

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОНОМНОЇ ВІТРОУСТАНОВКИ З СИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНОГО ТИПУ

В.М. Головко^{1,2}, докт. техн. наук, проф., **М.А. Коваленко**², канд. техн. наук, доцент, **І.Я. Коваленко**^{1,2}, аспірантка, **І.Р. Галасун**^{1,2}

¹Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 02094, 20А, вул. Гната Хоткевича, м. Київ, Україна.

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», 03056, пр-т. Перемоги, 37, м. Київ, Україна.

Одним із напрямків підвищення ефективності перетворення енергії вітру є удосконалення конструкції відомих генераторів або розробка принципово нових типів генераторів. Природа вітру носить мінливий характер, тому актуальною задачею є використання максимально можливого потенціалу вітру при електромеханічному перетворенні енергії. Жорстка залежність потужності на валу ротора вітроустановки від аеродинамічних характеристик лопаті відомі і втілені в інженерні рішення, проте узгодження отриманої потужності з потужністю електричної машини, що під'єднана до ротора, вимагає додаткових досліджень. Розроблено чисельну математичну модель для дослідження параметрів та характеристик синхронного генератора із постійними магнітами, що враховує двосторонню активну зону статора та аеродинамічні параметри ротора вітроустановки. При низьких швидкостях вітру (3-5 м/с) напруга генератора знаходиться на половинних значеннях свого максимуму, що пояснюється аеродинамічними параметрами ротора та параметрами електрогенератора. При більших значеннях швидкості вітру (6-7 м/с) мінімальне значення напруги на виході генератора становить досягає свого максимуму у 18 В та 26 В при збільшенні швидкості обертання генератора, що пояснюється зростанням ЕРС обертання, з подальшим падіння напруги до 6 В та 16 В відповідно із зростанням аеродинамічних втрат в роторі вітроустановки. Відповідні максимуми на кривих напруги відповідають максимумам вихідної активної потужності 45 Вт.

Результати моделювання механічних характеристик вітрової турбіни та генератора підтверджують адекватність розробленої моделі та достовірність отриманих результатів, що дозволяє використовувати дану модель для подальших досліджень та оцінки ефективності методів та засобів підвищення ефективності перетворення енергії вітру. Бібл. 6, табл.1, рис. 8.

Ключові слова: вітроустановка, синхронний генератор, енергетичні характеристики вітроустановки.

MATHEMATICAL SIMULATION OF AUTONOMOUS WIND INSTALLATION WITH SYNCHRONOUS MAGNETO-ELECTRIC TYPE GENERATOR

V. Golovko^{1,2}, doctor of technical sciences, professor, **M. Kovalenko**², candidate of technical sciences, associate professor, **I. Kovalenko**^{1,2}, graduate student, **I. Halasun**^{1,2}

¹Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, 02094, 20A Hnata Khotkevycha St., Kyiv, Ukraine.

²National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 03056, 37 Peremohy Av., Kyiv, Ukraine.

One of the ways to increase the efficiency of wind energy conversion is to improve the design of known generators or the development of fundamentally new types of generators. The nature of wind is variable, so the urgent task is to use the maximum possible wind potential in electromechanical energy conversion. The rigid dependence of the power on the rotor shaft of the wind turbine on the aerodynamic characteristics of the blades is known and implemented in engineering solutions, but the coordination of the obtained power with the power of the electric machine connected to the rotor requires additional research. A numerical mathematical model has been developed to study the parameters and characteristics of a synchronous generator with permanent magnets, which takes into account the two-sided stator core and the aerodynamic parameters of the wind turbine rotor. At low wind speeds (3-5 m / s) the generator voltage is at half its maximum, which is explained by the aerodynamic parameters of the rotor and the parameters of the generator. At higher values of wind speed (6-7 m / s) the minimum value of the voltage at the output of the generator is reaching its maximum at 18 V and 26 V with increasing speed of the generator, due to increasing EMF rotation, followed by voltage drops to 6 V and 16 V in accordance with the growth of aerodynamic losses in the rotor of the wind turbine. The corresponding maxima on the voltage curves correspond to the maxima of the output active power of 45 W.

The results of modeling the mechanical characteristics of the wind turbine and generator confirm the adequacy of the developed model and the reliability of the results, which allows to use this model for further research and evaluation of methods and means to improve wind energy conversion efficiency. Ref. 6, tabl. 1, fig. 8.

