

*І.В. ТКАЧУК, М.А. КОВАЛЕНКО*

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕДУКТОРЫ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В данный час из-за подорожания электроэнергетики ветрогенераторы малой мощности (1-5 кВт) часто используются для обеспечения потребителей электроэнергией. В этом случае используются ветрогенераторы как с горизонтальной, так и с вертикальной осями вращения, частота вращения которых при средней скорости ветра  $V = 5 \div 10$  м/с и достаточно низкой и составляет примерно  $n = 100 - 300$  об/мин. Низкоскоростной электрогенератор для ветрогенератора с такой скоростью вращения с прямым подключением вала ветрового ротора и электрогенератора имеет большое количество полюсов и достигает достаточно больших размеров. Поэтому увеличительные редукторы (мультиплексоры) часто используются и позволяют увеличить скорость вращения электрического генератора в несколько раз и, тем самым, уменьшить массу его активной части, поскольку электромагнитный момент пропорционален объему электрической машины. Однако механические коробки передач являются источником дополнительного шума, требуют довольно частого обслуживания и уменьшают долговечность ветрогенератора. В данной статье будут использованы редукторы на постоянных магнитах для ветрогенераторов, которые в отличие от механических редукторов, не создают дополнительных шумов, не требуют смазки, их долговечность выше, эксплуатационные расходы также значительно уменьшаются, тогда как магнитный редуктор можно интегрировать с электрическим генератором. Например, при мощности ветрового ротора  $P = 4$  кВт и частоте вращения  $n = 100-300$  об/мин, высокоскоростной электрический генератор и магнитный редуктор имеют примерно в 2 раза меньшую общую массу магнитов и в 1,7 раза меньше общую массу активных материалов (магнитный редуктор + электрический генератор), чем низко скоростной многополюсный внешний электрогенератор. Целью исследования является разработка и внедрение электромагнитного редуктора в электромеханических системах. Основой таких систем являются высококоэрцитивные магниты.

Для достижения этой цели ставят следующие задачи:

- литературно-патентный поиск по теме исследования;
- выбор прототипа магнитного редуктора и расчет его основных параметров;
- разработка графических и численных моделей для оценки эффективности разработанного прототипа;
- оптимизация конструкции магнитного редуктора;
- разработка системы преобразования механической энергии с низким потенциалом в электрическую;
- прототипирование и экспериментальные исследования системы преобразования механической энергии с низким потенциалом в электрическую.

**Ключевые слова:** магнитный редуктор, электромагнитный редуктор, высококоэрцитивные, низко потенциалные, мультиплексоры, ветрогенератор.

*І.В. ТКАЧУК, М.А. КОВАЛЕНКО*

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕДУКТОРЫ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В настоящее время из-за подорожания электроэнергии ветрогенераторы малой мощности (1-5 кВт) часто используются для снабжения потребителей электроэнергией. В этом случае используются ветрогенераторы как с горизонтальной, так и с вертикальной осями вращения, частота вращения которых при средней скорости ветра  $V = 5 \div 10$  м/с и достаточно низкой и составляет примерно  $n = 100 - 300$  об/мин. Низкоскоростной электрогенератор для ветрогенератора с такой скоростью вращения с прямым подключением вала ветрового ротора и электрогенератора имеет большое количество полюсов и достигает достаточно больших размеров. Поэтому увеличительные редукторы (мультиплексоры) часто используются и позволяют увеличить скорость вращения электрического генератора в несколько раз и, тем самым, уменьшить массу его активной части, поскольку электромагнитный момент пропорционален объему электрической машины. Однако механические коробки передач являются источником дополнительного шума, требуют довольно частого обслуживания и уменьшают долговечность ветрогенератора. В данной статье будут использованы редукторы на постоянных магнитах для ветрогенераторов, которые в отличие от механических редукторов, не создают дополнительных шумов, не требуют смазки, их долговечность выше, эксплуатационные расходы также значительно уменьшаются, тогда как магнитный редуктор можно интегрировать с электрическим генератором. Например, при мощности ветрового ротора  $P = 4$  кВт и частоте вращения  $n = 100-300$  об/мин, высокоскоростной электрический генератор и магнитный редуктор имеют примерно в 2 раза меньшую общую массу магнитов и в 1,7 раза меньше общую массу активных материалов (магнитный редуктор + электрический генератор), чем низко скоростной многополюсный внешний электрогенератор. Целью исследования является разработка и внедрение электромагнитного редуктора в электромеханических системах. Основой таких систем является высококоэрцитивные магниты.

