

*М.А. КОВАЛЕНКО, І.В. ТКАЧУК, І.Я. КОВАЛЕНКО, О.С. ПЕРЕПЕЛИЦЯ, О.О. КРИШНЬОВ,
Є.О. ТІТОВ*

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

В даній роботі розглядається метод поліпшення коефіцієнту корисної дії і коефіцієнту потужності в асинхронному двигуні. Коефіцієнт потужності – це відношення активної потужності до повної потужності яку споживає електрична машина. Цей коефіцієнт показує яка частина енергії іде на виконання роботи, а яка просто розсіюється в машині в вигляді тепла. Для аналізу в роботі використовується стандартний розрахунок асинхронного двигуна, такі розрахунок використовують для проектування електричних двигунів масового використання, на базі яких проведено модулювання фізичних процесів в середині активної частини машини, за допомогою чисельних математичних моделей, для розрахунку індукцій в магнітопроводі, а також шляхів проходження ліній магнітної індукції.

Ключові слова: асинхронний двигун, короткозамкнений ротор, підвищення ефективності, енергоресурсозбереження.

*М. А. KOVALENKO, I. V. TKACHUK, I. Y. KOVALENKO, O.S. PEREPELYTSIA, O.O. KRYSHNOV,
Y.O. TITOV*

INCREASING EFFICIENCY OF INDUCTION MOTOR

In this work was analyzed induction motor, its advantages and disadvantages, and methods of modify it in way increasing its reliability and power coefficient. Power coefficient is the parameter which shows how much energy is used for yield and which just converting into heat. For analysis used calculation of induction motor which commonly used for developing serial asynchronous motor. Based on that calculation has modulated physical process which conducting in active parts of motor. For calculation of induction in armature and magnetic flux passes in it was used numerical mathematical model. This type of electric motors is common used so increase its efficiency and power characteristics is the one of way to reduce energy consuming. The developed way of modernization of induction motors, and analyzed reliability of it.

Keywords: asynchronous motor, short-circuited rotor, efficiency improvement, energy saving.

Вступ. На протязі останніх 120 років конструкція і технологія серійного виробництва асинхронних двигунів значно удосконалилася, таким чином що за рік в світі випускають кілька мільйонів екземплярів різної потужності [1-5]. Проте навіть після ста років досліджень і удосконалень асинхронні двигуни мають значні недоліки: 1) В асинхронних двигуна важко контролювати швидкість обертання, а обладнання для цього часто коштує більше самого двигуна. 2) На низьких частотах обертання механічна характеристика двигуна має значні нелінійності що унеможливує його роботу в такому режимі. 3) Попри всі вдосконалення ККД і коефіцієнт потужності в даних машин залишається доволі низьким, так для асинхронних двигунів нормальним значення корисної дії є 75-85% в залежності від потужності двигуна, а коефіцієнт потужності не перевищує 0.85 [6-12]. В даній роботі увага буде зосереджена на останньому недоліку.

Актуальність. За останні 50 років людство зіткнулося з проблемою забезпечення споживачів електроенергією, оскільки характер росту споживаної енергії зростає в геометричній прогресії в найближчому майбутньому ми можемо зіткнутися з явищем коли створенні за рік генераційні потужності не покривають росту споживаної енергії [12-14]. Проблему гострої нестачі електроенергії можна вирішити кількома способами 1) Створювати нові генераційні потужності, відкривати нові джерела енергії, 2) зменшувати споживання. Одним із способів зменшення обсягу споживаної енергії це зробити споживачі більш ефективними. На сьогодні одним із найбільших споживачів електроенергії в світі є асинхронний двигун. На нього припадає приблизно 60% всієї спожитої енергії в світі. При такому значенні спожитої енергії що приблизно дорівнює 20-24

ТВт\год. 15 -25% цієї енергії розсіюється в вигляді тепла [15-17].

Сучасні методи. Одним із найяскравіших представників ряду асинхронних машин з покращеними енергетичними характеристиками є двигуни серії ІЕ. В даній серії двигунів інженери зосередилися на удосконаленні частин і поліпшенні матеріалів з яких зроблена машина. Так завдяки зміні матеріалу, короткозамкненої обмотки ротора, з алюмінію на мідь рис.(1) вдалося зменшити опір в електричному колі ротора на 20%, крім того для магнітопроводів даної серії машин виготовляють листи із зменшеною товщиною для зменшення втрат на вихрові струми.



