

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-365-37>
УДК 621.313.332

ВАСИЛЕЦЬ СВЯТОСЛАВ

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне
<https://orcid.org/0000-0003-1299-8026>
e-mail: s.vasylets@nuwm.edu.ua

ВАСИЛЕЦЬ КАТЕРИНА

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне
<https://orcid.org/0000-0002-7590-0754>
e-mail: k.s.vasylets@nuwm.edu.ua

ІЛЬЧУК ВОЛОДИМИР

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне
<https://orcid.org/0000-0001-9682-6066>
e-mail: v.v.ilchuk@nuwm.edu.ua

ЗАЛУЖНИЙ АНТОНІЙ

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне
<https://orcid.org/0000-0003-2755-1040>
e-mail: a.l.zaluzhnyi@nuwm.edu.ua

ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ НА ФУНКЦІОНУВАННЯ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ІЗ САМОЗБУДЖЕННЯМ

Одержано оцінки значень параметрів лінійної регресійної моделі, що пов'язує необхідну ємність збудження асинхронного генератора для забезпечення номінальної вихідної напруги з частотою обертання ротора та потужністю активного навантаження. Величина необхідної ємності залежить від потужності навантаження прямопропорційно, від частоти обертання – обернено пропорційно. Лінійна взаємодія вказаних факторів не чинить суттєвого впливу на необхідну ємність.

Ключові слова: асинхронний генератор, конденсаторний збуджувач, частота обертання, потужність навантаження, змінна топологія.

VASYLETS SVIATOSLAV, VASYLETS KATERYNA, ILCHUK VOLODYMYR, ZALUZHNYI ANTONI

National University of Water and Environmental Engineering, Rivne

ASSESSMENT OF EXTERNAL FACTORS INFLUENCE ON SELF-EXCITED INDUCTION GENERATOR OPERATION

The object of the study is an induction generator, the self-excitation of which is provided by a capacitor exciter. Existing solutions for regulating self-excited induction generator do not ensure the stability of the output voltage when changing the rotation frequency and load power. This determines the need to assess the influence of external factors on the functioning of self-excited induction generator. During the study, the exciter capacitance was changed discretely by switching capacitors and changing their connection scheme. The subject of the study is the process of changing the output voltage of an induction generator depending on the rotation frequency, load power and exciter capacitance. The study was conducted using a computer model of an induction generator equipped with a capacitor exciter with a variable topology. The numerical experiment was conducted according to the full factorial experiment planning matrix with a central point. For each point of the plan, the self-excitation of the generator was simulated for each level of exciter capacitance. The coefficients of the linear mathematical model were estimated during regression analysis. The results of the full factorial experiment confirm the significant influence of the load power and rotation frequency on the required capacitance value to maintain the rated output voltage of the generator. Estimates of the parameters values of the linear regression model were obtained, which relates the required excitation capacitance of an induction generator to provide the rated output voltage with the rotor rotation frequency and the power of the active load. In this case, the component corresponding to the linear interaction of factors was rejected as statistically insignificant. It was established that the value of the required capacitance depends on the load power directly proportionally, and on the rotation frequency – inversely proportionally. The results of the study can be used when developing a control system for the operating parameters of an induction generator.

Keywords: induction generator, capacitor exciter, rotation frequency, load power, variable topology.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.02.2026
Прийнята до друку / Accepted 11.03.2026
Опубліковано / Published 28.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Васи́лець Святослав, Васи́лець Катерина, Ільчук Володимир, Залужний Антоній

Постановка проблеми

Рада Європи у лютому 2026 року ухвалила зміни до закону про клімат [1], відповідно до яких до 2040 року викиди парникових газів у Європейському Союзі мають знизитися на 90% порівняно з рівнем 1990 року. Суттєве скорочення викидів, відповідно до плану REPowerEU, має забезпечити заміна викопного палива на відновлювальні джерела. Очікується, що суттєвий імпульс розвитку такому процесу надасть ініціатива Європейської комісії European Grids Package (COM/2025/1005, грудень 2025 року). Відновлення пошкоджених енергогенеруючих потужностей та електромереж України також передбачає широке впровадження відновлюваних джерел. Зокрема, до 2050 року в Україні потужність вітрової генерації планують підвищити до 140 ГВт [2].