Для достижения этой цели ставят следующие задачи:

- литературно-патентный поиск по теме исследования;
- выбор прототипа магнитного редуктора и расчет его основных параметров;
- разработка графических и численных моделей для оценки эффективности разработанного прототипа;
- оптимизация конструкции магнитного редуктора;
- разработка системы преобразования механической энергии с низким потенциалом в электрическую;
- прототипирование и экспериментальные исследования системы преобразования механической энергии с низким потенциалом в электрическую.

**Ключевые слова:** редуктор магнитный, редуктор электромагнитный, высоковольтный, низкочастотный, мультиплексоры, ветрогенератор.

*І.В. ТКАЧУК, М.А. КОВАЛЕНКО*

## ELECTROMAGNETIC REDUCERS IN ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

Currently, due to the rising cost of electricity, low-power wind turbines (1-5 kW) are often used to supply consumers with electricity. In this case, wind turbines are used with both horizontal and vertical axes of rotation, the speed of which at an average wind speed  $V = 5 \div 10$  m/s and is quite low, and is approximately  $n = 100 - 300$  rpm. A low-speed electric generator for a wind generator with such a speed of rotation with a direct connection of the wind rotor shaft and the electric generator has a large number of poles and reaches a fairly large size. Therefore, magnifying gears (multi-plexers) are often used and can increase the speed of the electric generator several times and, thus, reduce the mass of its active part, because the electromagnetic moment is proportional to the volume of the electric machine. However, manual transmissions are a source of additional noise, require frequent maintenance and reduce the durability of the wind turbine. This article will use permanent magnet reducers for wind turbines, which, unlike mechanical reducers, do not create additional noise, do not require lubrication, their durability is higher, operating costs are also significantly

© І.В. Ткачук, М.А. Коваленко, 2021

reduced, while the magnetic reducer can be integrated with an electric generator. at a wind rotor power  $P = 4$  kW and speed  $n = 100-300$  rpm, high-speed electric generator and magnetic reducer have approximately 2 times less total weight of magnets and 1.7 times less total weight of active materials (magnetic reducer + electric generator) than a low-speed multipole external generator. The aim of the study is to develop and implement an electromagnetic reducer in electromechanical systems. The basis of such systems are high-coercive magnets.

To achieve this goal, the following tasks are set:

- literary-patent search on the research topic;
- selection of a prototype of a magnetic reducer and calculation of its main parameters;
- development of graphical and numerical models to evaluate the effectiveness of the developed prototype;
- optimization of the design of the magnetic reducer;
- development of a system for converting mechanical energy with low potential into electricity;
- prototyping and experimental studies of the system of conversion of mechanical energy with low potential into electrical energy.

**Key words:** magnetic gear, electromagnetic reducer, high-coercive, low-potential, multiplexers, exhaust generator.

**Вступ.** Магнітні редуктори представляли інтерес з початку 20 століття, причому найперші конструкції були дуже простими для звичайних механічних зубчастих коліс із зубцями шестерні, заміненими на магнітні аналоги [1, 2]. Однак цим конструкціям приділялося мало уваги, швидше за все, через низьку щільність крутного моменту, досягнуту внаслідок наявних на той час матеріалів з постійними магнітами (ПМ) (а

саме SmCo5). Новий інтерес виник у 1980-х роках з розробкою магнітного матеріалу з неодимового бору заліза (NdFeB), хоча конструкції все ще залежать від прямого механічного заміщення, що призводить до поганого використання ПМ і ніколи не досягає щільності крутного моменту, достатньої для конкуренції з традиційними механічними альтернативами. [3, 4]

