування його елементів, просто припиняється передача механічної енергії обертання від одного ротора іншому [2]. Після зниження зовнішнього навантаження до допустимих меж відбувається відновлення обертання веденого ротора на відповідній швидкості.

Основні розміри редуктора (3/26) такі: число пар полюсів низькошвидкісного ротора –  $p_{\text{нш}} = 26$ ; число пар полюсів високошвидкісного ротора –  $p_{\text{вш}} = 3$ ; зовнішній діаметр низькошвидкісного ротора – 306 мм; внутрішній діаметр низькошвидкісного ротора – 262 мм; зовнішній діаметр високошвидкісного ротора – 232 мм; товщина магнітів – 5 мм; робочі зазори – 1 мм; аксіальна довжина редуктора – 15 мм.

У результаті моделювання отримано такі результати: максимальний момент на високошвидкісному роторі –  $27,85 \text{ Н*м}$ , а максимальний момент на низькошвидкісному роторі –  $238,46 \text{ Н*м}$ .

Таким чином, у ході дослідження визначено оптимальні геометричні параметри магнітного редуктора, за яких забезпечується задане значення

електромагнітного моменту на низькошвидкісному роторі за мінімального значення зубцевого моменту. Крім того, визначено конфігурацію модулятора, яка забезпечує задані характеристики редуктора.

#### **Висновки:**

1. Виявлено, що значення зубцевого моменту суттєво залежать від співвідношення числа пар полюсів на високошвидкісного і низькошвидкісного ротора редуктора ( $p_{ВШ}/p_{НШ}$ ).

2. Визначено оптимальні параметри магнітної системи, які забезпечують передачу необхідної потужності, тобто заданий крутний момент для номінальної частоти обертання при мінімальних пульсаціях цього моменту.

3. При проектуванні магнітного редуктора для електрогенеруючих установок необхідно уточнювати розміри магнітної системи з урахуванням габаритів корпусу установки.

#### **Перелік посилань.**

1. Magnetic gear technologies: A review Conference Paper (PDF Available) September 2014 with 1,974 Reads DOI: 10.1109/ICELMACH.2014.6960233

2. Investigation of the impact of the magnetic system configuration on the magnetic gear torque characteristics // V. V. Grebrikov, R. V. Gamaliia // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2019. – No. 4 (1329). – P. 68-74. – Bibliogr.: 13. – ISSN 2409-9295.

3. F. T. Jorgensen. The Cycloid Permanent Magnetic Gear / F. T. Jorgensen, T. O. Andersen, P. O. Rasmussen // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2008. – vol. 44. – No. 6. – pp. 1659-1665. doi: 10.1109/TIA.2008.2006295.

4. Sung Jin Kim. Transfer Torque Performance Comparison in Coaxial Magnetic Gears With Different Flux-Modulator Shapes / Sung Jin Kim, Eui-Jong Park, Sang-Yong Jung, Yong-Jae Kim // IEEE Transactions on Magnetics. – 2017. – vol. 53. – No. 6. – pp. 1-4. doi: 10.1109/CEFC.2016.7816184.

5. C. Liu. Design Assessments of a Magnetic-Geared Double-Rotor Permanent Magnet Generator / C. Liu, H. Chung, C. Hwang // IEEE Transactions on Magnetics. – 2014. – vol. 50. – No. 1. – pp. 1-4. doi: 10.1109/TMAG.2013.2279260.

6. Laxman Shah. A Variable Speed Magnetic Gear Box Using Contra-Rotating Input Shafts / Laxman Shah, Andrew Cruden, Barry W. Williams // IEEE Transactions on Magnetics. – 2013. – vol. 47. – No. 2. – pp. 431-438. doi:10.1109/TMAG.2010.2097273.

7. V. Acharya. A Flux Focusing Axial Magnetic Gear / V. Acharya, J. Bird, M. Calvin // IEEE Transactions on Magnetics. – 2013. – vol. 49. – No 7. – pp. 4092-4095. doi: 10.1109/TMAG.2013.2248703.

8. Grebenikov V.V. Design of the electric motor with permanent magnets for electric vehicle according the driving cycle / V.V. Grebenikov, M. V. Priymak // Техн. електродинаміка. – 2018. – № 5. – С. 65-68.

9. Grebenikov V.V., Gamaleya R.V. Investigation of the influence of of the magnetic system configuration on the torque characteristics of the magnetic reducer // Bulletin of the National Technical National Technical University "KhPI": Collection of scientific papers, Issue 4 (2019). Series: Electric machines and electromechanical energy conversion. 2019. – P. 68 – 74.