

Ю.М. ВАСЬКОВСЬКИЙ, Д.С. НЕСТЕРЕНКО

ВПЛИВ НАГРІВУ ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ НА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЯГОВИХ СИНХРОННИХ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ

Досліджується вплив нагріву постійних магнітів (ПМ) на енергетичні характеристики тягового синхронного двигуна з постійними магнітами (СДПМ) потужністю 140 кВт, призначеного для використання в локомотиві потягу. Нагрів ПМ під час роботи СДПМ призводить до зниження їх магнітних характеристик, що в свою чергу веде до зниження потужності двигуна і може негативно вплинути на стабільність та надійність його роботи. За результатами математичного моделювання отримана інформація щодо зменшення енергетичних показників тягового СДПМ внаслідок нагріву його активної зони, зокрема ПМ. Встановлено, що двигун потужністю 140 кВт втрачає близько 8-10% потужності внаслідок нагріву ПМ у порівнянні з холодним його станом. Обґрунтовано технічні пропозиції щодо збільшення температурної стабілізації ПМ. Запропоновано два удосконаленні варіанти СДПМ, в яких забезпечена температурна стабілізація ПМ. Зокрема показано, що певне зменшення діаметру вентиляційних каналів підвищує тепловідведення від основних конструктивних елементів СДПМ.

Ключові слова: синхронний двигун з постійними магнітами, нагрів постійних магнітів, температурна стабілізація

Yu. VASKOVSKIY, D. NESTERENKO

THE IMPACT OF PERMANENT MAGNETS HEATING ON THE ENERGY CHARACTERISTICS OF TRACTION SYNCHRONOUS MAGNETO-ELECTRIC MOTORS

The influence of permanent magnets (PM) heating on the energy characteristics of a 140 kW permanent magnet synchronous motor (PMSM), used in electric locomotives is investigated. The heating of the PM during the operation of the PMSM leads to a reduction in their magnetic properties, which causes a decrease in the motor's power and can negatively affect the stability and reliability of its operation. Based on the results of mathematical modeling, information about the reduction of energy performance of the traction PMSM due to the heating of its active zone, particularly PMs has been obtained. It has been established that a 140 kW motor loses about 8-10% of power due to the heating of the PMs. Well-founded technical proposals for improving the temperature stabilization of PMs have been provided. Two variants of PMSM design with enhanced temperature stabilization of PMs have been proposed. It has been shown that a slight reduction in the diameter of the ventilation channels helps to increase the efficiency of heat dissipation from the main structural elements of the PMSM.

Key words: permanent magnet synchronous motor, permanent magnets heating, temperature stabilization

Вступ. Синхронні двигуни з постійними магнітами (СДПМ) знайшли широке застосування у сучасній техніці (електротранспорт, безпілотні літальні апарати тощо). Їх головна перевага - це здатність забезпечувати високий електромагнітний момент при відносно невеликій масі, що забезпечує високі масо-габаритні показники (кВт/кг). Крім того, наявність постійних магнітів (ПМ) підвищує енергетичні показники машини. Однак характеристики СДПМ (електромагнітний момент, коефіцієнт корисної дії тощо) суттєво залежать від нагріву активної зони двигуна, зокрема ПМ.

Наприклад, підвищення робочої температури магнітів призводить до помітного погіршення їх магнітних характеристик, зокрема, зменшення залишкової магнітної індукції B_r і коерцитивної сили H_c , а отже і до погіршення тягових та енергетичних показників СДПМ [1-3]. Тому однією із найважливіших задач при проектуванні СДПМ є стабілізація допустимої робочої температури ПМ при роботі двигуна в широкому діапазоні потужності [4].

Метою роботи є оцінка впливу нагріву ПМ на енергетичні характеристики СДПМ.

Математична модель. Електромагнітне поле відносно комплексної амплітуди векторного магнітного потенціалу A_z в активній зоні СДПМ описується наступним рівнянням [5]:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(T)} (\nabla \times A_z - B_r(T)) \right) = J_{z_{ext}}, \quad (1)$$

де $\mu(T)$ – магнітна проникність, яка в загальному випадку залежить від температури T , $J_{z_{ext}}$ – густина сторонніх струмів в фазах обмотки статора. Рівняння (1)

доповнюється граничною умовою – значенням векторного магнітного потенціалу на границі розрахункової області.