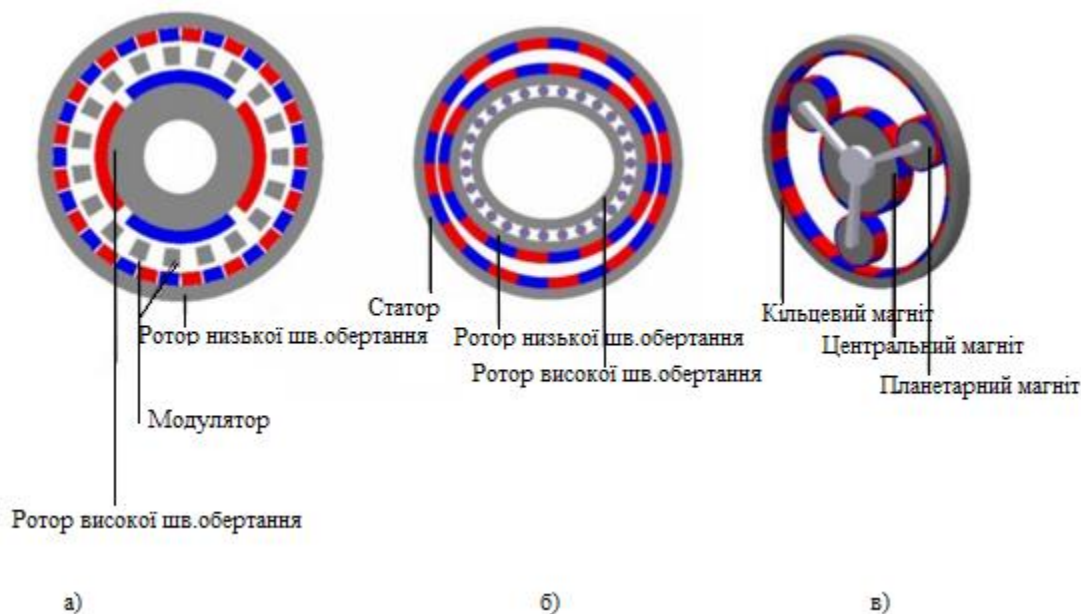


Рис. 1. а) Концентричний б) Гармонічний в) Планетарний магнітний редуктор [5]

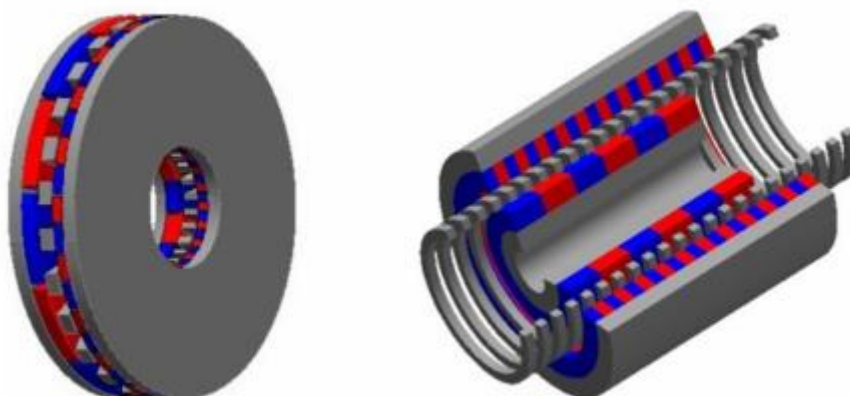


Рис. 2. Топології магнітних редукторів дискового типу та лінійного типу [5]

На момент переходу століть магнітні редуктори поділяються на три типи, які вважаються сучасними, оскільки мають щільність крутного моменту, порівнянну з щільністю звичайних механізмів ( $50-150$  кНм/м<sup>3</sup> для гвинтової передачі та  $100-200$  кНм/м<sup>3</sup> ци-

ліндрична передача). Це поля, модульовані потоком магнітного редуктора, гармонічні передачі та магнітні планетарні передачі, як показано на рис. 1.