Більше 60% вітроенергетичних установок обладнані асинхронними генераторами [3]. Серійно випускаються такі генератори потужністю до декількох МВт. Наприклад, відомо про використання вітрових турбін Saint-Rémy-des-Landes (Франція), MWT-62/1000A (Японія) потужністю 1 МВт. Випускаються асинхронні

генератори з короткозамкненим або фазним ротором. Генераторний режим роботи асинхронної машини передбачає наявність джерела реактивної ємнісної потужності, яке забезпечує самозбудження. Принцип самозбудження полягає у збільшенні залишкової електрорушійної сили генератора під час пуску за рахунок ємнісного струму збудження. Основним недоліком асинхронного генератора при роботі в автономному режимі є залежність величини вихідної напруги від потужності навантаження та частоти обертання ротора. Коригувати вихідну напругу можливо шляхом зміни величини ємності збуджувача. Однак, існуючі способи регулювання збуджувача не забезпечують високої якості вихідної напруги.

Виходячи з цього, актуальною видається проблема підтримання номінальних параметрів вихідної напруги асинхронного генератора із самозбудженням при впливі зовнішніх факторів.

Аналіз останніх джерел

Самозбудження асинхронного короткозамкненого генератора, що працює у складі автономної мережі, може здійснюватися трифазним конденсатором, який приєднується паралельно до статорних обмоток [4]. Однак, така схема не забезпечує стабільність вихідної напруги при зміні потужності навантаження або частоти обертання ротора первинною турбіною [5]. Відомо використання додаткових послідовно ввімкнених конденсаторів, застосування яких розширює діапазон самозбудження [6]. Однак, при зниженні частоти обертання ротора генератора система може втратити стійкість [7]. Відомо про використання декількох паралельно з'єднаних трифазних конденсаторів, при комутації яких загальна ємність збуджувача змінюється [8]. Однак, така схема дозволяє одержати обмежену (до декількох десятків) кількість кроків зміни ємності, що недостатньо для забезпечення якісного регулювання. У роботі [9] запропоновано використовувати баластне навантаження, яке дасть змогу стабілізувати роботу генератора при дії збурень. Проте енергоефективність такого способу є низькою. У роботі [10] запропоновано використовувати тиристорний регулятор напруги для керування ємнісним струмом збудження асинхронного генератора. Однак, у такому випадку струм збудження не є синусоїдним, що погіршує якість вихідної напруги. Нестабільність амплітуди та частоти вихідної напруги асинхронного генератора викликає необхідність розроблення стратегій керування, особливо при роботі генератора у складі автономної мікрогріду. У роботі [11] запропоновано застосувати для асинхронного генератора з двостороннім живленням принципи керування, що повторюють технологію віртуального синхронного генератора. Однак, не розкриті практичні аспекти реалізації такого підходу, зокрема – регулювання ємнісного струму збудження.

Таким чином, існуючі рішення з регулювання асинхронного генератора із самозбудженням не забезпечують стабільність вихідної напруги при зміні частоти обертання та потужності навантаження. Це визначає необхідність оцінювання впливу зовнішніх факторів на функціонування асинхронного генератора із самозбудженням.

Метою роботи є забезпечення номінального рівня вихідної напруги асинхронного генератора при зміні потужності навантаження та частоти обертання ротора.

Виклад основного матеріалу

Об'єкт дослідження – асинхронний генератор, самозбудження якого забезпечується конденсаторним збуджувачем. Ємність збуджувача змінюється дискретно шляхом комутації конденсаторів та зміни схеми їх з'єднання [12]. Кожна фаза збуджувача включає 3 групи, у кожній групі – 2 конденсатори.

Предмет дослідження – процес зміни вихідної напруги асинхронного генератора залежно від частоти обертання, потужності навантаження та ємності збуджувача.