Keywords: wind turbine, synchronous generator, energy characteristics of wind turbine.



V.M. Golovko
V. Golovko

Відомості про автора: докт. техн. наук, професор, провідний науковий співробітник Інституту відновлюваної енергетики НАН України, Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Освіта: Українська сільськогосподарська академія, спеціальність - електрифікація сільського господарства.

Наукова сфера: відновлювана енергетика
Публікації: 168.

ORCID: 0000-0003-0195-9654

Контакти: тел./факс: +38(044)206-28-09

e-mail: renewable@ukr.net

Author information: doctor of technical sciences, professor, leading researcher of the Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky».

Education: Ukrainian Agricultural Academy, specialty - electrification of agriculture.

Research area: renewable energy

Publications: 168.

ORCID: 0000-0003-0195-9654

Contacts: tel./fax: +38(044)206-28-09

e-mail: renewable@ukr.net



M.A. Kovalenko
M. Kovalenko

Відомості про автора: канд. техн. наук, доцент кафедри електромеханіки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент.

Освіта: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Спеціальність - електричні машини та апарати.

Наукова сфера: електричні машини.

Публікації: 67.

ORCID: 0000-0002-5602-2001

Контакти: тел./факс: +38(067)656-36-51

e-mail: kovalenko_ma@i.ua

Author information: candidate of technical sciences, associate professor of Electromechanics, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky», associate professor.

Education: National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky». Specialty - electric machines and devices.

Research area: electric machines.

Publications: 67.

ORCID: 0000-0002-5602-2001

Contacts: tel./fax: +38(067)656-36-51

e-mail: kovalenko_ma@i.ua



I.Ya. Kovalenko
I. Kovalenko

Відомості про автора: асистент кафедри відновлюваних джерел енергії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», аспірант.

Освіта: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Спеціальність - нетрадиційні джерела енергії.

Наукова сфера: відновлювана енергетика

Публікації: 4.

ORCID: 0000-0002-5602-2001

Контакти: тел./факс: +38(097)939-96-73

e-mail: 2048141@ukr.net

Author information: assistant of the Department of Renewable Energy Sources of the National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky», graduate student.

Education: National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky». Specialty - non-traditional energy sources.

Research area: renewable energy.

Publications: 4.

ORCID: 0000-0002-5602-2001

Contacts: tel./fax: +38(097)939-96-73

e-mail: 2048141@ukr.net



I.P. Galasun
I. Halasun

Відомості про автора: інженер II категорії Інституту відновлюваної енергетики НАН України.

Освіта: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Спеціальність - нетрадиційні джерела енергії.

Наукова сфера: відновлювані джерела енергії, вітроенергетика.

Публікації: 2.

ORCID: 0000-0002-8829-3332

Контакти: тел./факс +38-044-206-28-09

e-mail: renewable@ukr.net

Author information: Engineer of the II category of the Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Education: Bachelor, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Faculty of Electric Power Engineering and Automation, Department of Renewable Sources of Energy.

Research area: renewable energy sources, wind energy.

Publications: 2.

ORCID: 0000-0002-8829-3332

Контакти: тел./факс +38-044-206-28-09

e-mail: renewable@ukr.net

Перелік використаних позначень та скорочень:

P_m – вихідна механічна потужність вітрової турбіни (Вт);
 c_p – коефіцієнт потужності ротора;
 ρ – густина повітря (кг/м³);
 A – площа, що обмітається ротором установки;
 v_{wind} – швидкість вітру (м/с);

λ – коефіцієнт відношення швидкості обертання ротора до швидкості вітру;
 β – кут встановлення лопаті;
 $P_{m, в.о.}$ – номінальна потужність в в.о. для заданих величин ρ та A ;
 $c_{p, pu}$ – максимальне значення коефіцієнта потужності.

Вступ. На сьогоднішній день обсяги виробництва електроенергії нетрадиційними та відновлювальними джерелами все більше зростають. Значну частину цієї енергії виробляють за допомогою як вітрових електростанцій, так і автономних вітроустановок. Природа вітру носить мінливий характер, тому актуальною задачею є використання максимально можливого потенціалу вітру при електромеханічному перетворенні енергії.