**Актуальність.** В техніці та природних стихіях зустрічається велика кількість джерел низькопотенцій-

ної механічної енергії. Для її освоєння доцільно використовувати підвищуючі редуктори (мультиплікатори), що дозволяють збільшити швидкість обертання електричного генератора в кілька разів і, тим самим, зменшити масу його активної частини. Використання тихохідних електрогенераторів супроводжується значним збільшенням геометричних розмірів та кількості пар полюсів. Питома потужність таких генераторів має досить невелику величину.

Збільшити швидкість обертання ротора електрогенератора (а отже і підвищити його питому потужність) можливо за рахунок застосування мультиплікаторів, спеціальних ремінних передач або за рахунок використання магнітних редукторів. Актуальним напрямком є аналіз сучасних варіантів конструктивних виконань магнітних редукторів та вибір найбільш перспективних для подальших наукових досліджень та прототипів для практичної реалізації.

Редуктори на постійних магнітах (або магнітні редуктори) мають ряд переваг в порівнянні із механічними редукторами, а саме: вони не створюють додаткові шуми; не потребують змащення та регулярного технічного огляду; більш довговічні; мають нижчі експлуатаційні витрати; можливість інтеграції (гібридизації) із електрогенератором.

Хоча вони вважаються провідними моделями, інші конструкції знаходяться в стадії розробки, а також спеціальна, зроблена для недавньої розробки Дейва Роджерса та ін. [6], яка станом на 2015 р. розроблена версія звичайної черв'ячної та колісної трансмісії з гвинтовим магнітним розташуванням. Експерименти показали, що потенційне передавальне відношення перевищує 100:1, а напруженість в повітряному зазорі знаходиться в межах 485 кНм/м<sup>2</sup>. Було досягнуто успіху як в комп'ютерному моделюванні, так і в прототипній демонстрації, потрібна більш нова технологія для подальшої перевірки та демонстрації роботи.

Крім того, як черв'ячний редуктор, велика напруга зсуву буде локалізована на невеликій частині машини, а використання загального телевізійного матеріалу буде низьким. Гармонічна шестерня [7] показала дуже перспективні щільності крутного моменту в межах 150 кНм/м<sup>3</sup>. Незважаючи на свою привабливість завдяки своїй щільності крутного моменту, високим передавальним відношенням і плавній передачі крутного моменту, її важко спроектувати, і вона покладається на гнучкий низько швидкісний ротор для створення змінних у часі синусоїдальних змін в магнітному полі в повітряному зазорі між роторами. Передавальне відношення гармонічної передачі при  $p_l$  і  $p_w$  кількість полюсів на низько швидкісному роторі та кількість синусоїдальних циклів між низько швидкісним ротором та статором відповідно, а  $k$  являє собою різні асинхронні гармоніки, які пов'язані з кожною гармонікою магнітного поля постійних магнітів.

У 2001 р. Аталла та Хоу [8] запропонували провідну конструкцію для магнітних редукторів - концентричного магнітного редуктора. Хоча подібну конструкцію можна побачити у патенті Т.Г. Мартіна 1968 р. "Магнітна передача" [9], саме в роботі Аталли та Хоу були продемонстровані високі крутні можливості конструкції. Концентричні магнітні редуктори вико-

ристовують сегменти феромагнітних полюсів у повітряному зазорі між роторами для модуляції магнітного потоку, активного між роторами. Ця конструкція дозволила повною мірою використовувати весь матеріал постійних магнітів та призвела до високої щільності крутного моменту в діапазоні 70–150 кНм/м<sup>3</sup> при порівняно простій конструкції. Крім того, пропонуючи концентричний магнітний редуктор, Аталла продемонстрував дві інші форми цього магнітного редуктора, лінійну та осьову моделі поля [10, 11], як показано на рис. 2. Ця пристосованість робить конструкцію особливо корисною в морській енергетиці, де існує ряд залежно від того, як пристрій взаємодіє з припливними хвилями або припливними течіями. Існує два режими роботи з цим типом магнітного редуктора. Або феромагнітні полюси утримуються нерухомо, і зовнішньому та внутрішньому магнітному роторам дозволяється обертатися, або феромагнітним полюсам дозволяється обертатися одним з інших обертових роторів. Режими впливають на можливе передавальне число та напрямок обертання.

