

**V.V. ЧУМАК, М.Я. ОСТРОВЕРХОВ, М.А. КОВАЛЕНКО, В.М. ГОЛОВКО, І.Я. КОВАЛЕНКО**

## **КОРЕКЦІЯ ВИХІДНОЇ ПОТУЖНОСТІ ГЕНЕРАТОРА БЕЗМУЛЬТИПЛІКАТОРНОЇ ВІТРОЕЛЕКТРОУСТАНОВКИ ПРИ ДИСКРЕТНИХ ТА ВИПАДКОВИХ ЗНАЧЕННЯХ ШВИДКОСТІ ВІТРУ**

Основним перетворювачем механічної енергії вітру в електричну у вітроустановках є електричний генератор. Як правило, в таких системах використовуються синхронні генератори із постійними магнітами на роторі. Головним недоліком такого конструктивного виконання є складність або і практична неможливість регулювати вихідні параметри генератора: напругу, потужність і т.ін. Відомі методи та засоби направлені на вирішення даної задачі відносяться до випадків, коли швидкість вітру є постійною, тобто незмінною. В реальних умовах характер вітру носить мінливий характер. Середньорічна швидкість вітру для України коливається в межах  $\approx 5-6$  м/с. Поточне значення швидкості вітру залежить від погодних умов, часу доби та пори року. Відповідно і характер вихідної потужності генератора буде мати мінливий характер. В даній роботі автори проводять оцінку ефективності корекції вихідної потужності генератора безмультиплікаторної вітроустановки при дискретних та випадкових значеннях швидкості вітру. Основною енергетичною установкою даного дослідження виступає магнітоелектричний синхронний генератор із двостороннім розташуванням магнітів на роторі та з аксіальним магнітним потоком. Для вирішення поставленої мети розроблено чисельну імітаційну математичну модель системи у складі із безмультиплікаторною вітроустановкою та магнітоелектричним синхронним генератором із двостороннім розташуванням магнітів на роторі та з аксіальним магнітним потоком в програмному пакеті MATLAB-Simulink. Розроблена імітаційна модель враховує зміну вихідних параметрів генератора при зміні швидкості вітру і навпаки, система в якій зміна вихідного стану генератора призводить до зміни параметрів ротора вітроагрегату. Мінливість та дискретність швидкості вітру реалізована в системі MATLAB-Simulink шляхом формування сигналів, значення яких в окремі моменти часу є випадковою величиною, розподіленою за нормальним (Гауссовим) законом із заздалегідь заданими параметрами. За допомогою розробленої математичної моделі проведено чисельні імітаційні експерименти, в яких досліджувалась ефективність корекції вихідної потужності досліджуваної системи при підключенні статичних конденсаторів до обмотки якоря генератора та при подачі струму на додаткову обмотку магнітоелектричного генератора. При підключенні додаткової підмагнічувальної ємності  $\approx 30$  мкФ до затискачів генератора спостерігається збільшення вихідної потужності на  $\approx 5-10\%$ . При подачі напруги на обмотку збудження  $U_f=8$  В спостерігається приріст вихідної потужності генератора  $\approx 30-40\%$  ніж без регулювання. Тому це є більш ефективним способом корекції вихідної потужності магнітоелектричного генератора. Розроблену математичну модель можливо використовувати в подальших дослідженнях для синтезу закону керування додатковою обмоткою магнітоелектричного генератора для максимально ефективного перетворення механічної енергії вітру в електричну.

**Ключові слова:** безмультиплікаторна вітроелектроустановка, магнітоелектричне збудження, корекція потужності, генератор з аксіальним потоком, математичне моделювання.

**V.V. CHUMACK, M.Y. OSTROVERKHOV, M.A. KOVALENKO, V.M. GOLOVKO, I.Y. KOVALENKO**

## **CORRECTION OF OUTPUT POWER OF NON-MULTIPLICATOR WIND ELECTRICAL INSTALLATION AT DISCRETE AND RANDOM SPEED VALUES**

The main converter of mechanical wind energy into electricity in wind turbines is an electric generator. Typically, such systems use synchronous generators with permanent magnets on the rotor. The main disadvantage of this design is the complexity or the impossibility of adjusting the output parameters of the generator: voltage, power, etc. Known methods and tools aimed at solving this problem relate to cases where the wind speed is constant, i.e. constant. In real conditions, the nature of the wind is changeable. The average annual wind speed for Ukraine varies between  $\approx 5-6$  m/s. The current value of wind speed depends on weather conditions, time of day and season. Accordingly, the nature of the output power of the generator will be variable. In this paper, the authors evaluate the effectiveness of the correction of the output power of the generator of the multiplier wind turbine at discrete and random values of wind speed. The main power unit of this study is a magnetoelectric synchronous generator with two-sided arrangement of magnets on the rotor and with axial magnetic flux. To solve this goal, a numerical simulation mathematical model of the system was developed, consisting of a multiplier-free wind turbine and a magnetoelectric synchronous generator with two-way arrangement of magnets on the rotor and with axial magnetic flux in the MATLAB-Simulink software package. The developed simulation model takes into account the change of the output parameters of the generator when the wind speed changes and vice versa, the system in which the change of the initial state of the generator leads to a change in the parameters of the rotor of the wind turbine. The variability and discreteness of wind speed is realized in the MATLAB-Simulink system by generating signals, the values of which at certain points in time are a random variable distributed according to the normal (Gaussian) law with predetermined parameters. Using the developed mathematical model, numerous simulation experiments were performed, which investigated the efficiency of correction of the output power of the studied system when connecting static capacitors to the armature winding of the generator and when applying current to the additional winding of the magnetoelectric generator. When connecting an additional magnetizing capacitance  $\approx 30$   $\mu$ F to the generator terminals, there is an increase in output power by  $\approx 5-10\%$ . When the voltage is applied to the excitation winding  $U_f = 8$  V, there is an increase in the output power of the generator  $\approx 30-40\%$  than without regulation. Therefore, it is a more efficient way to correct the output power of the magnetoelectric generator. The developed mathematical model can be used in further research to synthesize the control law of the additional winding of the magnetoelectric generator for the most efficient conversion of mechanical wind energy into electrical energy.

