

# ВИКОРИСТАННЯ МАГНІТНИХ РЕДУКТОРІВ ДЛЯ МАЛОПОТУЖНИХ АВТОНОМНИХ ЕЛЕКТРОГЕНЕРУЮЧИХ УСТАНОВОК

Гайденко Ю.А., к.т.н., доцент, Семенюк О.С., магістрант

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра електромеханіки*

**Вступ.** В сучасному світі, через постійно зростаючу потребу в електроенергії виникає проблема надійного енергозабезпечення та ефективного використання енергоресурсів. Особливо ця задача є актуальною в умовах, коли традиційні джерела енергії можуть бути неефективними або недоступними. Саме тоді доцільним є використання автономних електрогенеруючих установок, таких як, наприклад, вітрогенератори, в тому числі малої потужності.

До автономних електрогенеруючих установок окрім показників енергоефективності пред'являються додаткові вимоги, а саме: обмежені габаритні розміри та зниження рівня акустичного впливу на навколишнє середовище. Для досягнення останніх вимог, перспективним є заміна механічних редукторів і мультиплікаторів їх магнітними аналогами, які в літературі називаються – *магнітні редуктори*.

Дана робота присвячена дослідженню та аналізу використання магнітних редукторів, що працюють в складі малопотужних автономних електрогенеруючих установок. Магнітні редуктори, завдяки своїй унікальній конструкції та принципу роботи, відкривають нові можливості для поліпшення ефективності, надійності та тривалості служби таких установок.

**Метою роботи** є аналіз можливостей та доцільності використання магнітних редукторів для поліпшення ефективності та надійності малопотужних автономних електрогенеруючих установок.

**Матеріали та результати досліджень.** Насьогодні, набуває все більш широкого використання малопотужні вітро- та гідрогенератори потужністю 3 ... 4 кВт, як в якості резервних джерел електроенергії, так і для електропостачання віддалених споживачів. Однак, для того, щоб ці системи здатні були конкурувати, наприклад, з сонячними автономними джерелами електропостачання, то важливою задачею є зменшення їх вартості [6].

Оскільки вітроротори зазвичай обертаються зі швидкістю 100 ... 300 об/хв, а гідротурбіни в діапазоні 100 ... 800 об/хв, то одним із можливих способів зниження вартості вітроустановки є заміна тихохідного багатополусного генератору на високошвидкісний, що працює в парі з підвищувальним магнітним редуктором (мультиплікатором). У цьому разі економія за рахунок зменшення мас активних матеріалів може становити до 50% [5, 6]. При цьому використовуваний магнітний редуктор (МР) повинен забезпечувати передачу заданого значення механічної потужності.

Як і будь-який редуктор, МР має обертову частину, що має більшу швидкість обертання та обертову частину з меншою швидкістю обертання. Далі в тексті, обертову частину (ротор) з більшою швидкістю обертання називатимемо *високошвидкісний ротор (ВР)*, а з меншою швидкістю –

низькошвидкісний ротор (НР). В конструкції магнітного редуктора, що розглядалася ВР є внутрішнім, а НР – зовнішнім.

В роботі було розглянуто циліндричні магнітні редуктори з двома, трьома і чотирма парами полюсів на ВР, здатні передавати 4 кВт механічної потужності за швидкості обертання НР 200 об/хв. У табл. 1 наведено основні параметри досліджуваних МР, а саме: в першій колонці наведено число пар полюсів на ВР і НР роторі, наприклад, запис – 2/17 відповідає тому, що на ВР 2 пари полюсів, а на НР 17 пар полюсів. Коефіцієнт редукції в цьому випадку дорівнює  $K_{ред} = p_{НР}/p_{ВР} = 17/2 = 8,5$ , де  $p_{ВР}$  – число пар полюсів високошвидкісного ротора;  $p_{НР}$  – число пар полюсів низькошвидкісного ротора [3].