Середнє значення електромагнітного моменту знаходиться інтегруванням миттєвого значення моменту в межах періоду часу T_ω повного обороту ротора

$$M_{Em\,Aver} = \frac{1}{T_\omega} \int_0^{T_\omega} M_{Em}(t) dt. \quad (2)$$

Електропровідність в пазах статора приймається рівною нулю, але у відповідності до схеми обмотки задається густина струмів.

Миттєве значення електромагнітного моменту знаходиться за формулою, яка ґрунтується на використанні тензора магнітного натягу на поверхні ротора:

$$M_{Em}(t) = \frac{2pR_\delta l_r}{\mu(0)} \int_0^\tau B_n B_\tau dl, \quad (3)$$

де p , τ – число пар полюсів і полюсна поділка; l_r , R_δ – активна довжина і радіус ротора, B_n , B_τ – нормальна (направлена перпендикулярно до точки поверхні) і тангенціальна (направлена по дотичній до точки поверхні) проекції вектора магнітної індукції.

Залежність залишкової магнітної індукції $B_r(t)$ від температури T згідно з експериментальними результатами, отриманими в роботі [3] для ПМ типу NdFeB, апроксимується кубічним поліномом

$$B_r(T) = B_r(0) - 2,682 \cdot 10^3 \cdot T + 1,663 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 5,613 \cdot 10^{-8} \cdot T^3, \quad (4)$$

де $B_r(0)$ – значення залишкової індукції ПМ при початковій температурі 0 °С.

Середня потужність двигуна знаходиться так:

$$P_{Aver}(t) = \omega_R M_{Em Aver} \quad (5)$$

Втрати потужності в обмотці і магнітопроводі статора знаходяться традиційним методом при заданих активному опорі і струмах в фазах обмотки статора і відомих величинах магнітної індукції в магнітопроводі.

Втратами в магнітопроводі ротора в першому наближенні можна нехтувати, а втрати в ПМ згідно з даними робіт [6,7] приймаються як

$$Q_{PM} = 0,001 P_2, \quad (6)$$

де P_2 – активна потужність двигуна. Теплове поле СДПМ описується стаціонарним диференціальним рівнянням теплопровідності, яке в декартових координатах записується так [8]:

$$\lambda(T) \left[\frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2} \right] = -Q(x, y), \quad (7)$$

де $\lambda(T)$ – коефіцієнт теплопровідності (Вт/м · град). Для більшості матеріалів залежність коефіцієнта теплопровідності від температури наближено можна вважати лінійною.

На зовнішніх границях розрахункової області, у тому числі на поверхнях вентиляційних каналів задаються граничні умови третього роду:

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha(v)(T - T_{0x}), \quad (8)$$

де $\alpha(v)$ – коефіцієнт тепловіддачі з поверхонь (Вт/м² · град), T_{0x} – усереднена температура охолоджуючого холодоагенту, задана з урахуванням його підігріву при русі уздовж вентиляційного каналу. Коефіцієнт тепловіддачі залежить від швидкості v руху холодоагенту (повітря) відносно поверхні. Його числове значення отримують експериментальними методами. Надалі використовується приведена в роботі [9] формула для визначення коефіцієнту тепловіддачі від стінки круглого каналу до повітря, яка справедлива для конструкцій більшості електричних машин

$$\alpha(v) = 0,027 \lambda \cdot a^{-0,78} \cdot d_k^{-0,22} \cdot v^{0,78}, \quad (9)$$

де $\alpha = \lambda(T) / C_p = 2,4 \cdot 10^{-5}$ (м²/с) – температуропровідність повітря при 40 °С, $\lambda = 0,0267$ (Вт/м · град) – теплопровідність повітря при температурі 40 °С; $C_p = 1020$ (Дж/кг · град) – питома теплоємність, d_k – діаметр каналу. Швидкість руху v_i в i -му вентиляційному каналі визначається через витрати холодоагенту P_i у каналі і площу поперечного перерізу каналу s_i :

$$v_i = P_i / s_i. \quad (10)$$

Підставляючи (10) в (9), маємо залежність коефіцієнтів тепловіддачі від витрат холодоагенту.