**Keywords:** non-multiplier wind turbine, magnetoelectric excitation, power correction, axial flow generator, mathematical simulation.

**Вступ.** Вітроенергетика та вітроенергетичні комплекси широко використовується у всьому світі як потужна альтернатива традиційним способам отримання електроенергії [1-3]. Це пов'язано із наявністю суттєвих переваг вітрових електростанцій перед іншими типами традиційних та нетрадиційних способів видобутку електроенергії [4, 5]. Основним перетворювачем механічної енергії вітру в електричну в таких системах використовуються синхронні генератори із постійними магнітами [6]. Недоліком яких є складність або практична неможливість регулювання вихідних параметрів

такого генератора при зміні зовнішніх факторів, таких як швидкість вітру [7].

Одним із варіантів вирішення такого завдання є використання магнітоелектричних генераторів із аксіальним магнітним потоком [8]. Конструктивно вони представлені тихохідними багатополюсними електрогенераторами з основним збудженням від постійних магнітів та додатковою безконтактною обмоткою підмагнічування. Магнітоелектричні торцеві синхронні генератори поєднують в собі переваги генераторів із постійними магнітами та генераторів із електромагнітним

збудженням [9].

В реальних умовах характер вітру носить мінливий характер. Середньорічна швидкість вітру для України коливається в межах  $\approx 5-6$  м/с [10]. Поточне значення швидкості вітру залежить від погодних умов, часу доби та пори року. Відповідно і характер вихідної потужності генератора буде мати мінливий характер. Завданням корекції вихідної потужності генератора вітроелектроустановки є отримання максимально можливої вихідної потужності при зміні швидкості вітру. Для цього існують декілька способів: корекція вихідної потужності за допомогою введення статичних конденсаторів та за допомогою додаткового збудження.

**Актуальність.** Актуальним напрямком є підвищення ефективності перетворення механічної енергії вітру в електричну для безмультиплікаторних вітроустановок. Це проводиться за рахунок використання магнітоелектричного синхронного генератора із аксіальним магнітним потоком.

Приріст вихідної потужності електрогенератора відбувається за рахунок роботи вітроустановки на максимумах механічної характеристики її ротора. Корекція робочої точки відбувається за рахунок застосування спеціальних засобів корекції: статичних конденсаторів та за допомогою додаткового збудження.

Основною енергетичною установкою даного дослідження виступає описаний авторами раніше магнітоелектричний синхронний генератор із аксіальним магнітним потоком [10, 11]. За основу взято імітаційну математичну модель безмультиплікаторної вітроустановки до якої внесені відповідні зміни та корективи [12]. В попередніх роботах проведено аналіз електромагнітного поля досліджуваного генератора. Результати розрахунків та аналізу електромагнітного поля, наведені в роботі використовуються як вихідні дані для побудови моделі електрогенератора в середовищі MATLAB-Simulink. А саме, використовується характер розподілу електромагнітного поля в повітряному проміжку, магнітний потік електрогенератора  $\Phi$ , потокощеплення  $\Psi$  та параметри обмоток (активні R та індуктивні опори L).

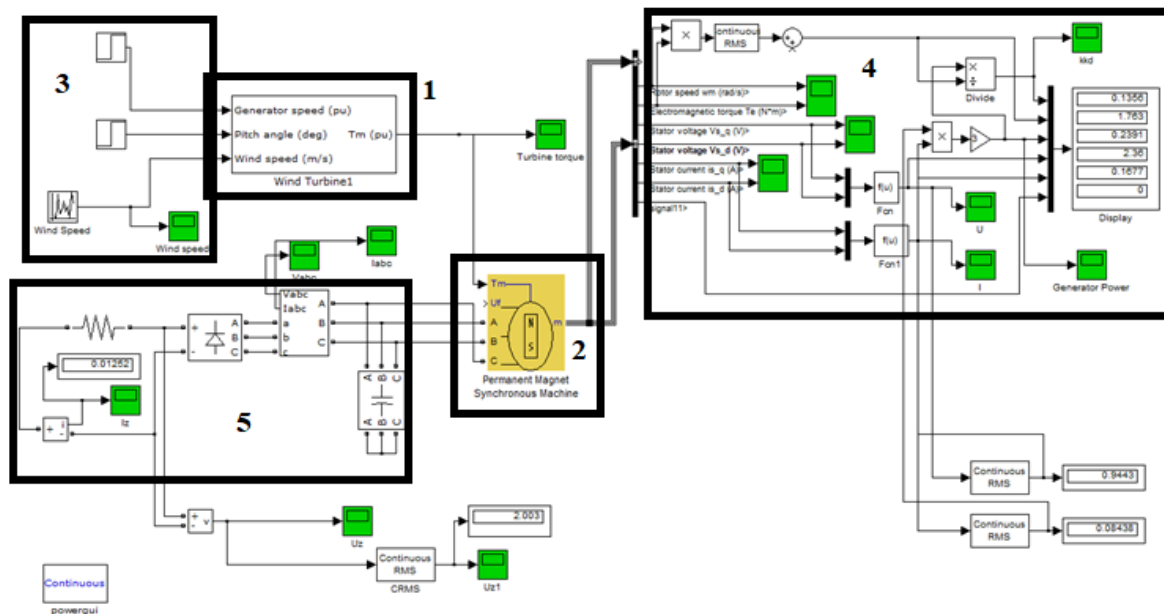


Рис. 2 – Імітаційна модель електрогенератора при дискретних та випадкових значеннях швидкості вітру

Результати розрахунку ротора вітроустановки [10, 12] використовуються як вихідні дані для реалізації моделі в середовищі MATLAB-Simulink.

Структурна блок-схема вітроустановки із електрогенератором наведена на рис. 1.