Таблиця 1

МР	$K_{ред}$	$n_{НР}$ , об/хв	$n_{ВР}$ , об/хв	$P_{ном}$ , Вт	$M$ , Нм
<b>2 / 17</b>	8,5	200	1700	4000	14,62
<b>2 / 19</b>	9,5	200	1900	4000	14,03
<b>3 / 26</b>	8,66	200	1733	4000	20,51
<b>3 / 27</b>	9	200	1800	4000	20,31
<b>4 / 34</b>	8,5	200	1700	4000	28,62
<b>4 / 35</b>	8,75	200	1750	4000	28,46

В останньому стовпчику цієї таблиці наведено мінімально можливі значення моменту на високошвидкісному роторі, необхідні для передачі 4 кВт механічної потужності. Відповідно до цього було проведено попередні розрахунки магнітних редукторів і визначено їхні основні параметри: зовнішній діаметр – 306 мм, діаметр зовнішній високошвидкісного ротора – 232 мм, магніти марки N42 товщиною 5 мм, зовнішній діаметр модулятора – 262 мм, товщина модулятора – 28 мм.

На рис. 1 показано результати моделювання магнітного поля в поперечному перерізі магнітних редукторів, зокрема кольором позначена магнітна індукція (Тл), а ізолініями – векторний магнітний потенціал (Вб/м). На рис. 1 приведені магнітні редуктори зі співвідношеннями пар полюсів 2/17, 3/26 і 4/35. Моделювання проводилось за допомогою широковідомого програмного пакету COMSOL Multiphysics.

Одними з основних характеристик МР є його статичні моментні характеристики (СМХ), які відображають залежність електромагнітного моменту від кута навантаження. Однак дані характеристики для низькошвидкісного ротора практично не залежать від коефіцієнта редукції і визначаються тільки геометричними параметрами (діаметром ротора, товщиною магнітів, величиною повітряного зазору тощо).

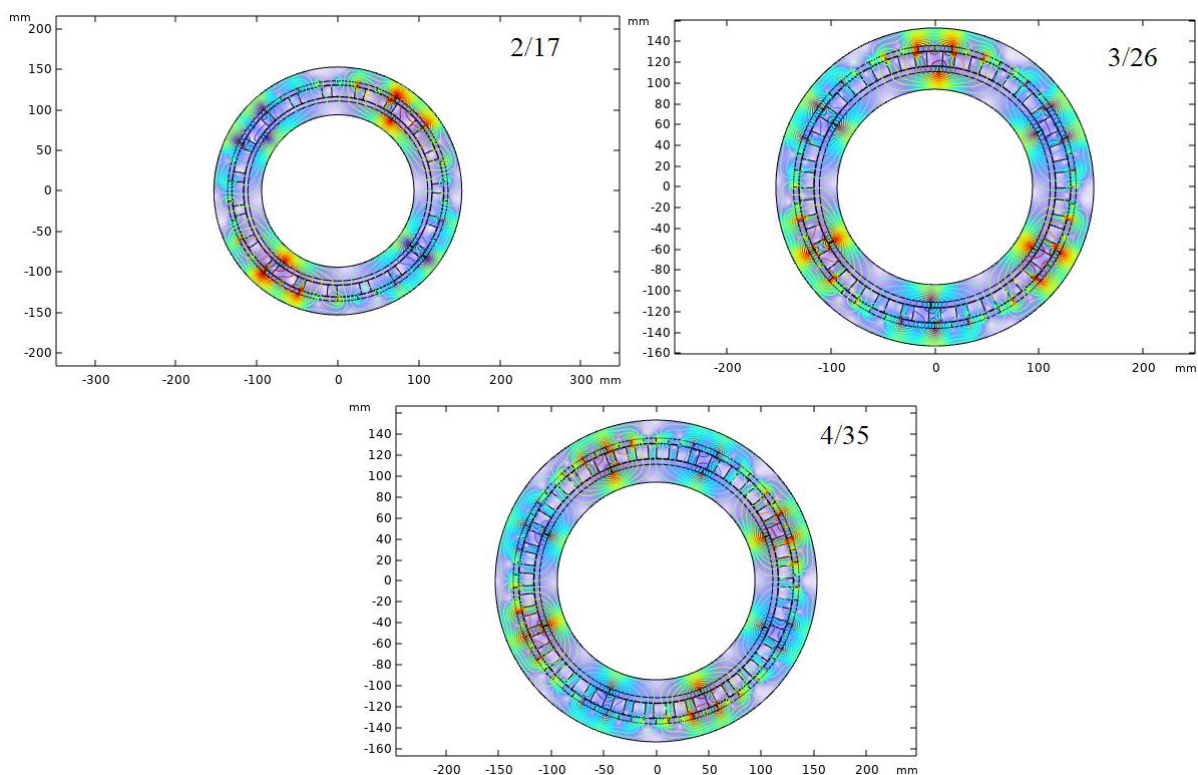


Рисунок 1 – Магнітне поле в поперечному перерізі магнітних редукторів зі співвідношеннями пар полюсів (2/17, 3/26 і 4/35)

На рис. 2 показано розрахункові СМХ редукторів із двома парами полюсів на високошвидкісному роторі (синя крива) і на низькошвидкісному роторі (помаранчева крива). На рис. 3 представлено СМХ для магнітних редукторів із трьома парами полюсів, а на рис. 4 – з чотирма.