Рис 1. Мідна короткозамкнена обмотка

Завдяки цим змінам вдалося збільшити ККД двигуна на 3-5 відсотків хоча і вартість такої машини зростає в 4-5 разів, проте окупність такої машини вища. Крім вище зазначених змін в двигунах серії ІЕ4 використовують високо технологічні процеси обробки а також використовують високо ефективні матеріали. При виготовленні трифазної обмотки збільшили мінімальний коефіцієнт заповнення пазу, а точна обробка дозволила зменшити повітряний проміжок, відстань між статором і ротором. Дані удосконалення призвели до зростання коефіцієнту корисної дії приблизно на 1%, а коефіцієнту потужності на 5%.

Аналітика недоліків конструкції. Звертаючись до відомих методик розрахунку асинхронних двигунів явно видно що значна увага при їх розрахунку надається повітряному проміжку і індукції в ньому. І хоча такого поняття як втрати в повітряному проміжку немає проте цей елемент в асинхронних машинах має критичну роль. Оскільки його намагаються зробити якомога меншим. Основним впливом повітряного проміжку на процеси які проходять в машині, є збільшення опору магнітного кола в два і більше разів, в залежності від величини проміжку і потужності машини. З розрахунків серійного асинхронного двигуна випливає що опір в магнітному колі машини на пряму впливає на струм холостого ходу, що є фізичним еквівалентом коефіцієнту потужності, а спираючись на розрахункові формулами і на ККД в цілому.

$$\eta = P_1/P_2$$

$$P_1 = \sqrt{3}U_1 I_1 \cos\varphi$$

Струм холостого ходу – це найбільше значення струму який протікає в двигуні

Хоча повітряний проміжок і не є єдиним джерелом зниження коефіцієнту потужності, розгляд другого джерела (лобові частини обмотки) в даній роботі буде упущено.

Тобто зниження опору в магнітному колі машини спричинить падіння струму холостого ходу, що в свою чергу призведе до зменшення величини струмів, які протікають в машині, а за одне і втрат спричинених цими струмами. В результаті отримаємо аналогічну за потужністю машину з меншими втратами.

Рішення знайденого недоліку. Для зменшення негативних наслідків наявності повітряного проміжку запропоновано заповнити його рідиною або іншим матеріалом, який добре проводить магнітний потік. Проте використання феромагнітної рідини призведе до збільшення загальної маси машини, а також вимагатиме створення спеціальних гідрозапірних елементів між обертовою та нерухою частинами. А також в даному варіанті виконання можлива поява явища шунтування магнітного потоку по каналу з магнітопровідною рідиною в обхід ротора, що призведе до значного зменшення моменту або цілком до нероботоздатності машини.

У зв'язку зі значними недоліками гідромагнітного проміжку між ротором і статором, ця концепція в даній роботі не буде реалізована. Замість цього, для забезпечення стійкого магнітного зв'язку між ротором і стато-

ром, пропонується розмістити між ними сталеві циліндри з діаметром, що дорівнює розміру проміжку рис.(2.а).

Або ж, за рахунок зменшення ярма короткозамкненого ротора, яке не виконує активної функції, розмістити шестерні за типом планетарної передачі в збільшеному проміжку рис. 2,б.