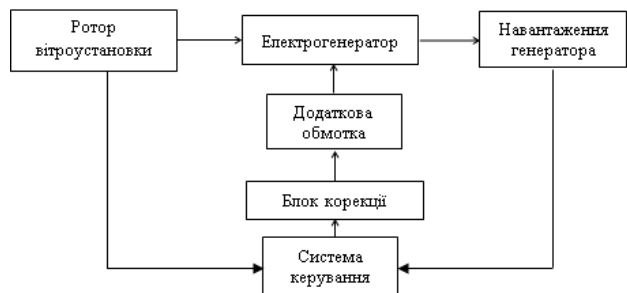


Рис. 1 – Структурна схема системи корекції вихідної потужності вітроустановки

**Метою** роботи є оцінка ефективності корекції вихідної потужності генератора безмультиплікаторної вітроустановки при дискретних та випадкових значеннях швидкості вітру.

Для оцінки приросту вихідної потужності генератора при зміні швидкості вітру необхідно розробити чисельну імітаційну математичну модель, яка враховує зміну вихідних параметрів генератора при зміні швидкості вітру і навпаки, система в якій зміна вихідного стану генератора призводить до зміни параметрів ротора вітроагрегату. Тобто, система має бути розроблена із жорстким зворотнім зв'язком та одночасно мати прив'язку до дискретних та випадкових значеннях швидкості вітру, які мають місце в реальних погодних умовах.

**Математична модель.** На рис. 2 наведено математична модель генератора, що досліджується електрогенератора в складі вітроустановки при підмагнічуванні обмотки якоря додатковою обмоткою та сторонньою смістю.

На рис. 2 наведено: 1 – блок ротора вітроустановки з параметрами лопаті NASA 40; 2 – блок, в якому задані нелінійні диференційні рівняння магнітоелектричного синхронного генератора із двостороннім розташуванням магнітів на роторі та аксіальним магнітним потоком; 3 – блок із базовими параметрами ротора вітрової турбіни та генератором випадкових чисел, який імітує мінливість швидкості вітру в межах 3-8 м/с; 4 – блок виміру, контролю, запису та обробки вихідних параметрів електрогенератора, навантаження та механічних параметрів системи в сукупності із системою зворотних зв'язків; 5 – блок, в якому реалізоване навантаження генератора у вигляді випрямляча, що працює на активне навантаження та блоку трифазного навантаження, що імітує підключення додаткової ємності.

Кожен із елементів імітаційної моделі в середовищі MATLAB-Simulink представлено окремим блоком, який в свою чергу, описується системою нелінійних (лінеаризованих) диференційних рівнянь. Наприклад, блок-схема ротора вітроустановки в системі MATLAB-Simulink має 3 логічних входи та один вихід, вихідною величиною моделі вітрової турбіни є величина механічного моменту, що на пряму прикладається до валу досліджуваного генератора.

Вважається, що жорсткість приводу вітрової турбіни нескінченна, а коефіцієнт тертя і інерція турбіни узгоджуються та реалізуються з відповідними коефіцієнтами генератора, що приєднується до турбіни. Вихідна потужність на валу ротора вітроустановки задається наступним рівнянням:

$$P_m = c_p(\lambda, \beta) \frac{\rho A}{2} v_w^3, \quad (1)$$

де  $P_m$  – вихідна механічна потужність ротора вітроустановки (Вт);

$c_p$  – коефіцієнт корисної дії вітрової турбіни;

$\rho$  – густина повітря (кг/м<sup>3</sup>);

$A$  – площа ротора вітроустановки;

$v_w$  – швидкість вітру (м/с);

$\lambda$  – коефіцієнт відношення швидкості обертання турбіни до швидкості вітру;

$\beta$  – кут нахилу лопаті.

В системі відносних одиниць, яка використовується в середовищі MATLAB-Simulink рівняння (1) можна записати у спрощеному вигляді:

$$P_m^* = k_p c_p^* v_w^{*3}, \quad (2)$$

де  $P_m^*$  – номінальна потужність в в.о. для заданих величин  $\rho$  та  $A$ ;

$c_p^*$  – максимальне значення коефіцієнта корисної дії;

$v_w^*$  – швидкість вітру в відносних одиницях. За базову швидкість вітру приймається очікувана (середня) величина вітру для конкретного регіону;

$k_p$  – коефіцієнт підсилення за потужністю для  $c_p^* = 1$  та  $v_w^* = 1$  коефіцієнт  $k_p$  приймається меншим або рівним 1.

За вихідні параметри вітрової турбіни в середовищі MATLAB-Simulink необхідно задати наступні параметри:

- номінальну вихідну механічну потужність на валу ротора вітроустановки;

- номінальну потужність електрогенератора (ВА). Даний параметр використовується для розрахунку вихідного номінального моменту;

- номінальну швидкість вітру (м/с) використовується в системі в.о. задається значення очікуваної (середньої) величини швидкості вітру для заданого регіону або швидкість, зав якої розвивається номінальна потужність вітроустановки;

- максимальну потужність при базовій швидкості вітру;

- базову швидкість вітру;

- кут атаки лопатей вітрової турбіни.

Для реалізації моделі електрогенератора використовується модифікована модель синхронної машини із постійними магнітами в середовищі MATLAB-Simulink.

Блок синхронної машини з постійними магнітами дозволяє моделювати режими генератора або двигуна. Модель електричної та механічної частин машини представлені усталеними та диференційними рівняннями другого порядку. Модель передбачає, що потік, створений постійними магнітами в статорі, є синусоїдальним, що означає, що електрорушійні сили є синусоїдальними.

При розробці математичної моделі синхронної магнітоелектричної машини з постійними магнітами, двостороннім статором та аксіальним магнітним потоком зроблені наступні припущення:

- повітряний проміжок рівномірний;

- вважається, що обмотка статора розподілена рівномірно;

- обмотки статора не впливають одна на одну.