Головною задачею вентиляційного розрахунку є вибір конструкції системи вентиляції і параметрів нагнітальних елементів, які забезпечують обсяг витрат охолоджуючого холодоагенту, потрібний для підтримання допустимої температури усіх елементів ЕМ. Звичай вентиляційна мережа складається з послідовно і паралельно з'єднаних між собою вентиляційних каналів і порожнин різної площі перерізу. Вентиляційний розрахунок доцільно проводити на основі зосереджених схем заміщення вентиляційної системи [9].

У розглянутому надалі прикладі схема заміщення складається з 4-х паралельних гілок, які відповідають аксіальним каналам статора і ротора, кільцевому вентиляційному каналу навколо ярма осердя статора і повітряному проміжку між статором і ротором. Кожна гілка характеризується відповідним аеродинамічним опором. Надалі використовується схема заміщення вентиляційної системи, яка характерна для машин з аксіальною системою вентиляції [10].

Об'єкт дослідження. Дослідження реалізовано на прикладі тягового СДПМ потужністю 140 кВт, призначеного для приводу локомотивів потягів. На зовнішній поверхні ротора встановлені постійні магніти типу NdFeB, які при температурі 20 °С мають залишкову індукцію 1,3 Тл. Пази статора виконані відкритими. Номінальні дані двигуна наведено в табл.1

Таблиця 1 – Номінальні дані СДПМ

Показник	Величина
Потужність, кВт	140
Струм обмотки статора, А	58
Фазна напруга, В	1080
Частота обертання ротора, об/хв	1000
Кількість полюсів	2р = 6
Висота повітряного проміжку, мм	3
Діаметр статора, м	0,4
Довжина статора, м	0,3
Кількість пазів	36
Ширина пазів, мм	11
Висота пазів, мм	45

В осердях статора і ротора виконано аксіальні вентиляційні канали. Для охолодження статора навколо зовнішньої поверхні ярма статора виконано кільцевий вентиляційний канал. Охолодження – повітряне примусове за допомогою компресора, який в режимі холостого ходу (при нескінченно великому аеродинамічному опорі вентиляційної системи) утворює тиск 10 кПа, а в режимі короткого замикання (при нульовому опорі системи) спроможний видати обсяг повітря 1 м³/с. Характеристики системи охолодження СДПМ наведено в табл. 2

Таблиця 2 – Характеристики системи охолодження СДПМ

Показник	Величина
Кількість вентиляційних каналів статора	25
Кількість вентиляційних каналів ротора	10
Діаметр каналів, мм	15
Діаметр каналу навколо зовнішньої поверхні ярма статора, мм	4
Швидкість повітря в повітряному проміжку, м/с	28,2
Швидкість повітря в кільцевому вентиляційному каналі між ярмом і станиною, м/с	32,7
Швидкість повітря в каналах статора, м/с	28,53
Швидкість повітря в каналах ротора, м/с	28,55
Коефіцієнт тепловіддачі в каналі між ярмом і станиною, Вт/(м ² ·°С)	77
Коефіцієнти тепловіддачі в аксіальних каналах статора і ротор, Вт/(м ² ·°С)	99,6

Результати дослідження. Переріз активної зони СДПМ показано на рис. 1, на якому також зображено картину теплового (температурного) поля двигуна в номінальному режимі роботи, а в табл.3 наведено температури основних конструктивних елементів СДПМ.

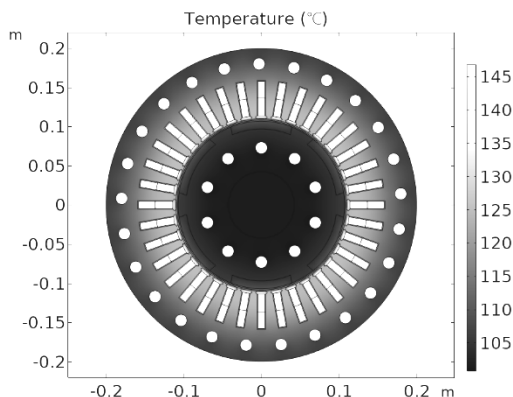


Рис. 1. Розподіл теплового поля СДПМ в номінальному режимі роботи

Таблиця 3 – Температури основних конструктивних елементів СДПМ

Показник	Величина
Температура обмотки статора, °C	144
Максимальна температура осердя статора, °C	108
Температура ПМ, °C	104

На рис. 2 наведено залежність зміни потужності двигуна від температури ПМ.