Одним із напрямків підвищення ефективності перетворення енергії вітру є удосконалення конструкції відомих генераторів, або розробка принципово нових типів генераторів. Активними дослідженнями в даному напрямку займалися як вітчизняні так і закордонні дослідники такі як: Л.М. Паластін, Д.А. Бут, А.А. Афонін, В.В. Гребеніков, Ю.Н. Кронеберг, Ю.М. Пермінов, В.В. Чумак, Є.А. Монахов, Ф. Кенію, Jacek F.Gieras, Takayuki Mizuno, Kazutoshi Nagayama, Rita Mbayed.

Постановка завдання. Мета роботи полягає в розробці чисельної імітаційної математичної моделі в середовищі MATLAB-Simulink для дослідження параметрів та характеристик автономної вітроустановки із синхронним генератором магнітелектричного типу з метою оцінки ефективності технічних рішень, направлених на підвищення якості перетворення енергії вітру в електричну. Використання такого типу генератора обумовлена перспективою регулювання вихідної потужності вітроустановки в широких межах, що в свою чергу дозволить реалізувати максимальний потенціал енергії вітру.

Результати досліджень. Об'єктом дослідження виступають електромагнітні процеси магнітоелектричної синхронної машини торцевого типу з подвійним статором зі збудженням від постійних магнітів, на вал якої безпосередньо приєднаний ротор вітроустановки. Загальний вигляд та основні розміри такого електрогенератора наведено на рис. 1.

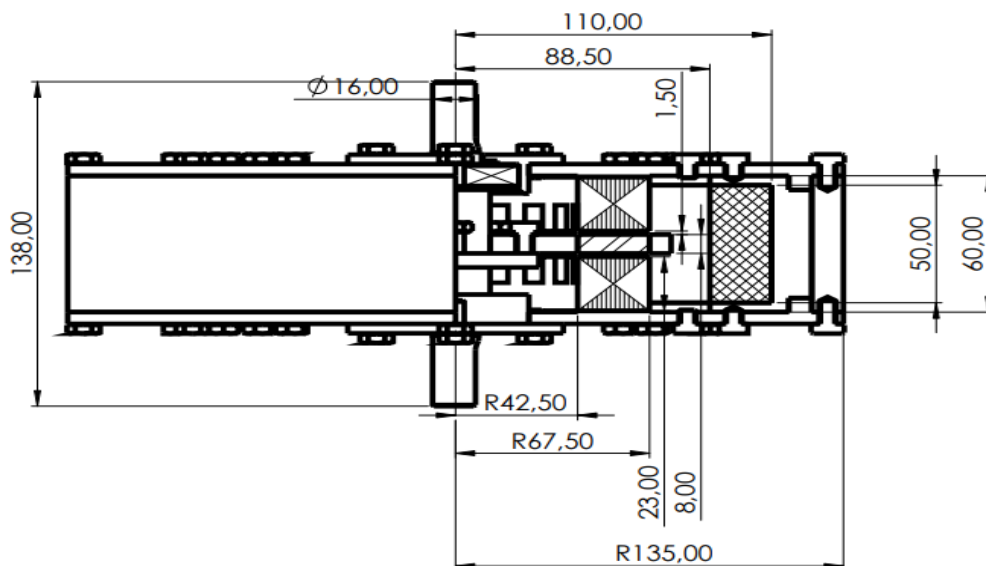


Рис. 1. Ескіз досліджуваного магнітоелектричного генератора.

Fig. 1. Sketch of the studied magnetoelectric generator.

Зображений на рис. 1. генератор складається з: двостороннього магнітного осердя статора, виконаного у формі диска; трифазної обмотки якоря, що розміщується в пазах двостороннього статора; ротора, виконаного у формі диска, в технологічних отворах якого розташовуються постійні магніти марки

NdFeB N38H; валу та підшипникових щитів. Особливістю даної конструкції генератора є те, що існує можливість плавного регулювання величини повітряного проміжку між статором та ротором.

Вихідні дані для моделювання даного генератора наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Вихідні дані параметрів генератора.

Table 1. Output data of the generator parameters.

Параметр	Значення
Постійні магніти	NdFeB N38H: $B_r=1,21$ Тл, $H_c=939$ кА/м
Матеріал ротора	Сталь 3
Матеріал статора	Сталь 1211
Обмотувальний провід якоря	ПЭТ 155 Ø0, 63 ГОСТ 2112-79
Частота обертання	500 об./хв.
Кількість пар полюсів	12

Структурна блок-схема вітроустановки із електрогенератором у складі вітрової установки наведена на рис. 2. Для розробки імітаційної моделі автономної вітроустановки використано програмний пакет MATLAB-Simulink. Це обумовлено тим, що даний програмний продукт містить більшість блоків імітаційної моделі в

наявності [1-2]. Для зручності необхідно розбити систему вітроустановки на окремі складові.