Загальне рівняння, що описує роботу синхронної машини із постійними магнітами та аксіальним магнітним потоком наведено нижче. Наявність додаткової підмагнічуючої обмотки враховується в системі рівнянь додатковою складовою:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_s} \left( u_d - R_s i_d - L_m(i_f) \frac{di_f}{dt} + \omega Z_p L_s i_q \right); \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_s} \left( u_q - R_s i_q - \omega Z_p L_s i_d - \omega Z_p L_m(i_f) i_f - \omega Z_p \Psi_0 \right); \\ \frac{di_f}{dt} = \frac{1}{L_f} \left( u_f - R_f i_f + L_m(i_f) \frac{di_d}{dt} \right); \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_c); \\ M = \frac{3}{2} Z_p [\Psi_0 i_q + L_m(i_f) i_q i_f] \end{cases} \quad (3)$$

де  $L_m$  – індуктивність додаткової обмотки;  $R_f$  – активний опір додаткової обмотки;  $U_f, i_f$  – напруга та струм додаткової обмотки;  $L_q, L_d$  – індуктивності по осі  $q$  та  $d$ ;  $R$  – активний опір обмотки якоря генератора;  $i_q, i_d$  – струми по осям  $q$  та  $d$ ;  $v_q, v_d$  – напруги по осям  $q$  та  $d$ ;  $\omega_r$  – кутова швидкість ротора генератора;  $\lambda$  – амплітуда магнітного потоку, що створюється постійними магнітами та додатковою обмоткою;  $p$  – кількість пар полюсів генератора;  $T_e$  – електромагнітний момент досліджуваного генератора.

Потокозчеплення кожної з обмоток статора визначається комбінацією складових потокозчеплень:

$$\Psi_{s1}(i_f) = \Psi_{s1s1} + \Psi_{s1s2} + \Psi_{s1r} + \Psi_m(i_f), \quad (4)$$

$$\Psi_{s2}(i_f) = \Psi_{s2s2} + \Psi_{s2s1} + \Psi_{s2r} + \Psi_m(i_f), \quad (5)$$

де  $\Psi_{s1s1}$ ,  $\Psi_{s2s2}$  – потокозчеплення abc та хуз обмотки статора;  $\Psi_{s1s2}$ ,  $\Psi_{s2s1}$  – взаємне потокозчеплення abc та хуз обмоток статора;  $\Psi_{s1r}$ ,  $\Psi_{s2r}$  – результуюче потокозчеплення abc та хуз обмоток статора і потокозчеплення постійних магнітів;  $\Psi_m$  – величина потокозчеплення додаткової обмотки підмагнічування.

Величина індуктивностей  $L_q$  та  $L_d$  є результатом залежності між фазною індуктивністю та положенням ротора. Наприклад, індуктивність, що виміряна між фазами a та b (при розімкненій c) описується наступним рівнянням:

$$L_{ab} = L_d + L_q + (L_q - L_d) \cos\left(2\theta_e + \frac{\pi}{3}\right), \quad (6)$$

Рівняння динаміки механічної частини генератора описується наступними рівняннями:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \omega_r &= \frac{1}{J} (T_e - F\omega_r - T_m) \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega_r \end{aligned}, \quad (7)$$

де  $J$  – момент інерції ротора;  $F$  – коефіцієнт в'язкості тертя ротора;  $\theta$  – кутове положення ротора генератора;  $T_m$  – механічний момент на валу.

Для моделювання мінливості швидкості вітру використовується блок "Uniform Random Number" в системі Simulink. За допомогою даного блоку забезпечується формування сигналів, значення яких в окремі моменти часу є випадковою величиною, розподіленою за нормальним (Гаусовим) законом із заданими параметрами.

До числа параметрів налаштування блоку "Uniform Random Number" входять: Minimum – нижня межа випадкової величини для швидкості вітру; Maximum – верхня межа швидкості вітру; Initial seed – початкове значення бази генератора випадкових чисел; Sample time – дискрет часу, тобто час, через який змінюються випадкові величини швидкості вітру.

На рис. 3 наведено приклад залежності швидкості вітру від часу при заданих налаштуваннях блоку випадкових чисел.

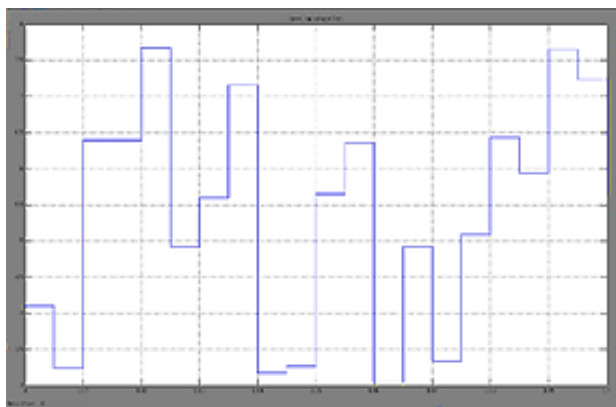


Рис. 3 – Дискретна зміна швидкості вітру від часу

Загальний вигляд математичної моделі для дослідження корекції вихідної потужності системи вітроагрегат-електрогенератор при підмагнічуванні сторонньою ємністю та додатковою обмоткою та мінливій швидкості вітру відрізняється від стандартних моделей системи. Головні відмінності обумовлені тим, що:

- відсутній зворотній зв'язок в системі за напругою генератора (не виконується жорстка стабілізація вихідної напруги при зміні навантаження);
- швидкість вітру  $\epsilon$  не константою, а змінюється випадково в залежності від часу;
- основний магнітний потік генератора утворюється лише за рахунок постійних магнітів генератора (для режиму підмагнічування ємністю);
- не використовується обмотка підмагнічування генератора, а отже відсутній вхідний сигнал генератора  $U_f$  та вихідний сигнал генератора (для режиму підмагнічування ємністю);
- ємність додаткових конденсаторів в обмотці якоря генератора приймається постійною.

Математичне моделювання виконується при постійному активному навантаженні генератора (моделювання при зміні швидкості обертання ротора генератора) та при постійній додатковій ємності на затискачах генератора.

Алгоритм розрахунку для даного варіанту імітаційної моделі наступний:

- задаємося постійним опором навантаження  $R=40$  Ом;
- швидкість вітру задається блоком "Uniform Random Number";
- задаються декілька значень додаткової ємності в обмотці якоря генератора  $C=10$  мФ,  $C=30$  мФ,  $C=100$  мФ;
- розраховується значення струму, напруги та потужності досліджуваного генератора;

Відповідно залежність вихідної механічної потужності ротора вітроагрегату від часу  $T_m=f(t)$  наведено на рис. 4.