Також сфера застосування магнітних редукторів включає відносно нові концепції з поворотним типом, які працюють подібно до концепції механічних свинцевих гвинтів при перетворенні лінійного руху в обертальний із заміною різьбою на магнітному матеріалі (рис. 3). Ця форма магнітного редуктора дуже застосовна до хвильової енергії, оскільки типово низько швидкісний лінійний рух, скажімо, хвилеподібного перетворювача енергії буя не тільки збільшить швидкість, але може також дозволити більш традиційній електричній машині бути застосованою.

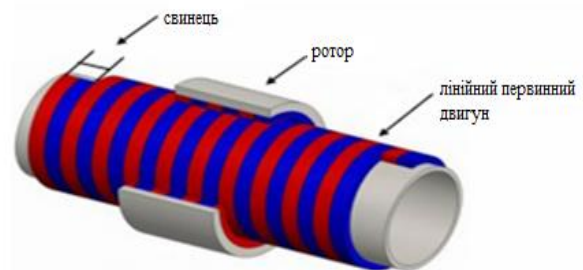


Рис. 3. Магнітний свинцевий гвинт

Хоча патент на магнітний гвинтовий пристрій був зареєстрований у 1997 р. [12], він був представлений у 2011 р. [13] були детально проаналізовані можливості високої щільності сили магнітного свинцевого гвинта. За допомогою цього аналізу було встановлено, що щільність сили тяги, що перевищує 10 МН/м<sup>3</sup>, можлива в моделях із зазорами повітря в діапазоні від 0,4 до 0,8 мм зі свинцем ( $\lambda$ ) > 7 мм. Завдяки цій функції, створеній у 2012 році, Пакделян та ін. [14] розробив цю концепцію, розробивши співвідношення швидкість-крутний момент, і конструкція та масштабування такого пристрою тепер зменшують навантаження магнітного редуктора. Тут передавальне число встановлюється як відношення кутової швидкості ротора до лінійної швидкості перетворювача  $\omega$  (рад/с) та  $V$  (м/с) відповідно.

Хоча даний тип має великий потенціал у гідро та вітроенергетиці, потреба у великій кількості магнітного матеріалу на лінійному переключачі робить пристрої дорогими. У нещодавній роботі [15] була розроблена та проаналізована нова свинцево-гвинтова передача з магнітною передачею, яка поєднує принципи лінійного магнітного редуктора та циліндричного.