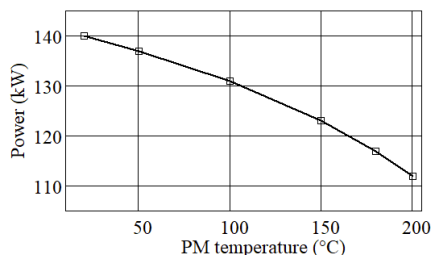


Рис. 2. Залежність зміни потужності СДПМ від температури ПМ

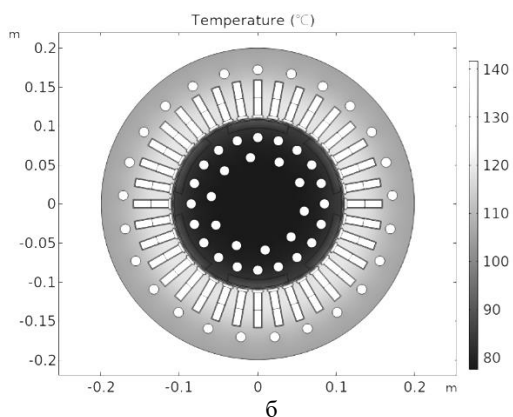
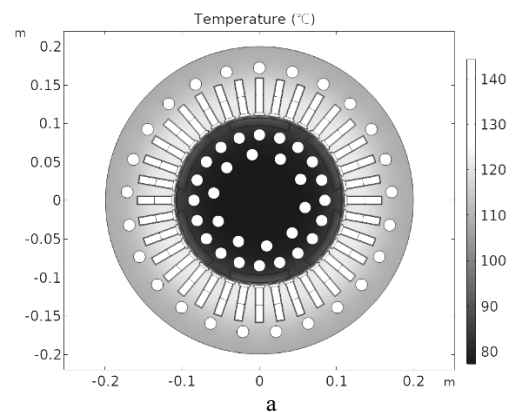
Розрахункові дані засвідчують значний вплив нагріву ПМ на характеристики СДПМ. При однакових напрузі і струмі живлення обмотки статора потужність двигуна зменшується зі 140 кВт до 128 кВт.

Значна чутливість енергетичних характеристик потужних СДПМ до температурних змін вимагає впровадження додаткових конструктивних рішень для температурної стабілізації ПМ. Для покращення ефективності відведення тепла і забезпечення оптимального температурного режиму роботи двигуна можна застосувати кілька простих конструктивних удосконалень. Наприклад:

- збільшити кількість вентиляційних каналів ротора;
- розмістити вентиляційні канали ротора ближче до ПМ, що покращує теплообмін і знижує температуру ПМ;
- оптимізувати геометрію вентиляційних каналів статора і ротора шляхом зменшення їх діаметру, що збільшує швидкість потоку охолоджуючого повітря

через канали і, відповідно, підвищує коефіцієнт тепловіддачі в них згідно з виразом (9).

На рис.3 а, б зображено переріз активних зон та теплового поля двох удосконалених варіантів СДПМ (№ 1 та № 2). Удосконалення в варіанті №1 полягали у збільшенні кількості вентиляційних каналів ротора (з 10 до 30) та розташуванні їх у 2 шари як показано на рис. 3, а. При чому зовнішній шар каналів розміщений ближче до ПМ у порівнянні базовим варіантом СДПМ. У варіанті №2 додатково зменшено діаметр вентиляційних каналів (з 15 мм до 12 мм), як показано на рис. 3, б.



а – №1 в номінальному режимі роботи;

б – №2 в номінальному режимі роботи

Рис. 3. Розподіл теплового поля удосконаленого СДПМ

Порівняльний аналіз зазначених варіантів показав суттєве зниження температури ПМ у порівнянні з базовим СДПМ. Температура ПМ зменшилась з 104 °C до 90 °C і 87,5 °C для варіантів №1 та №2 відповідно. Для варіанту №2 додатково зменшились температури осердя статора і обмотки з 108 °C до 106 °C і з 144 °C до 141,5 °C відповідно.