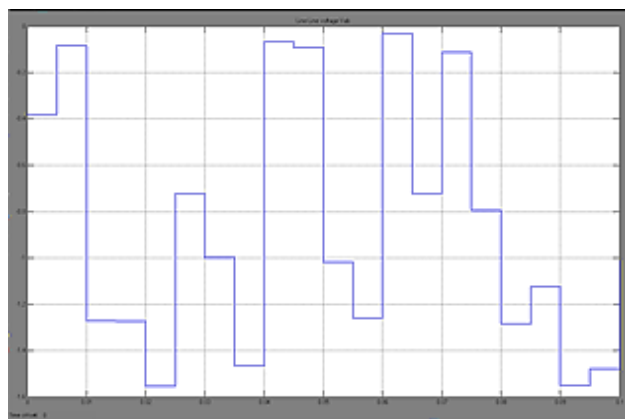


Рис. 4 – Залежність механічного моменту ротора вітроагрегату від часу

Залежність миттєвого значення напруги  $U_1=f(t)$  на виході генератора від часу при мінливій швидкості вітру показано на рис. 5.

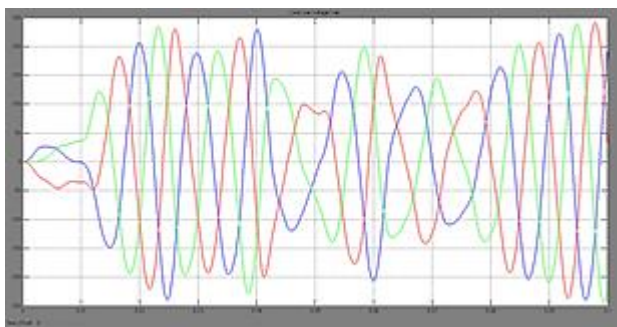


Рис. 5 – Залежність миттєвої напруги обмотки якоря генератора від часу

Нелінійність напруги в перші моменти часу пояснюється низьким значенням швидкості вітру в початковий момент часу. З рис. 5 випливає, що розроблена модель адекватно реагує на зміну швидкості вітру на вході ротора вітрової турбіни: при зменшенні швидкості вітру напруга падає, а при збільшенні швидкості вітру напруга зростає.

Усереднене (середньоквадратичне) значення напруги на виході генератора в кожен момент часу при зміні швидкості вітру наведено на рис. 6.

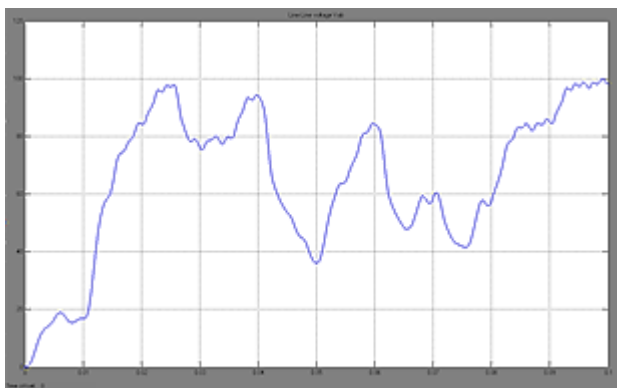


Рис. 6 – Середньоквадратичне значення напруги на виході генератора

Згідно з рис. 6, середнє значення напруги на виході генератора коливається від  $\approx 20$  В при швидкості вітру  $\approx 3,2$  м/с до максимальних  $\approx 100$  В при швидкості вітру  $\approx 7,7$  м/с.

Середньоквадратичне значення струму на виході генератора при дискретній зміні швидкості вітру наведено на рис. 7.

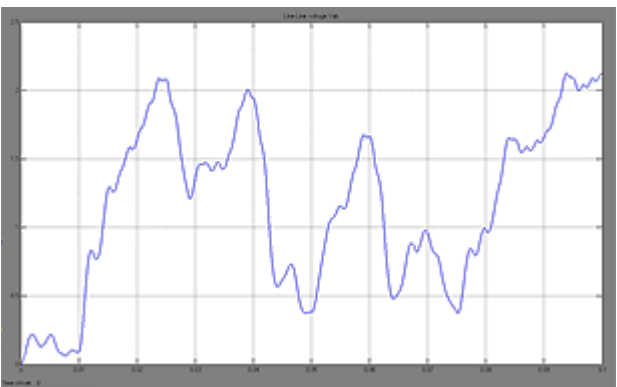


Рис. 7 – Середньоквадратичне значення струму на виході генератора

По рис. 7 видно, що струм також змінюється пропорційно зміні швидкості вітру (рис. 4) та напруги (рис. 6) за затискачах генератора. Діюче значення фазного струму в обмотці якоря генератора коливається від  $\approx 0,2$  А при швидкості вітру  $\approx 3,2$  м/с до  $\approx 2,1$  А при швидкості вітру  $\approx 7,7$  м/с.

Залежність діючого значення сумарної вихідної активної потужності електрогенератора  $P_1=f(t)$  при мінливій швидкості вітру наведено на рис. 8.

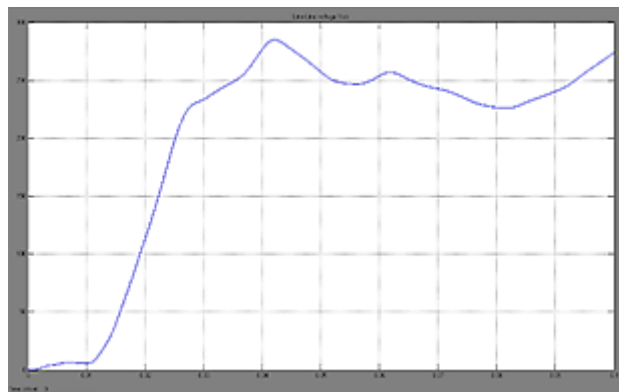


Рис. 8 – Залежність вихідної потужності генератора від часу

При дискретній чи випадковій зміні швидкості вітру буде змінюватись і швидкість обертання ротора синхронного генератора. Цей процес враховує момент інерції ротора та описується рівнянням (7). На рис. 9 наведено залежність швидкості  $n=f(t)$  ротора генератора від часу.