Результати моделювання показали, що редуктори з цілими коефіцієнтами редукції (наприклад,  $K_{ред} = 9$ ) хоч і мають вищі максимальні значення моментів на ВР, проте також мають суттєві пульсації моменту. Так, на рис. 3 для магнітного редуктора з коефіцієнтом редукції  $K_{ред} = 27/23 = 9$ , помітні значні пульсації. Ці пульсації пов'язані з наявністю так званого зубцевого моменту (ЗМ) [5] – електромагнітного моменту, викликаного взаємодією постійних магнітів ротора зі сталевими елементами модулятора. Для МР зубцевий момент кожного з роторів визначається як момент, необхідний для утримання відповідного ротора в заданому положенні в той час, як інший ротор перебуває в положенні магнітної рівноваги [6].

Очевидно, що магнітні редуктори з підвищеними рівнями пульсацій моменту рекомендувати для використання в енергетичних установках не можна, оскільки це спричинить погіршення віброакустичних показників та зниження надійності такої установки.

На рис. 5 наведені графіки просторових гармонік для обох повітряних зазорів магнітних редукторів з відношенням пар полюсів (3/26, 4/35). Домінуючими для передачі крутного моменту є 1 гармоніка. Існують інші гармоніки, проте їх вплив не є значним оскільки вони не сполучаються з жодною в гармонікою поля в зовнішньому зазорі [2].