Висувається основна гіпотеза дослідження – використання конденсаторного збуджувача зі змінною топологією дає можливість підтримувати вихідну напругу асинхронного генератора в межах $\pm 3\%$ від номінального рівня при зміні частоти обертання ротора та потужності навантаження.

Для дослідження функціонування генератора проведено чисельний факторний експеримент з використанням комп'ютерної Simulink-моделі, рис. 1.

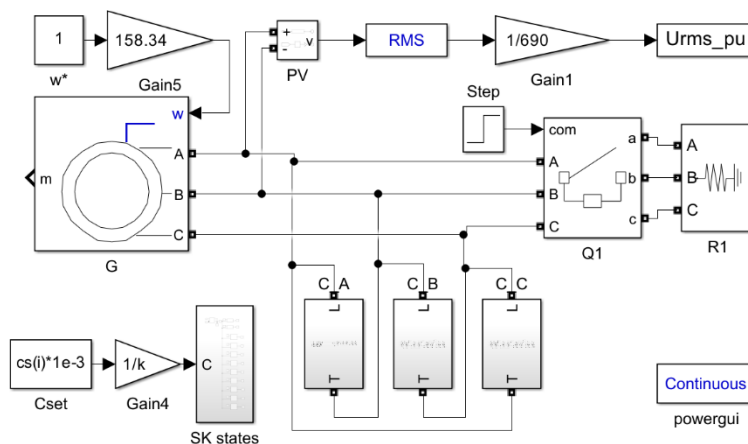


Рис. 1. Simulink-моделі асинхронного генератора, що обладнаний конденсаторним збуджувачем зі змінною топологією

Моделювалося функціонування асинхронного генератора SWT-2.3-101 (Siemens, Німеччина) з наступними номінальними значеннями параметрів: потужність 2,3 МВт; напруга 690 В; частота обертання ротора 1512 об/хв; $R_s=1,102$ мОм; $R_r=1,497$ мОм; $L_{ls}=L_{lr}=0,06492$ мГн; $L_m=2,13461$ мГн. Генератор моделювався Simulink-блоком Asynchronous Machine, рис. 1. Модель враховувала насичення сталі. Від генератора одержувало живлення активне навантаження R1 потужністю 2,3 МВт, яке комутувалося вимикачем Q1. До виводів статора генератора було приєднано модель конденсаторного збуджувача, фази якого C_A, C_B, C_C з'єднані за схемою «трикутник». Кожна фаза моделі, рис. 2, включала конденсатори та ідеальні ключі, що реалізували принцип дії збуджувача зі змінною топологією [12]. Ємності конденсаторів мали наступні значення: $C_{1,1}=1$ мФ; $C_{1,2}=1,5$ мФ; $C_{2,1}=2$ мФ; $C_{2,2}=2,5$ мФ; $C_{3,1}=3$ мФ; $C_{3,2}=3,5$ мФ; $C_{4,1}=4$ мФ; $C_{4,2}=4,5$ мФ. Паралельно до кожного конденсатора ввімкнено розрядний резистор 1 МОм.

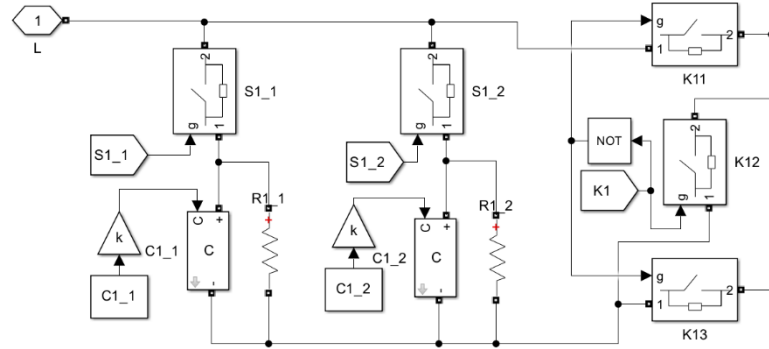


Рис. 2. Фрагмент Simulink-моделі конденсаторного збуджувача зі змінною топологією