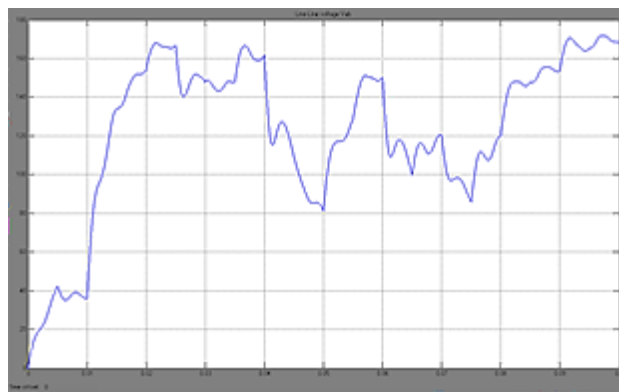


Рис. 9 – Залежність швидкості ротора генератора від часу

З отриманих по рис. 9 даних випливає, що швидкість обертання ротора генератора коливається від  $\approx 40$  об/хв при коливанні швидкості вітру  $\approx 3,2$  м/с до  $\approx 170$  об/хв при коливанні швидкості вітру  $\approx 7,7$  м/с. По отриманим даним видно, що швидкість обертання ротора генератора відповідає швидкісному діапазону безмультиплікаторної вітроустановки.

Задача корекції вихідної потужності генератора полягає у підвищенні ефективності перетворення механічної енергії вітру в електричну. В рамках роботи проведено аналіз ефективності корекції потужності при підключенні додаткової ємності та при подачі струму на додаткову обмотку.

Порівняння миттєвого значення напруги при підключенні конденсаторів ємністю 30 мкФ (верхня крива)

та без регулювання (нижня крива) на виході генератора від часу при мінливій швидкості вітру наведено на рис. 10.

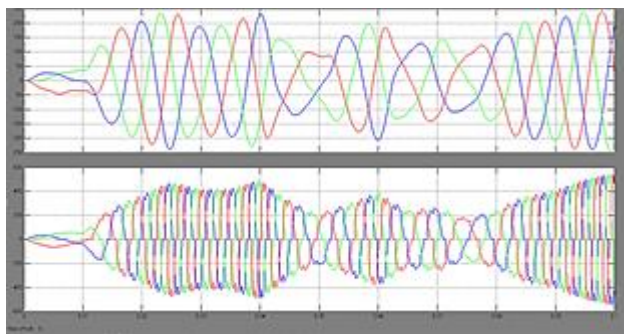


Рис. 10 – Залежність миттєвої напруги на виході генератора від часу

З результатів, показаних на рис. 10 видно, що миттєві значення напруги на виході генератора при підключенні додаткової ємності в 30 мкФ та при випадковій швидкості вітру відрізняються від напруги без регулювання. Амплітудне значення напруги при підключенні ємності менше  $\approx 1,8$  рази, що пояснюється збільшенням падіння напруги на внутрішньому активному та індуктивному опорі генератора. Крім того, характер кривої при підключенні до додаткової ємності носить більш плавний характер, за рахунок накопиченої в ємності енергії.

Порівняння усередненого середньоквадратичного значення струму на виході генератора з підключеними конденсаторами 30 мкФ та без регулювання при мінливості швидкості вітру показано на рис. 11.

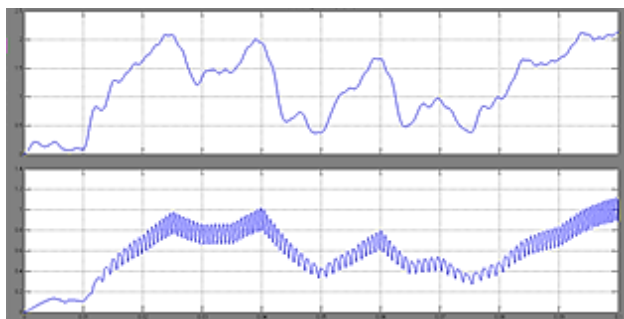


Рис. 11 – Усереднене значення струму на виході генератора при підмагнічуванні статичною ємністю

Середньоквадратичне значення струму при наявності додаткової ємності 30 мкФ  $\approx 2,2$  рази вище ніж без регулювання. Це пояснюється наявністю додаткової підмагнічуючої реактивної складової струму в обмотці якоря генератора. Варто врахувати, що це призводить до суттєвого зростання активних втрат в обмотці якоря генератора, та падіння напруги генератора.

Порівняння залежності вихідної активної потужності електрогенератора з підключеними конденсаторами ємністю 30 мкФ та без регулювання при мінливій швидкості вітру показано на рис. 12.

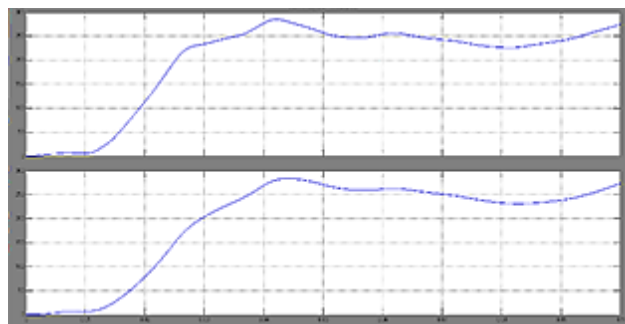


Рис. 12 – Залежність вихідної потужності генератора від швидкості вітру при підмагнічуванні ємністю

Потужність на виході генератора при мінливій швидкості вітру на 5-10% більше ніж без регулювання. Це пояснюється ростом активної складової струму якоря за рахунок росту підмагнічуючого струму.

Порівняння середньоквадратичного значення напруги при підмагнічуванні генератора додатковою обмоткою та без регулювання на виході генератора в кожен момент часу показано на рис. 13.