Кожен із елементів імітаційної моделі в середовищі MATLAB-Simulink подано окремим блоком, який в свою чергу, описується системою нелінійних (лінеаризованих) диференціальних рівнянь [3].

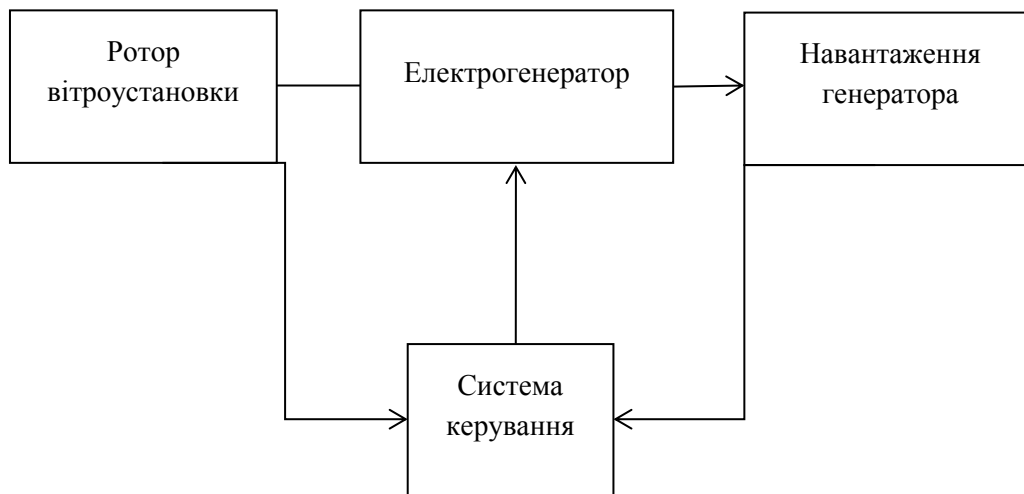


Рис. 2. Структурна схема системи, що досліджується.

Fig. 2. Block diagram of the system under study.

Блок-схема вітроустановки в системі MATLAB-Simulink має 3 логічних входи та один вихід (рис. 3). Перший вхід відповідає за номінальну швидкість обертання генератора (ω_r), другий являє собою кут атаки ротора вітроустановки та третій – швидкість вітру в м/с.

Коефіцієнт колової швидкості λ розраховується шляхом поділу абсолютної швидкості обертання (що задається) та швидкості вітру [4]. Вихідною величиною моделі вітроустановки є величина механічного моменту, що прикладається до валу генератора.

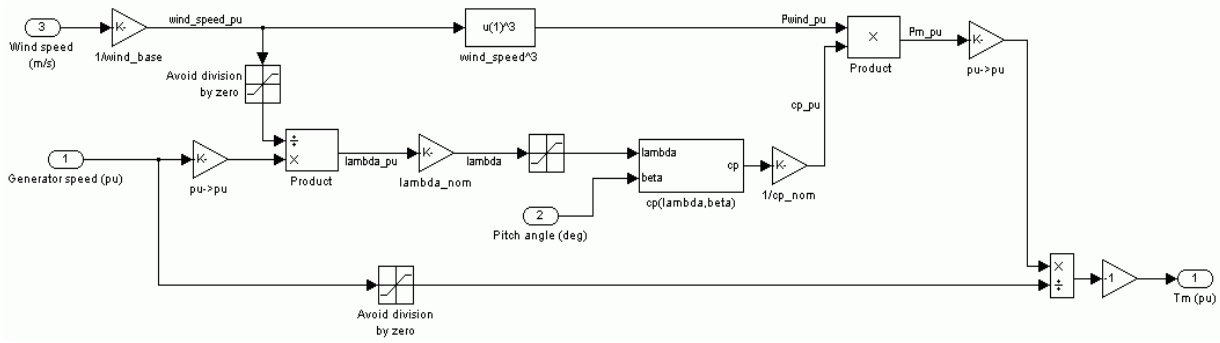


Рис. 3. Блок-схема вітроустановки.

Fig. 3. Block diagram of the wind turbine.