Розглядався вплив двох факторів на асинхронний генератор: активна потужність P^* , в.о., електричного навантаження; частота ω^* , в.о., обертання ротора. Приймаючи в якості функції цілі значення фазної ємності C^* , в.о., збуджувача, при якій вихідна напруга генератора $U^*=1$ в.о., лінійна математична модель об'єкта дослідження була представлена у вигляді:

$$C^* = a_0 + a_1 P^* + a_2 \omega^* + a_{12} P^* \omega^*. \quad (1)$$

Після кодування факторів відповідно до табл. 1 математична модель набула вигляду:

$$C^* = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2. \quad (2)$$

Таблиця 1

Характеристики факторів

Параметри	Фактори	Рівні факторів, в.о.			Інтервал варіювання I
		-1	0	+1	
P^*	x_1	0	0,5	1	0,5
ω^*	x_2	0,8	0,9	1	0,1

Чисельний експеримент проведено відповідно до матриці планування повного факторного експерименту типу 2^2 , табл. 2. Для кожного досліді отримано значення функції цілі, рис. 3.

Таблиця 2

Матриця планування та значення функції цілі повного факторного експерименту типу 2^2 з центральною точкою

№ досліді	x_1	x_2	C^* , в.о.
1	-1	-1	1,3757
2	+1	-1	1,8874
3	-1	+1	0,5188
4	+1	+1	1,0
5	0	0	1,0

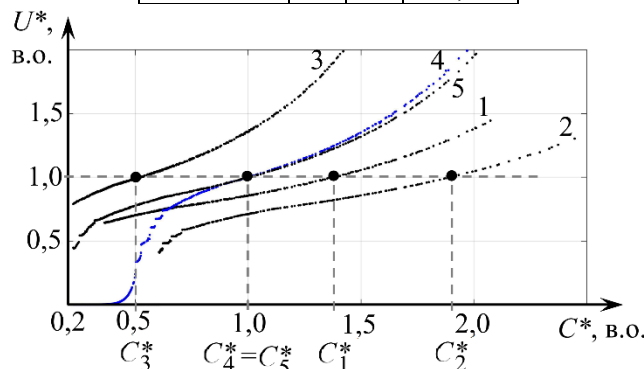


Рис. 3. Залежність напруги U^* , в.о., на виході генератора від ємності C^* , в.о., конденсаторного збуджувача: 1–5 – номер досліді згідно з табл. 2

Виконаний регресійний аналіз дозволив оцінити коефіцієнти математичної моделі (2), табл. 5. Скоригований коефіцієнт детермінації регресії становив 0,878.

Таблиця 5

Оцінки значень коефіцієнтів b моделі (10) за одержаними значеннями функції цілі C^*

Коефіцієнт моделі	Оцінка коефіцієнта	Стандартна похибка	Асимптотична значимість p
b_0	1,1117	0,0559	$2,7711 \cdot 10^{-4}$
b_1	0,2482	0,0739	$4,3742 \cdot 10^{-2}$
b_2	-0,4361		$9,7109 \cdot 10^{-3}$
b_{12}	-0,0076		$9,2431 \cdot 10^{-1}$

Для коефіцієнта b_{12} асимптотична значимість p є більшою від рівня довіри $\alpha=0,05$, тому для такого коефіцієнта, відповідно до двостороннього t-критерія, гіпотеза щодо незначущості не була відкинута. Тому компонент $b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2$ у моделі (2) є незначущим і модель набула вигляду:

$$C^* = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2. \tag{3}$$

Асимптотична значимість факторної дисперсії ($p = 3,7544 \cdot 10^{-3}$), табл. 6, є суттєво меншою від рівня значущості $\alpha = 0,05$, що свідчить про суттєвий вплив обох факторів на функцію цілі.