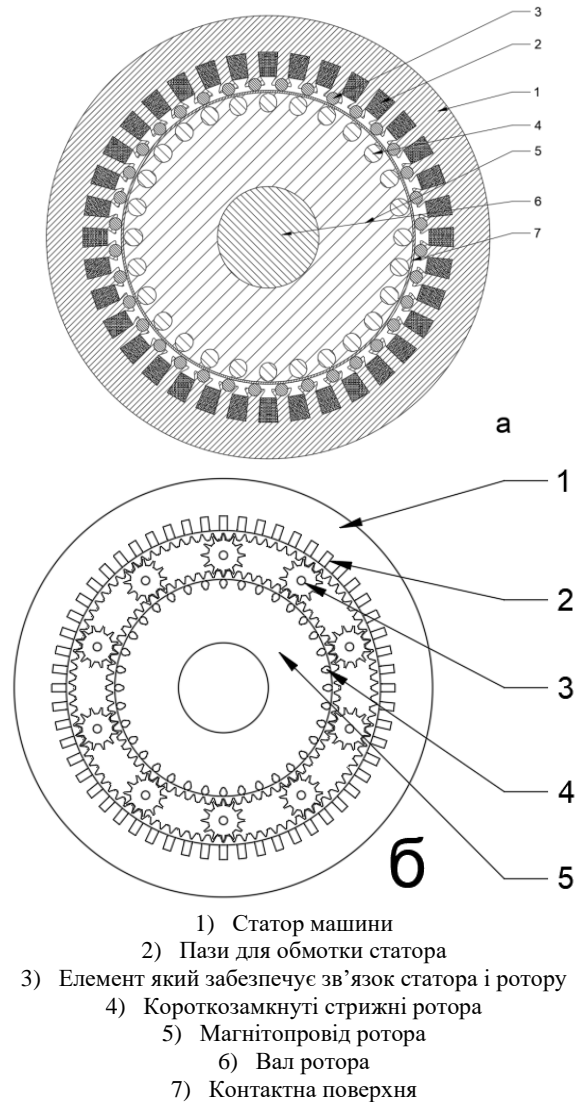


Рис 2. а) Переріз асинхронного двигуна з циліндрами на кінцях зубців, б) переріз асинхронного двигуна з шестернями в повітряному проміжку.

При встановленні нових елементів їх втрати потрібно буде обчислювати окремо для випадку з циліндрами або оптимізувати вже відому формулу.

Доповнення розрахункових формул пояснюється появою додаткових втрат на гістерезис і вихрові струми в шестернях для планетарного варіанту або в циліндрах для підшипникового. Однак, ці елементи також стануть джерелом додаткових механічних втрат. Проте, в результаті, двигун отримає додаткову механічну міцність, а в планетарному варіанті при збереженні потужності зменшиться маса за рахунок більшого об'єму повітря, а також збільшиться коефіцієнт використання матеріалів.

Модифіковані електричні машини, як було визначено, мають складну магнітну систему, що суттєво впливає на їхню роботу. Крім того, вони взаємодіють з новими елементами, наприклад, при проходженні магнітного потоку через них, виникає сила, яка змушує елементи рухатися в напрямку поля.

Ці електричні машини поєднують характеристики асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором та машин змінного струму з ротором, що котиться. Ротор таких машин, як правило, представляє собою порожнистий циліндр із сталі, що котиться по внутрішній поверхні розточки статора під дією електромеханічного моменту, утвореного магнітним полем статора. Ці машини мають значний механічний момент на валу при низьких швидкостях обертання і привабливі з погляду простоти конструкції та виготовлення. Проте вони також мають свої недоліки, наприклад, знос поверхні ротора та зубців статора через ударну деформацію.

На відміну від машини з ротором, що котяться, модифікований двигун не має ексцентриситету, але контакт ротора і статора відбувається через посередника, який має спеціальні шляхи для руху, що зменшує його деформацію. Однак відсутність неповно-полосної конструкції не дозволяє досягти високих моментів, а швидкість обертання таких машин вища. Така комбінація характеристик робить їх проміжними між асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором і трифазними двигунами з ротором, що котиться.

Розрахунково проектувальний процес.

Зміни в конструкції призводять до того що розрахунков машини вимагає модернізації. Перша значна зміна розрахунків відбудеться вже на етапі розрахунку зубцево пазової зони рис.(3)

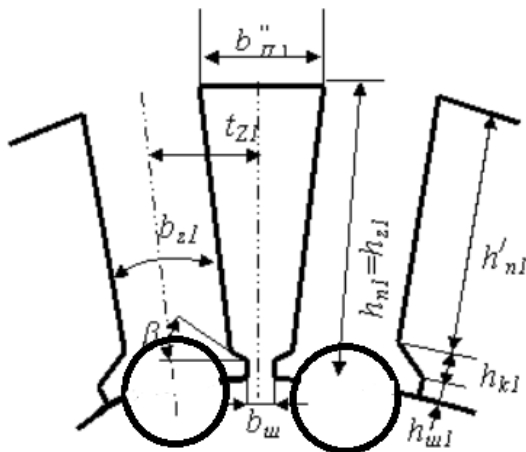


Рис 3. Зубцево-пазова зона модифікованого двигуна

Як видно з конструкції відстань між внутрішньою поверхнею статора і зовнішньою поверхнею ротора зросла що може призвести до шунтування магнітного потоку через повітря на пряму на протилежний полюс статора. Для унеможливлення шунтування на етапі проектування потрібно провести перевірку, яка складається з трьох рівнянь, які повинні враховувати магнітні провідності, і середню довжину яку проходить магнітний потік по контуру, всіх елементів через які