Наведена на рис. 3 модель описує усталений режим роботи вітроустановки. Вважається, що жорсткість приводу вітроустановки нескінченна, а коефіцієнт тертя і інерція ротора узгоджуються з відповідними коефіцієнтами генератора, що приєднується до ротора [5]. Вихідна потужність ротора описується наступним рівнянням:

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

В системі відносних одиниць рівняння (1) можна записати у спрощеному вигляді:

$$P_{m_pu} = k_p c_{p_pu} V_{wind_pu}^3 \quad (2)$$

де V_{wind_pu} – швидкість вітру в відносних одиницях (за базову швидкість вітру приймається очікувана (середня) величина вітру для конкретного регіону); k_p – коефіцієнт підсилення за потужністю приймається меншим або рівним 1.

Блок синхронної машини з постійними магнітами дозволяє моделювати режими генератора або двигуна. Режим роботи задається знаком механічного крутного моменту (позитивний для моторного режиму, від’ємний для режиму генератора). Електричні та механічні частини машини подані усталеними та диференціальними рівняннями другого порядку [6].

Рівняння, що описують режими роботи торцевої синхронної машини із постійними магнітами наведено нижче:

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \frac{1}{L_s}(u_d - R_s i_d + \omega Z_p L_s i_q), \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{1}{L_s}(u_q - R_s i_q - \omega Z_p L_s i_d - \omega Z_p \psi_0), \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J}(M - M_c), \\ M &= \frac{3}{2} Z_p (\psi_0 i_q), \end{aligned} \quad (3)$$

де L_q, L_d – індуктивності по осям q та d; R – активний опір обмотки статора; i_q, i_d – струми за осями q та d; ω – кутова швидкість ротора генератора; ψ – амплітуда магнітного потоку, що створюється постійними магнітами та додатковою обмоткою; p – кількість пар полюсів генератора; T_e – електромагнітний момент генератора.

Наприклад, індуктивності L_q та L_d , що виміряні між фазами A та B (при розімкненій C) описуються наступними рівняннями:

$$L_{ab} = L_d + L_q + (L_q - L_d) \cos(2\theta_e + \frac{\pi}{3}). \quad (4)$$

Рівняння динаміки механічної частини генератора складе:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{1}{J}(T_e - F\omega_r - T_m), \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega_r, \end{aligned} \quad (5)$$

де J – момент інерції ротора; F – коефіцієнт в’язкості тертя ротора; θ – кутове положення ротора генератора; T_m – механічний момент на валу.

Блок-схема імітаційної моделі торцевого генератора із постійними магнітами наведена на рис. 4.

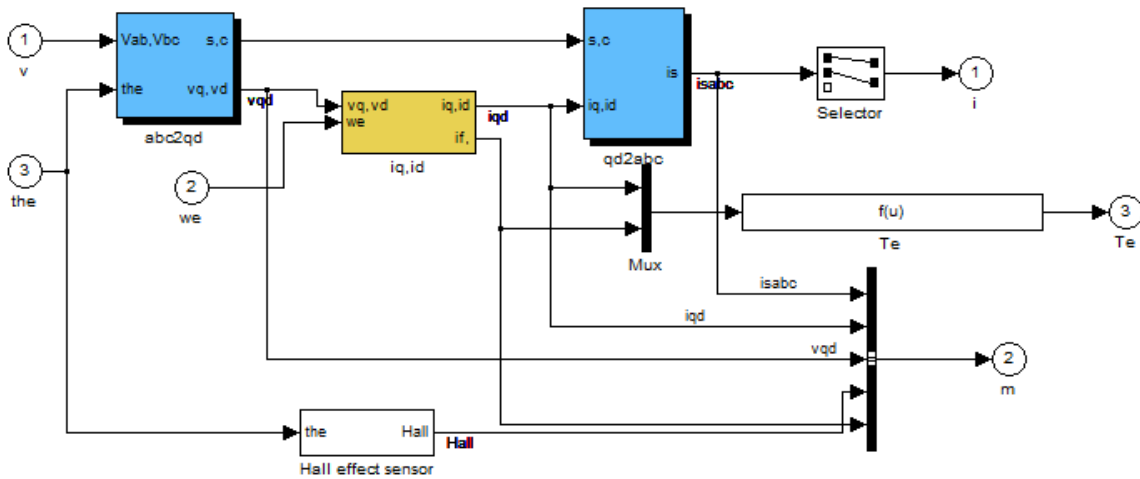


Рис. 4. Блок-схема імітаційної моделі генератора.