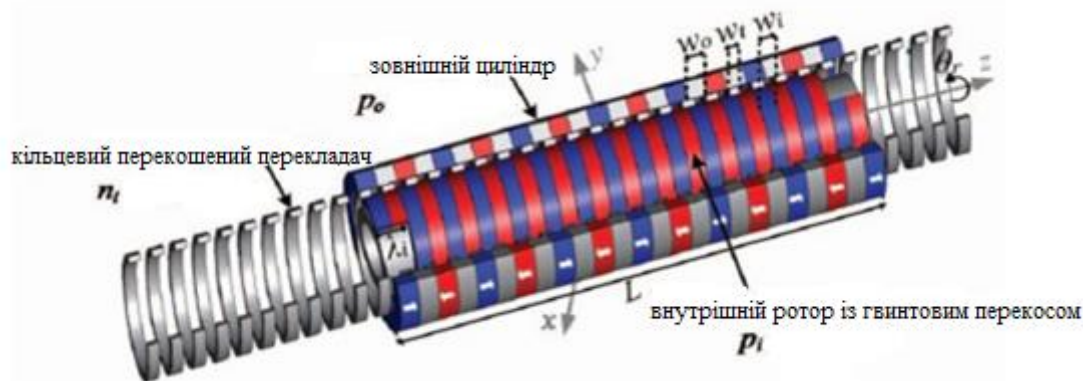


Рис.4. Свинцевий гвинт магнітного редуктора

На основі основних концепцій була проведена подальша робота щодо вдосконалення функціональності магнітного редуктора, головним досягненням якої є розробка конструкцій змінних передавальних відношень. Це потенційно важлива подія у застосуванні енергетичних технологій, оскільки морські та вітрові стани часто можуть сильно відрізнятися, а здатність змінювати передавальні числа забезпечує конструкторам більше контролю, наприклад, підтримання оптимальних швидкостей генератора з різних входів. Як уже зазначалося, планетарний тип магнітного редуктора здатний здійснювати три режими переходу [16], але була проведена подальша робота, щоб дозволити аналогічну адаптацію концентричного типу магнітного редуктора [17]. Принцип дії полягає в тому, що в типовій конструкції циліндричного магнітного редуктора, замість нерухомого ротора, дозволяється обертатися так, що швидкість зміни магнітного поля, яке бачать інші два ротори, регулюється до заданого співвідношення діапазонів. Ця концепція додатково вивчається з точки зору топології та застосування, а також використання не рідкісноземельних магнітів з можливістю зміни полюсів [18].

Останнім часом найбільший інтерес проявляється до конструкцій з використанням рідкісноземельних постійних магнітів типу NdFeB. Дані магніти володіють великим значенням коерцитивної сили, тому в конструкціях магніти мають геометрію з малою висотою магніту в порівнянні з шириною. Однак використання постійних магнітів неможливо в разі передачі великих потужностей. Постійні магніти великих розмірів складні у виготовленні і експлуатації. У цьому випадку використовується електромагнітне збудження. У таблиці 1 наведено об'ємна щільність переданого моменту різних варіантів магнітних і механічних передавальних механізмів. Видно що найбільший інтерес представляють магнітний співвісно-циліндричний, циклоїдальний редуктор і електродвигун з вбудованим магнітним редуктором. Дані редук-

Конструкція складається з трьох основних секцій: внутрішнього ротора зі спірально перекошеними, радіально намагніченими парами полюсів ( $p_i$ ), зовнішньої циліндричної конструкції, що складається з магнітних елементів, розташованих зі сталевими сегментами, що фокусують потік, і перетворювача з феромагнітних кільцевих скосів. ( $n_i$ ) (рис. 4).

тори мають найбільше значення об'ємної щільності моменту, порівнянне з характеристиками механічних передавальних пристроїв.

Таблиця 1 – Густина моменту різних передавальних пристроїв

Магнітний передавальний пристрій або електрична машина	Об'ємна щільність моменту, $\text{Н} \cdot \text{м} / \text{л}$	ККД, %
Черв'ячний редуктор	2	80-92
Прямокутний циліндричний редуктор	10-20	85-95
Синхронний електродвигун з постійними магнітами (повітряне охолодження)	20	92-98
Синхронний електродвигун з постійними магнітами (Рідинне охолодження)	30-80	87-95
Двоступеневий циклоїдальний редуктор (велике передавальне число)	75	н/д
Магнітний планетарний редуктор	45-90	н/д
Магнітний співвісно-циліндричний редуктор	70-100	80-95
Електродвигун з вбудованим магнітним редуктором	60-130	н/д
Циклоїдальний редуктор (один ступінь)	140-180	н/д

**Висновки.** Використання сучасних джерел магнітного поля (рідкоземельні постійні магніти), раціональне проектування магнітної системи за допомогою сучасних засобів комп'ютерного моделювання (методи кінцевих елементів, методи граничних елементів) дозволяють отримати конструкції магнітних передавальних механізмів з високими масогабаритними показниками, порівняними з показниками механічних передач. При цьому магнітні передачі володіють такими достоїнствами, як безконтактність, малі шуми, збільшений ресурс роботи, можливість передачі моменту в герметичні середовища та через перешкоди.