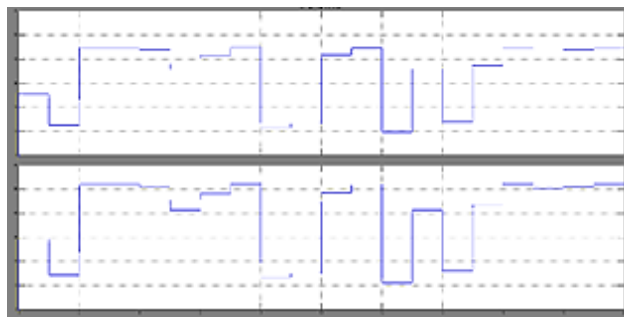


Рис. 13 – Середньоквадратичне значення напруги на виході генератора при підмагнічуванні додатковою обмоткою

Верхня крива відповідає миттєвому значенню напруги генератора без регулювання, нижня відповідає роботі генератора з напругою на додатковій обмотці. Обидві криві побудовані для однакового випадкового розподілу швидкості вітру в часі. Миттєві значення вихідної напруги генератора при роботі з додатковою обмоткою вищі на 15-20 % ніж при відсутньому регулюванні.

Порівняння залежності вихідної активної потужності електрогенератора з підмагнічуванням додатковою обмоткою та без регулювання при мінливій швидкості вітру показано на рис. 14.

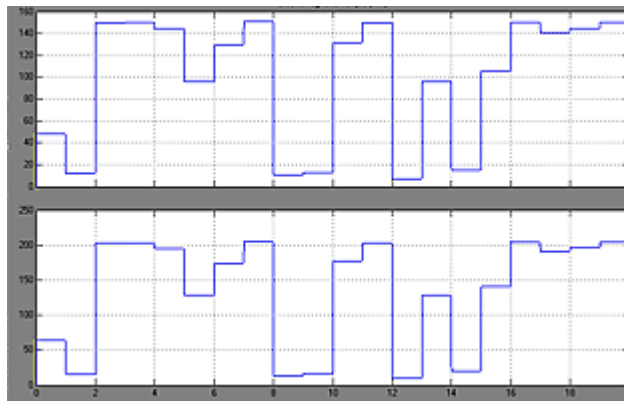


Рис. 14 - Залежність вихідної потужності генератора від швидкості вітру

Нижня крива побудована при підключеній додатковій обмотці генератора, верхня відповідає режиму роботи генератора без регулювання.

Потужність на виході генератора при мінливій швидкості вітру на 30-40% більше ніж без регулювання. Це пояснюється ростом основного магнітного потоку електрогенератора за рахунок підмагнічування додаткової обмотки. Як наслідок зростає наведена в обмотці якоря ЕРС і активна потужність.

**Висновки.** Розроблено чисельну імітаційну математичну модель корекції вихідної потужності магнітоелектричного генератора з двостороннім розташуванням постійних магнітів на роторі та аксіальним магнітним потоком, що працює у складі безмультиплікаторної вітроустановки при дискретних та випадкових значеннях швидкості вітру.

Проведено дослідження способів корекції вихідної потужності генератора безмультиплікаторної вітроустановки. При підключенні додаткової статичної ємності до затискачів генератора спостерігається збільшення вихідної потужності на  $\approx 5-10\%$ . Водночас, напруга на затискачах, при цьому, зменшується в 1,8 рази, що пояснюється падінням напруги на внутрішніх опорах генератора та ростом активної та реактивної складової струму якоря генератора  $\approx 2,2$  рази.

Більш ефективним способом корекції вихідної потужності є використання додаткової підмагнічуючої обмотки магнітоелектричного генератора. При подачі напруги на обмотку збудження  $U_f=8$  В спостерігається приріст вихідної потужності генератора  $\approx 30-40\%$  ніж без регулювання.

#### Список літератури:

- Wang W., H. Mi, Longbo M. Study and Optimal Design of a Direct-Driven Stator Coreless Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator with Improved Dynamic Performance. *Energies*, 2018, no.11, p. 3162. doi:10.3390/en11113162.
- Radwan-Pragłowska N., Wegiel T., Borkowski D. Modeling of Axial Flux Permanent Magnet Generators. *Energies*, 2020, no.13 (21), p. 5741. doi:10.3390/en13215741.
- Radwan-Pragłowska N. Parameters identification of coreless axial flux permanent magnet generator / Natalia Radwan-Pragłowska, Tomasz Wegiel, Dariusz Borkowski // *Archives Of Electrical Engineering*, 2018, vol. 67(2), pp. 391-402. doi:10.24425/119648.
- Eldoromi M. Improved design of axial flux permanent magnet generator for small-scale wind turbine / Mojtaba Eldoromi, Sajjad Tohidi, Mohammad Reza Feyzi // *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2017, no. 26, pp. 3084-3099. doi:10.3906/elk-1711-402.
- Dehghanzadeh A., Behjat V., Banaei M. Dynamic modeling of wind turbine based axial flux permanent magnetic synchronous generator connected to the grid with switch reduced converter / Ali Reza Dehghanzadeh, Vahid Behjat, Mohamad Reza Banaei // *Ain Shams Engineering Journal*, 2018, vol. 9(1), pp. 125-135. doi:10.1016/j.asej.2015.11.002.
- Janon A. Making a case for a Non-standard frequency axial-flux permanent-magnet generator in an ultra-low speed direct-drive hydrokinetic turbine system / Akraphon Janon, Krittattee Sangounsak, Warat Sriwannarat // *AIMS Energy*, 2019, №8(2), pp. 156-168. doi: 10.3934/energy.2020.2.156.
- Zhang Z. Design Optimization of ironless multi-stage axial-flux permanent magnet generators for offshore wind turbines / Zhaoqiang Zhang, Robert Nilssen, S. M. Muyeen, Arne Nysveen, Ahmed Al-Durra // *Engineering Optimization*, 2017, vol. 49, pp. 815-827. doi:10.1080/0305215X.2016.1208191.
- Mehmet Recep Minaz, Mehmet Celebi Design and analysis of a new axial flux coreless PMSG with three rotors and double stators. *Results in Physics*, 2017, vol. 7, pp. 183-188. doi:10.1016/j.rinp.2016.10.026.
- Sahib Khan, Syed Sabir Hussain Bukhari, Jong-Suk Ro Design and Analysis of a 4-kW Two-Stack Coreless Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine for Low-Speed Applications. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 173848 – 173854. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2957046.
- Chumack, V., Tsyvinskyi, S., Kovalenko, M., Ponomarev, A., Tkachuk, I. 2020. Mathematical modeling of a synchronous generator with combined excitation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 1, 5 (103) (Feb. 2020), 30–36. doi: 10.15587/1729-4061.2020.193495.
- Chumack V., Bazenov V., Tymoshchuk O., Kovalenko M., Tsyvinskyi S., Kovalenko I., Tkachuk I. Voltage stabilization of a controlled autonomous magnetoelectric generator with a magnetic shunt and permanent magnet excitation (December 21, 2021). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(5 (114), 56–62. doi:10.15587/1729-4061.2021.246601, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3993765>.
- Головко В.М., Коваленко М.А., Коваленко І.Я., Галасун І.Р. Математичне моделювання автономної вітроустановки з синхронним генератором магнітоелектричного типу. *Відновлювальна енергетика*, 2020, no. 4(63), С. 50-58. doi: [10.36296/1819-8058.2020.4\(63\)](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4(63))