Суттєва різниця в температурах ПМ між базовим і удосконаленими варіантами пояснюється:

- збільшенням площі тепловіддачі від постійних магнітів до охолоджуючого холодоагенту;
- у варіанті № 2 діаметр вентиляційних каналів статора і ротора зменшений з 15 мм до 12 мм, що призвело до збільшення швидкості повітря в каналах (з 23,3 м/с до 28 м/с) і згідно з виразом (9) збільшило коефіцієнт тепловіддачі в цих каналах (з 85 Вт/(м²·°C) до 103 Вт/(м²·°C)) у порівнянні з варіантом № 1.

Детальне порівняння вентиляційних і теплових характеристик СДПМ приведено в табл. 4.

Таблиця 4 – Порівняння характеристик СДПМ

Показник	Варіант виконання		
	Базовий	№1	№2
Кількість вентиляційних каналів ротора	10	30	30
Діаметр каналів, мм	15	15	12
Швидкість повітря в каналі між ярмом і станиною, м/с	32,7	26,8	33
Швидкість повітря в каналах статора, м/с	28,53	23,3	28
Швидкість повітря в каналах ротора, м/с	28,55	23,3	28
Коефіцієнт тепловіддачі в каналі між ярмом і станиною, Вт/(м ² ·°C)	77	65,8	77,5
Коефіцієнти тепловіддачі в аксальних каналах статора і ротора, Вт/(м ² ·°C)	99,6	85	103
Температура обмотки статора, °C	144	144	141,5
Максимальна температура осердя статора, °C	108	108	106
Температура ПМ, °C	104	90	87,5

Суттєве збільшення кількості вентиляційних каналів ротора створює додатковий магнітний опір для основного магнітного потоку, а також може зменшити механічну міцність ротора СДПМ. Це потребує додаткового аналізу шляхом проведення електромагнітного і механічного розрахунків двигуна.

Висновки. 1. Досліджено вплив нагріву постійних магнітів на енергетичні характеристики СДПМ.

2. Встановлено, що при нагріві ПМ СДПМ потужністю 140 кВт втрачає близько 8-10% потужності у порівнянні з паспортними даними.

3. Запропоновано два удосконаленні варіанти СДПМ, з покращеною температурною стабілізацією ПМ. Температура ПМ знизилась на 14 °C і 16,5 °C для варіантів №1 та №2 відповідно. Для варіанту №2 додатково зменшилась температура обмотки та осердя статора на 2 °C та 2,5 °C відповідно. Зниження температури ПМ зменшило втрати потужності двигуна внаслідок погіршення магнітних характеристик ПМ.

Список літератури

- 1 T. Sebastian, "Temperature effects on torque production and efficiency of PM motors using NdFeB magnets," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, no. 2, pp. 353–357, 1995. doi: [10.1109/28.370284](https://doi.org/10.1109/28.370284)
- 2 Q. Shi, Y. Dong, B. Li, and C. Zhou, "Analysis of electromagnetic vibration and noise of permanent magnet synchronous motor based on field-circuit coupling," Journal of Vibroengineering, vol. 24, no. 6, pp. 1188–1199, Jun. 2022, doi: [10.21595/jve.2022.22266](https://doi.org/10.21595/jve.2022.22266)
- 3 O. Bilgin and F.A. Kazan, "The effect of magnet temperature on speed, current and torque in PMSMs," 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp. 2080–2085, Sep. 2016, doi: 10.1109/icelmach.2016.7732809