Однак зубчатість зони робочого зазору викликає пульсації переданого моменту і сприяє появі явища «залипання» зубців ротора щодо зубців статора. Дані явища погіршують енергетичні, пускові і експлуатаційні характеристики магнітних передавальних пристроїв. Можливими шляхами покращення даних характеристик є профілізація і скіс зубців, а також раціональний вибір довжини робочого зазору. Представляють інтерес конструкції електричних двигунів з вбудованими магнітними редукторами, що виключають необхідність використання механічного редуктора і забезпечують компактну конструкцію приводу. Подібні механізми і пристрої становлять інтерес для таких областей, як вітроенергетика, екологічно чистий і гібридний автотранспорт, компресорна техніка (передача моменту в герметичні середовища з можливістю збільшення оборотів) і т.д.

#### Список літератури

1. *Armstrong, C.*: 'Power-transmitting device'. US Patent, 687,292, 26 November 1901. Available at <http://www.google.co.uk/patents/US687292>
2. *Faus, H.*: 'Magnet gearing'. US Patent, 353,472, 21 August 1941. Available at <https://patents.google.com/patent/US2243555A>
3. *Kikuchi, S., Tsurumoto, K.*: 'Design and characteristics of a new magnetic worm gear using permanent magnet', *IEEE Trans. Magn.*, 1993, 29, (6), pp. 2923–2925
4. *Kikuchi, K., Tsurumoto, S.*: 'Trial construction of a new magnetic skew gear using permanent magnet', *IEEE Trans. Magn.*, 1994, 30, (6), pp. 4767–4769
5. *Tlali, P., Wang, R.-J., Gerber, S.*: 'Magnetic gear technologies: a review'. *Int. Conf. On Electrical Machines (ICEM)*, 2014, 2014, pp. 544–550
6. *Rodgers, D., Lai, H.C., Outram, J.*: 'A novel lightweight wind turbine generator', *J. Chem. Inf. Model.*, 2013, 53, (9), pp. 1689–1699
7. *Rens, J., Atallah, K., Calverley, S.D., et al.*: 'A novel magnetic harmonic gear', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2010, 46, (1), pp. 206–212
8. *Atallah, K., Howe, D.*: 'A novel high-performance magnetic gear', *IEEE Trans. Magn.*, 2001, 37, (4 I), pp. 2844–2846
9. *Martin, T.B.Jr.*: 'Magnetic transmission'. US Patent 3,378,710, 16 April 1968. Available at <http://www.google.co.uk/patents/US3378710>
10. *Holehouse, R.C., Atallah, K., Wang, J.*: 'Design and realization of a linear magnetic gear', *IEEE Trans. Magn.*, 2011, 47, (10), pp. 4171–4174
11. *Mezani, S., Atallah, K., Howe, D.*: 'A high-performance axial-field magnetic gear', *J. Appl. Phys.*, 2006, 99, (8), pp. 97–100
12. *Hashimoto, J., Kubo, Y.*: 'A magnetic screw device'. US Patent, 5,687, 614, 1997
13. *Wang, J., Atallah, K., Barnes, J.*: 'Analysis and design of a high force density linear electromagnetic actuator'. *PCIM Europe Conf. Proc.*, 2012, vol. 47, no. 10, pp. 177–185
14. *Pakdelian, S., Frank, N.W., Toliyat, H.A.*: Analysis and Design of the TransRotary Magnetic' Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), *IEEE*, 2012, pp. 3340–3347
15. *Kouhshahi, M.B., Bird, J.Z.*: 'Analysis of A magnetically geared lead screw', *Electrical and Computer Engineering Faculty Publications and Presentations*, 2017, (421), pp. 1–8
16. *Huang, C.-C., Tsai, M.-C., Dorrell, D., et al.*: 'Development of a magnetic planetary gearbox', *IEEE Trans. Magn.*, 2008, 44, (3), pp. 403–412
17. *Wang, J., Atallah, K., Carvley, S.D.*: 'A magnetic continuously variable transmission device', *IEEE Trans. Magn.*, 2011, 47, (10), pp. 2815–2818
18. *Chen, M., Chau, K.-t., Lee, C., et al.*: 'Design and analysis of a NewaxialField magnetic variable gear using pole-changing permanent magnets', *Prog. Electromagn. Res.*, 2015, 153, no. pp. 23–32.