Таблиця 6

Результати дисперсійного аналізу

Тип дисперсії	Сума квадратів відхилень	Ступені свободи	Оцінка дисперсії	F-критерій	Асимптотична значимість p
Загальна	1,0728	6	$1,7881 \cdot 10^{-1}$	–	–
Факторна	1,0071	2	$5,0355 \cdot 10^{-1}$	30,641	$3,7544 \cdot 10^{-3}$
Залишкова	$6,5736 \cdot 10^{-2}$	4	$1,6434 \cdot 10^{-2}$	–	–

Переходячи в моделі (3) до натурних значень факторів, була одержана лінійна математична модель асинхронного генератора з конденсаторним збуджувачем змінної топології:

$$C^* = a_0 + a_1 P^* + a_2 \omega^*, \tag{4}$$

де $a_0=4,7884$, $a_1=0,4964$, $a_2=-4,3610$.

Аналізуючи одержані залежності $U^*(C^*)$, рис. 3, можна встановити суттєвий вплив ємності збуджувача на вихідну напругу генератора для різних значень факторів впливу. З порівняння залежностей 1 та 2, а також – 3 та 4, слідує, що збільшення потужності навантаження суттєво знижує вихідну напругу у всьому діапазоні регулювання ємності. Порівнюючи залежності 3 та 1, а також – 4 та 2, можна встановити, що зниження частоти обертання ротора генератора призводить до суттєвого зниження вихідної напруги. В околі номінальної напруги характеристики 4 та 5 (остання відповідає центральній точці плану) практично співпадають. Це можна пояснити взаємокомпенсацією впливів від зниження потужності навантаження та частоти обертання на функціонування генератора. Результати повного факторного експерименту підтверджують суттєвий вплив потужності навантаження та частоти обертання на необхідну величину ємності для підтримання номінальної вихідної напруги генератора. Інтерпретуючи модель (4), можна встановити наступне. Оскільки $a_1 > 0$, то залежність необхідної ємності від потужності навантаження є прямою. Коефіцієнт $a_2 < 0$, тому підвищення частоти обертання спричиняє зниження необхідної ємності. Величина $|a_2|$ перевищує $|a_1|$ орієнтовно на порядок, що свідчить про переважний вплив частоти обертання, порівняно з потужністю навантаження, на значення необхідної ємності.

Обмеження одержаних результатів обумовлені вузьким діапазоном зміни частоти обертання (від 0,8 в.о. до 1 в.о.), що прийнятий під час планування чисельного експерименту, та дослідженням навантаження лише активного типу. Основний недолік результатів дослідження – використання способу дискретного регулювання ємності збуджувача, оскільки ступінчата зміна ємності може супроводжуватися перенапругами. Результати дослідження можуть бути використані під час розроблення системи керування робочими параметрами асинхронного генератора. Під час подальших досліджень доцільно перевірити адекватність одержаних результатів експериментальним даним.

Висновки

Частота обертання ротора асинхронного генератора чинить, порівняно з потужність навантаження, переважний вплив на величину необхідної ємності збуджувача, яка забезпечує номінальний рівень вихідної напруги. Залежність величини необхідної ємності від потужності навантаження є прямою, від частоти обертання – оберненою. Лінійна взаємодія вказаних факторів не чинить суттєвого впливу на необхідну ємність. Використовуючи одержану модель асинхронного генератора, що обладнаний конденсаторним збуджувачем зі змінною топологією, для керування вихідною напругою можливо забезпечити номінальний рівень вихідної напруги генератора.