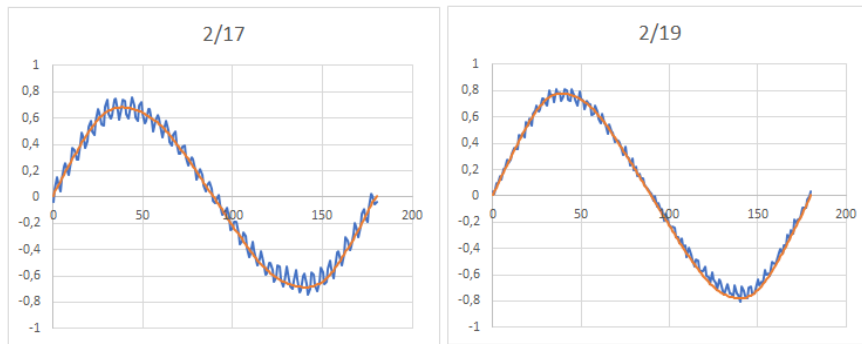


Рисунок 2 – СМХ редукторів із двома парами полюсів на ВР

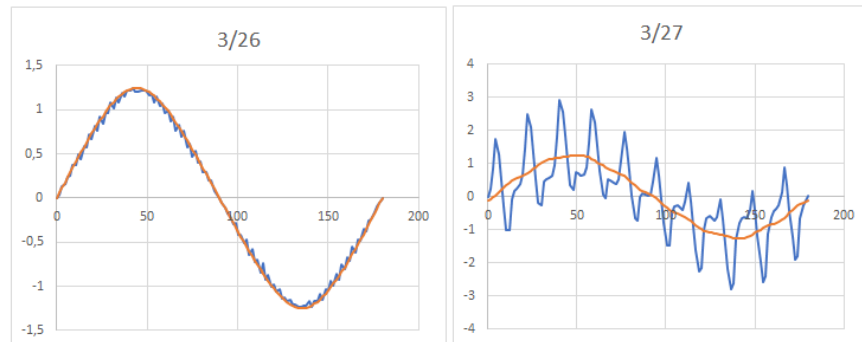


Рисунок 3 – СМХ редукторів із трьома парами полюсів на ВР

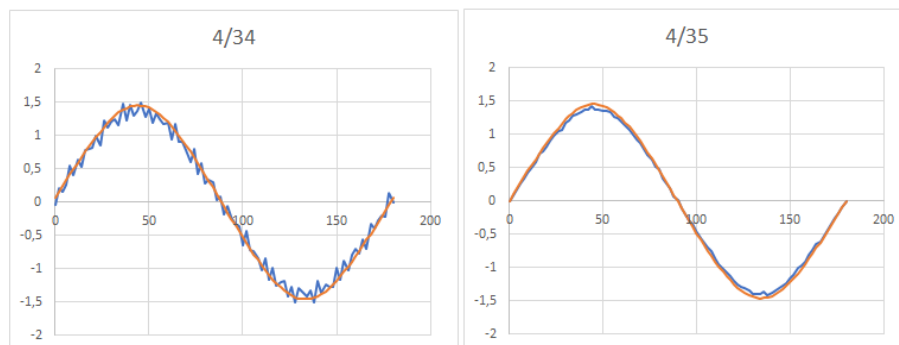


Рисунок 4 – СМХ редукторів із чотирма парами полюсів на ВР

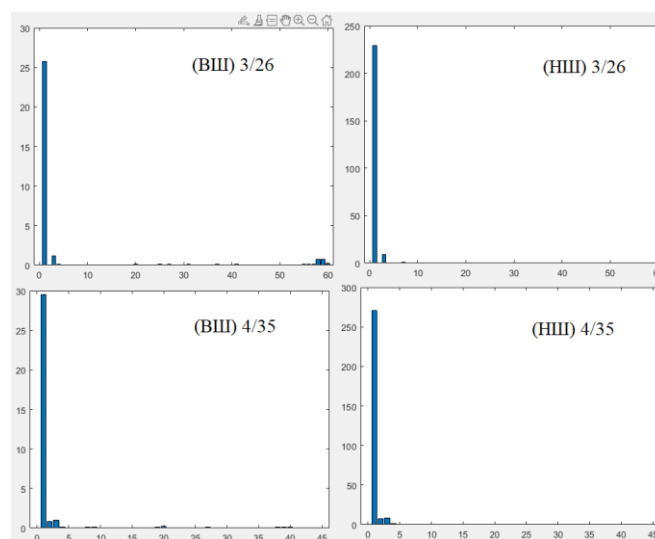


Рисунок 5 – Спектр СМХ для ВР і НР магнітних редукторів з відношенням пар полюсів (3/26, 4/35)

### **Висновки:**

1. Магнітні редуктори однозначно є перспективним рішенням для малопотужних автономних електрогенеруючих установок, оскільки вони дозволяють зменшити габарити, покращити ефективність, надійність та віброакустичні показники таких систем.

2. Використання магнітних редукторів допомагає знизити втрати енергії, підвищити тривалість служби та знизити необхідність у технічному обслуговуванні установок.

3. Магнітні редуктори з цілими значеннями коефіцієнта редукції (наприклад,  $K_{ред} = 27/23 = 9$ ), зважаючи на високі значення зубцевого моменту, мають явно виражені пульсації електромагнітного моменту, а тому мають менші можливості щодо потужності, що передається, і не рекомендуються для використання. Найкращими показниками володіють редуктори зі співвідношеннями пар полюсів 3/26 і 4/35.

### **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. S. Gerber, R. Wang. Cogging Torque Definitions for Magnetic Gears and Magnetically Geared Electrical Machines // IEEE Transactions on Magnetics, vol. 54, no. 4, pp. 1-9, April 2018, Art no. 8103209.doi: 10.1109/TMAG.2017.2784823

3. O. Dobzhanskyi, Eklas Hossain, E. Amiri, R. Gouws, V. Grebenikov, L. Mazurenko, M. Pryjmak, R. Gamaliia. Axial-Flux PM Disk Generator With Magnetic Gear for Oceanic Wave Energy Harvesting // IEEE Access, vol. 7, pp. 44813-44822, 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2908348.

4. M. Desvaux, R. Le Goff Latimier, B. Multon, S. Sire, H. Ben Ahmed. Analysis of the dynamic behaviour of magnetic gear with nonlinear modelling for large wind turbines // XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Lausanne. – 2016. – pp. 1332-1338. doi: 10.1109/ICELMACH.2016.7732697

5. 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.

6. Grebenikov V.V., Gamaley 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.