#### References (transliterated)

1. *Armstrong, C.*: 'Power-transmitting device'. US Patent, 687,292, 26 November 1901. Available at <http://www.google.co.uk/patents/US687292>
2. *Faus, H.*: 'Magnet gearing'. US Patent, 353,472, 21 August 1941. Available at <https://patents.google.com/patent/US2243555A>
3. *Kikuchi, S., Tsurumoto, K.*: 'Design and characteristics of a new magnetic worm gear using permanent magnet', *IEEE Trans. Magn.*, 1993, 29, (6), pp. 2923–2925
4. *Kikuchi, K., Tsurumoto, S.*: 'Trial construction of a new magnetic skew gear using permanent magnet', *IEEE Trans. Magn.*, 1994, 30, (6), pp. 4767–4769
5. *Tlali, P., Wang, R.-J., Gerber, S.*: 'Magnetic gear technologies: a review'. *Int. Conf. onElectricalMachines (ICEM)*, 2014, 2014, pp. 544–550
6. *Rodgers, D., Lai, H.C., Outram, J.*: 'A novel lightweight wind turbine generator', *J. Chem. Inf. Model.*, 2013, 53, (9), pp. 1689–1699
7. *Rens, J., Atallah, K., Calverley, S.D., et al.*: 'A novel magnetic harmonic gear', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2010, 46, (1), pp. 206–212
8. *Atallah, K., Howe, D.*: 'A novel high-performance magnetic gear', *IEEE Trans. Magn.*, 2001, 37, (4 I), pp. 2844–2846
9. *Martin, T.B.Jr.*: 'Magnetic transmission'. US Patent 3,378,710, 16 April 1968. Available at <http://www.google.co.uk/patents/US3378710>
10. *Holehouse, R.C., Atallah, K., Wang, J.*: 'Design and realization of a linear magnetic gear', *IEEE Trans. Magn.*, 2011, 47, (10), pp. 4171–4174
11. *Mezani, S., Atallah, K., Howe, D.*: 'A high-performance axial-field magnetic gear', *J. Appl. Phys.*, 2006, 99, (8), pp. 97–100
12. *Hashimoto, J., Kubo, Y.*: 'A magnetic screw device'. US Patent, 5,687, 614, 1997
13. *Wang, J., Atallah, K., Barnes, J.*: 'Analysis and design of a high force density linear electromagnetic actuator'. *PCIM Europe Conf. Proc.*, 2012, vol. 47, no. 10, pp. 177–185
14. *Pakdelian, S., Frank, N.W., Toliyat, H.A.*: Analysis and Design of the TransRotary Magnetic' Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), *IEEE*, 2012, pp. 3340–3347
15. *Kouhshahi, M.B., Bird, J.Z.*: 'Analysis of A magnetically geared lead screw', *Electrical and Computer Engineering Faculty Publications and Presentations*, 2017, (421), pp. 1–8
16. *Huang, C.-C., Tsai, M.-C., Dorrell, D., et al.*: 'Development of a magnetic planetary gearbox', *IEEE Trans. Magn.*, 2008, 44, (3), pp. 403–412
17. *Wang, J., Atallah, K., Carvley, S.D.*: 'A magnetic continuously variable transmission device', *IEEE Trans. Magn.*, 2011, 47, (10), pp. 2815–2818
18. *Chen, M., Chau, K.-t., Lee, C., et al.*: 'Design and analysis of a Newaxial Field magnetic variable gear using pole-changing permanent magnets', *Prog. Electromagn. Res.*, 2015, 153, no. pp. 23–32.

Надійшла (received) 19.04.2021

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Ткачук Ігор Валерійович (Ткачук Игорь Валерьевич, Tkachuk Igor)** – аспірант, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5717-2458>; e-mail: [baja0073@gmail.com](mailto:baja0073@gmail.com).

**Коваленко Михайло Анатолійович (Коваленко Михаил Анатольевич, Kovalenko Mykhailo)** – доцент кафедри електромеханіки факультету електроенергетичної та автоматичної, Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>; e-mail: [kovalenko\\_ma@i.ua](mailto:kovalenko_ma@i.ua).