Література

1. Regulation of the European Parliament and of the Council amending Regulation (EU) 2021/1119 as regards the setting of a Union intermediate climate target for 2040. Brussels: The European Parliament, 2026. 21 p. URL: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-5-2026-INIT/en/pdf>
2. Енергетична стратегія України на період до 2050 року: розпорядження КМУ від 21.04.2023 р. № 373-п. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#Text>
3. Global Wind Turbine Generator Market. Trends and Forecast (2025 - 2030) URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/wind-turbine-generator-market>
4. Reddy S. R. K., Subrahmanyam J. B. V., Reddy A. S. Review of literature on self-excited induction generators and controllers. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*. 2021. Vol. 9(XII). P. 1576–1587. DOI: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.39584>
5. Goyal S. K., Palwalia D. K. Analysis of performance parameters and estimation of optimum capacitance for asynchronous generator. *Engineering Science and Technology*. 2016. Vol. 19(4). P. 1753–1762. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.05.015>
6. Khan M. F., Khan M. R., Iqbal A. Effects of induction machine parameters on its performance as a standalone self excited induction generator. *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. P. 2302–2313. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypr.2022.01.023>
7. Стійкість робочих режимів автономних асинхронних генераторів із самозбудженням / Красношарпа Н. та ін. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 3. С. 47–53. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.03.047>
8. Михайлюк О. Б. Задачі, що потребують розв'язання при використанні асинхронних генераторів на електростанціях відновлювальної енергетики. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2016. № 1. С. 96–100. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/download/1883/1883/0>
9. Roodsari B. N., Nowicki E. P., Freere P. A new electronic load controller for the self-excited induction generator to decrease stator winding stress. *Energy Procedia*. 2014. № 57. С. 1455–1464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.137>
10. Nurwati T., Fauzi Z. A., Purnomo H. Design and Construction of 3-Phase Induction Generator Excitation using Static VAR Compensator. 12th International Conference on Electrical Engineering (ICEENG), Cairo, Egypt. 2020. Pp. 11–16. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEENG45378.2020.9171764>
11. Aanalysis of the impact of grid-forming doubly-fed induction generator parameter on transient stability and small-signal stability / Hui Liu et. al. *Global Energy Interconnection*. 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2025.07.008>
12. Vasylets S., Vasylets K., Ilchuk V. Determination of regulation characteristics of capacitor exciter with variable topology for self-excited induction generator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 2(8 (134)). P. 17–25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.326178>

References

1. Regulation of the European Parliament and of the Council amending Regulation (EU) 2021/1119 as regards the setting of a Union intermediate climate target for 2040. Brussels: The European Parliament, 2026. 21 p. URL: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-5-2026-INIT/en/pdf>
2. Energy Strategy of Ukraine for the period until 2050: Cabinet of Ministers' order 21.04.2023 № 373-п. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#Text>
3. Global Wind Turbine Generator Market. Trends and Forecast (2025 - 2030) URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/wind-turbine-generator-market>
4. Reddy S. R. K., Subrahmanyam J. B. V., Reddy A. S. Review of literature on self-excited induction generators and controllers. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*. 2021. Vol. 9(XII). P. 1576–1587. DOI: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.39584>
5. Goyal S. K., Palwalia D. K. Analysis of performance parameters and estimation of optimum capacitance for asynchronous generator. *Engineering Science and Technology*. 2016. Vol. 19(4). P. 1753–1762. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.05.015>
6. Khan M. F., Khan M. R., Iqbal A. Effects of induction machine parameters on its performance as a standalone self excited induction generator. *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. P. 2302–2313. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypr.2022.01.023>
7. Stability of operating modes of autonomous asynchronous generators with self-excitation / Krasnosshapka N. et. al. *Technical electrodynamics*. 2024. № 3. P. 47–53. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.03.047>
8. Mykhailiuk O. B. Problems that need a solution while using asynchronous generator of renewable energy in power plants. *Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*. 2016. № 1. P. 96–100. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/download/1883/1883/0>
9. Roodsari B. N., Nowicki E. P., Freere P. A new electronic load controller for the self-excited induction generator to decrease stator winding stress. *Energy Procedia*. 2014. № 57. С. 1455–1464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.137>
10. Nurwati T., Fauzi Z. A., Purnomo H. Design and Construction of 3-Phase Induction Generator Excitation using Static VAR Compensator. 12th International Conference on Electrical Engineering (ICEENG), Cairo, Egypt. 2020. Pp. 11–16. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEENG45378.2020.9171764>
11. Aanalysis of the impact of grid-forming doubly-fed induction generator parameter on transient stability and small-signal stability / Hui Liu et. al. *Global Energy Interconnection*. 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2025.07.008>
12. Vasylets S., Vasylets K., Ilchuk V. Determination of regulation characteristics of capacitor exciter with variable topology for self-excited induction generator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 2(8 (134)). P. 17–25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.326178>