#### References (transliterated):

- Wang W., H. Mi, Longbo M. Study and Optimal Design of a Direct-Driven Stator Coreless Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator with Improved Dynamic Performance. *Energies*, 2018, no.11, p. 3162. doi:10.3390/en11113162.
- Radwan-Pragłowska N., Wegiel T., Borkowski D. Modeling of Axial Flux Permanent Magnet Generators. *Energies*, 2020, no.13 (21), p. 5741. doi:10.3390/en13215741.
- Radwan-Pragłowska N. Parameters identification of coreless axial flux permanent magnet generator / Natalia Radwan-Pragłowska, Tomasz Wegiel, Dariusz Borkowski // *Archives Of Electrical Engineering*, 2018, vol. 67(2), pp. 391-402. doi:10.24425/119648.
- Eldoromi M. Improved design of axial flux permanent magnet generator for small-scale wind turbine / Mojtaba Eldoromi, Sajjad Tohidi, Mohammad Reza Feyzi // *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2017, no. 26, pp. 3084-3099. doi:10.3906/elk-1711-402.
- Dehghanzadeh A., Behjat V., Banaei M. Dynamic modeling of wind turbine based axial flux permanent magnetic synchronous generator connected to the grid with switch reduced converter / Ali Reza Dehghanzadeh, Vahid Behjat, Mohamad Reza Banaei // *Ain Shams Engineering Journal*, 2018, vol. 9(1), pp. 125-135. doi:10.1016/j.asej.2015.11.002.
- Janon A. Making a case for a Non-standard frequency axial-flux permanent-magnet generator in an ultra-low speed direct-drive hydrokinetic turbine system / Akraphon Janon, Krittattee Sangounsak, Warat Sriwannarat // *AIMS Energy*, 2019, №8(2), pp. 156-168. doi: 10.3934/energy.2020.2.156.
- Zhang Z. Design Optimization of ironless multi-stage axial-flux permanent magnet generators for offshore wind turbines / Zhaoqiang Zhang, Robert Nilssen, S. M. Muyeen, Arne Nysveen, Ahmed Al-Durra // *Engineering Optimization*, 2017, vol. 49, pp. 815-827. doi:10.1080/0305215X.2016.1208191.
- Mehmet Recep Minaz, Mehmet Celebi Design and analysis of a new axial flux coreless PMSG with three rotors and double stators. *Results in Physics*, 2017, vol. 7, pp. 183-188. doi:10.1016/j.rinp.2016.10.026.
- Sahib Khan, Syed Sabir Hussain Bukhari, Jong-Suk Ro Design and Analysis of a 4-kW Two-Stack Coreless Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine for Low-Speed Applications. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 173848 – 173854. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2957046.
- Chumack, V., Tsyvinskyi, S., Kovalenko, M., Ponomarev, A., Tkachuk, I. 2020. Mathematical modeling of a synchronous generator with combined excitation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 1, 5 (103) (Feb. 2020), 30–36. doi: 10.15587/1729-4061.2020.193495.
- Chumack V., Bazenov V., Tymoshchuk O., Kovalenko M., Tsyvinskyi S., Kovalenko I., Tkachuk I. Voltage stabilization of a controlled autonomous magnetoelectric generator with a magnetic shunt and permanent magnet excitation (December 21, 2021). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(5 (114), 56–62. doi:10.15587/1729-4061.2021.246601, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3993765>.

12 Holovko V.M., Kovalenko M.A., Kovalenko I.Ia., Halasun I.R. 10.36296/1819-8058.2020.4(63).  
Matematychnе modeliuvannia avtonomnoi vitroustanovky z  
synkhronnym heneratorom mahnitoelektrychnoho typu.  
Vidnovliuvalna enerhetyka, 2020, no. 4(63), S. 50-58. doi:

Надійшла (received) 04.06.2022

#### **Відомості про авторів / About the Authors**

**Чумак Вадим Володимирович (Chumak Vadim Vladimirovich)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", доцент кафедри електромеханіки, тел.: (050) 208-38-43; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8401-7931>; e-mail: [chumack\\_kpi@ukr.net](mailto:chumack_kpi@ukr.net).

**Островєрхов Микола Якович (Ostroverkhov Mykola Yakovych)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", завідувач кафедри теоретичної електро-техніки, тел.: (050) 254-10-67; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7322-8052>; e-mail: [n.ostroverkhov@hotmail.com](mailto:n.ostroverkhov@hotmail.com).

**Коваленко Михайло Анатолійович (Kovalenko Mykhaylo)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", доцент кафедри електромеханіки, тел.: (067) 656-36-51; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>; e-mail: [kovalenko\\_ma@i.ua](mailto:kovalenko_ma@i.ua).

**Головко Володимир Михайлович (Golovko Vladimir Mikhailovich)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", професор кафедри нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії, тел.: (097) 952-41-63; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0195-9654>; e-mail: [golovkovm@ukr.net](mailto:golovkovm@ukr.net).

**Коваленко Ірина Яківна (Kovalenko Iryna Yakivna)** – асистент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", аспірант кафедри нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії, тел.: (097) 939-96-73; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1097-2041>; e-mail: [2048141@ukr.net](mailto:2048141@ukr.net).