потенційно може проходити магнітний потік. Позитивним рішенням даної системи буде варіант за якого бажаний маршрут проходження магнітного потоку матиме найменший магнітний опір

Зразок розрахунку коефіцієнту проникнення за найкоротшим маршрутом

$$k_1 = (b_1 + 2h_1 + b_2)\mu + b_h\mu_0$$

де $(b_1 + 2h_1 + b_2)$ – довжина шляху магнітного потоку в сталі,

μ – відносна магнітна проникність сталі магнітопроводу,

b_h – ширина клину в пазу,

μ_0 – відносна магнітна проникність повітря.

Після перевірки значення відносної магнітної проникності використовують для обрахунку магніторупійних сил для кожного нового елемента.

Також додатковий коректив потрібно внести при розрахунку механічних втрат оскільки зона механічного контакту збільшиться від пари підшипників декількох зон контакту в між статором і ротором. В випадку з втратами в сталі додатково потрібно розраховувати втрати для кожного нового елемента. Оскільки їх величина відносно не велика втрати в них не сильно вплинуть на сумарні втрати в сталі.

Наступним важливим етапом проектування модифікованого асинхронного двигуна стане тепловий розрахунок. Зменшення магнітного опору призводить до збільшення індукції в магнітопроводі, крім збільшення індукції в магнітопроводі як показано на рис.(4). наявність контактних циліндрів призводить до появи зон з підвищеною індукцією в місцях переходу між конструктивними елементами. Що в свою чергу призводить до появи місць з локальними перегрівами.

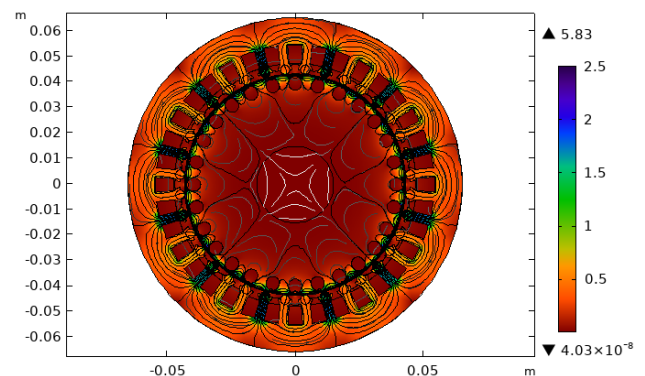


Рис 4. Розподіл магнітного потоку в середині активної частини машини

Особливу увагу потрібно приділити зонам локального перегріву оскільки величина нагріву даних областей може призвести до підвищення класу ізоляції що призведе до збільшення вартості окремого пристрою.

Отримані результати розрахунків. Вже на етапі розрахунку робочих характеристик видно значне покращення характеристики в порівнянні зі звичайним асинхронним двигуном рис.(5).

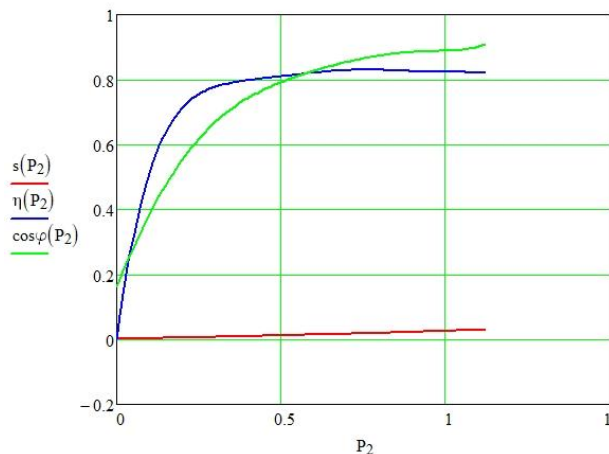


Рис 5. Робоча характеристика модифікованого двигуна

Для звичайного двигуна такої ж потужності ці параметри матимуть вигляд як на рис.(6).