- 4 Васьковський, Ю. М. Математичне моделювання електричних машин з постійними магнітами / Ю. М. Васьковський, Ю. А. Гайдено, М. А. Коваленко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського.
- 5 Васьковський Ю.М. *Польовий аналіз електричних машин*. Київ, НТУУ «КПІ», 2007. 191 с
- 6 I. Petrov, D. Egorov, J. Link, R. Stern, S. Ruoho, and J. Pyrhonen, "Hysteresis Losses in Different Types of Permanent Magnets Used in PMSMs," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 3, pp. 2502–2510, Mar. 2017, doi: [http://doi.org/10.1109/tie.2016.2548440](https://doi.org/10.1109/tie.2016.2548440).
- 7 M. Baranski, A. Demenko, W. Szelag, and W. Lyskawinski, "Experimental verification of temperature effects on functional parameters in a line start permanent magnet synchronous motor," IET Science, Measurement & Technology, vol. 18, no. 9, pp. 491–498, May 2024, doi: [http://doi.org/10.1049/smt2.12206](https://doi.org/10.1049/smt2.12206).
- 8 Гольдберг О.Д., Гури́н Я.С., Сви́риденко И.С. Проектирование электрических машин. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 2001. 430 с.
- 9 Филипов И. Ф. Теплообмен в электрических машинах. Ленинград, 1986, 255 с.
- 10 Васьковський Ю.М., Нестеренко Д.С. Комплексна мультифізична математична модель фізичних процесів в потужних тягових електричних машинах. *Технічна електродинаміка*, №2, 2025, с. 49-56 doi: [10.15407/techned2025.02.049](https://doi.org/10.15407/techned2025.02.049)

References (transliterated):

- 1 T. Sebastian, "Temperature effects on torque production and efficiency of PM motors using NdFeB magnets," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, no. 2, pp. 353–357, 1995. doi: [10.1109/28.370284](https://doi.org/10.1109/28.370284)
- 2 Q. Shi, Y. Dong, B. Li, and C. Zhou, "Analysis of electromagnetic vibration and noise of permanent magnet synchronous motor based on field-circuit coupling," Journal of Vibroengineering, vol. 24, no. 6, pp. 1188–1199, Jun. 2022, doi: [10.21595/jve.2022.22266](https://doi.org/10.21595/jve.2022.22266)
- 3 O. Bilgin and F. A. Kazan, "The effect of magnet temperature on speed, current and torque in PMSMs," 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp. 2080–2085, Sep. 2016, doi: 10.1109/icelmach.2016.7732809
- 4 Vaskovskyi, Yu.M., Haidenko Yu.A., Kovalenko M.A. *Mathematical Modeling of Electric Machines with Permanent Magnets*. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Ukr.).
- 5 Vaskovskyi Y.M. Field analysis of electric machines. Kyiv, NTUU "KPI", 2007. 191 p. (Ukr.).
- 6 I. Petrov, D. Egorov, J. Link, R. Stern, S. Ruoho, and J. Pyrhonen, "Hysteresis Losses in Different Types of Permanent Magnets Used in PMSMs," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 3, pp. 2502–2510, Mar. 2017, doi: [http://doi.org/10.1109/tie.2016.2548440](https://doi.org/10.1109/tie.2016.2548440).
- 7 M. Baranski, A. Demenko, W. Szelag, and W. Lyskawinski, "Experimental verification of temperature effects on functional parameters in a line start permanent magnet synchronous motor," IET Science, Measurement & Technology, vol. 18, no. 9, pp. 491–498, May 2024, doi: [http://doi.org/10.1049/smt2.12206](https://doi.org/10.1049/smt2.12206).
- 8 Goldberg O.D., Gurin Ya.S., Sviridenko I.S. Design of electric machines. 2nd ed., revised and supplemented. Moscow: Vysshaya shkola, 2001. 430 p. (Rus).
- 9 Filippov I.F. Heat transfer in electric machines. Leningrad, 1986, 255 p. (Rus).
- 10 Vaskovskyi Yu.M., Nesterenko D.S. "Complex multiphysical mathematical model of physical processes in powerfull traction electric machines." *Tekhnichna Elektrodynamika*, no. 2, 2025, pp. 49-56. (Ukr.). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2025.02.049>.

Надійшла (received) 15.04.25

Відомості про авторів / About the authors

Васьковський Юрій Миколайович (Vaskovskyi Yuriy) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри електромеханіки; м. Київ, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1262-0939>; e-mail: yun157@gmail.com.

Нестеренко Денис Сергійович (Nesterenko Denys) – аспірант кафедри електромеханіки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; м. Київ, Україна. e-mail: denial112222@gmail.com.