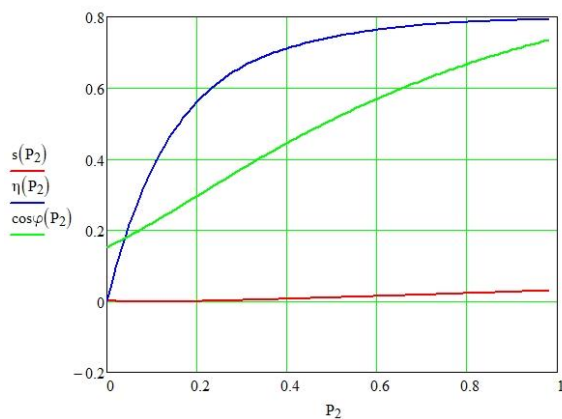


Рис 6. Робочі характеристики звичайного асинхронного двигуна

Як видно з графіків значного приросту зазнав коефіцієнт потужності близько 16%, коефіцієнт корисної дії зріс на 3%, а ковзання зменшилося.

Недоліки спричинені конструктивними нововведеннями. Як вже було згадано: одним із основних недоліків які з'являються в модифікованій машині це її потенційна недовговічність в зв'язку з появою зон контакту і збільшення тертя. Крім того місця локального перегріву можуть призвести до виходу машини з ладу, і потребують кращого охолодження. Для зменшення механічного тертя активна зона потребує обов'язкового змащення чого важко досягти оскільки температура в даній області досягає 100 градусів і вище.

Висновок. За рахунок доповнення конструкції асинхронного двигуна новими елементами можна покращити його характеристики. За проведеними розрахунками вдалося досягти приросту моменту на валу машини на 31% коефіцієнту потужності на 16% і ККД на 3%. Проте при проведенні таких модифікацій сильно страждає довговічність двигуна, а також такий двигун вимагатиме перевірок його механічних частин а за потреби і заміни елементів тертя набагато частіше. Також збільшена зона тертя в машині призводить до того що

для збільшення ресурсу такого пристрою потрібно обмежити її швидкість обертання на етапі проектування шляхом збільшення пар полюсів. Крім цього в такому апараті з'являється зони локального перегріву що також негативно позначиться на роботі всієї машини.

У зв'язку з цими зауваження обраний метод модифікування додатково потрібно доопрацювати щоб мінімізувати новоутворені недоліки.

References

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Cendoya, M. & Talpone, Juan & Puleston, P.F. & Barrado, José Antonio & Martínez-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.
- Li, Zheng et al. 'Design and Analysis of Underwater Power Generation Characteristics of Deflected Double-stator Switched Reluctance Generator'. 1 Jan. 2022: 1 – 20.
- Widyanto, Aji & Ariwidayat, Rahmat & Husnayaian, Faiz & Rahardjo, 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.
- Ostroverkhov, M., Chumack, V., Falchenko, M., & Kovalenko, M. (2022). Development of control algorithms for magnetoelectric 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.
- V.M. Golovko, M.Ya. Ostroverkhov, M.A. Kovalenko, I.Ya. Kovalenko, D.V. Tsyplenkov Mathematical simulation of autonomous wind electric installation with magnetoelectric 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 & Widianto, 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

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, 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", 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; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>; e-mail: 2048141@ukr.net.

Перепелиця Олександр Сергійович (Perepelytsia Oleksandr) – по Автоелектрик, "ТеслаКиїв", ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3352-2140>; e-mail: alex.perpelitsa01@gmail.com.

Кришньов Олег Олександрович (Kryshnov Oleg) – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", 03056, м.Київ, пр. Перемоги 37, ORCID: 0009-0008-1140-5544, e-mail: oktrihnov@gmail.com.

Тітов Єгор Олександрович (Titov Yehor) - головний інженер, ТОВ "ГЕКО-ЦЕНТР"; <https://orcid.org/0009-0007-8222-7477>; e-mail: egor.shabadash@gmail.com.