Fig. 4. Block diagram of the simulation model of the generator.

Головною відмінністю даної моделі генератора від стандартної, що наявна в середовища MATLAB-Simulink, є врахування концепції двосторонньої активної поверхні статора та осового характеру магнітного потоку, що враховується в системі диференціальних рівнянь, що наведені вище. Також, система диференціальних рівнянь враховує вплив ротора вітроустановки та його параметрів на роботу електрогенератора.

Загальний вигляд математичної моделі для дослідження характеристик генератора обумовлений тим, що:

- відсутній зворотній зв'язок в системі за напругою генератора;
- основний магнітний потік генератора утворюється лише за рахунок постійних магнітів генератора;
- відсутні додаткові конденсатори в обмотці якоря генератора.

На рис. 5 показано вигляд розробленої математичної моделі досліджуваного електрогенератора в складі вітроустановки без зворотного зв'язку за напругою та без використання додаткової підмагнічувальної обмотки.

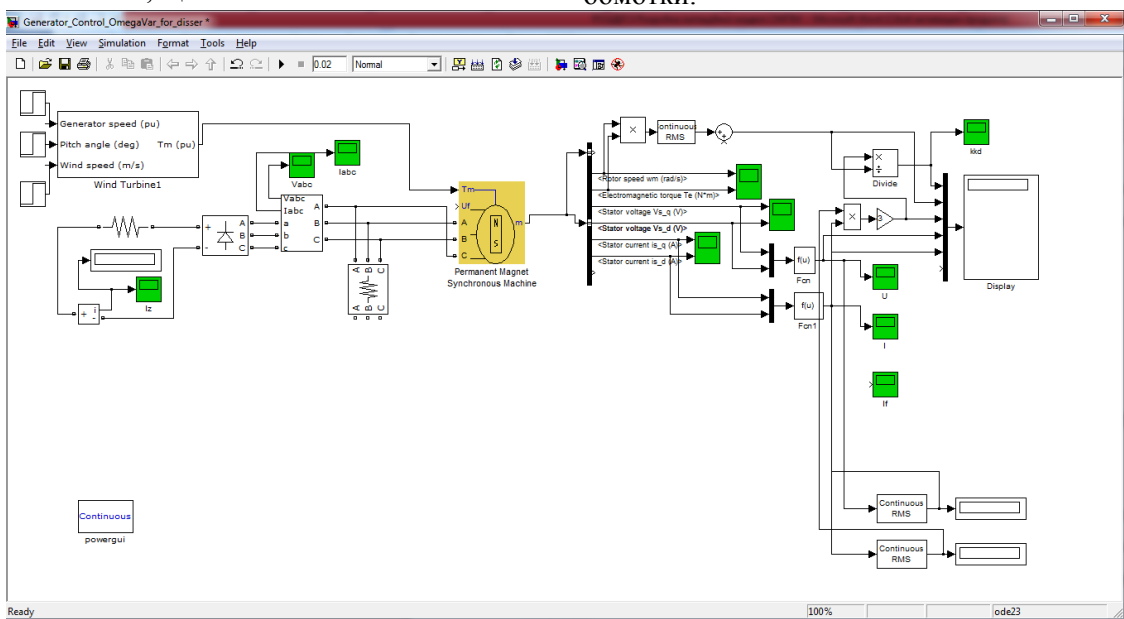


Рис. 5. Вигляд імітаційної моделі електрогенератора вітроустановки.

Fig. 5. View of the simulation model of the wind turbine generator.

Навантаженням генератора є активний опір R , що приєднаний до генератора через комплект вимірювальних приладів та мостовий випрямляч. Інша частина розробленої моделі відповідає за зворотній зв'язок за напругою генератора, стабілізацію зовнішньої характеристики та візуалізацію результатів моделювання.

Характеристики генератора розраховані при дискретних сталих значеннях швидкості

вітру. В даному випадку всі характеристики такого генератора визначаються виключно параметрами генератора та параметрами ротора вітроустановки, що до нього приєднаний безпосередньо.

Залежність механічної потужності для обраної вітрової турбіни (профіль серії GAW) від швидкості обертання ротора генератора при різних швидкостях вітру в відносних одиницях наведено на рис. 6.

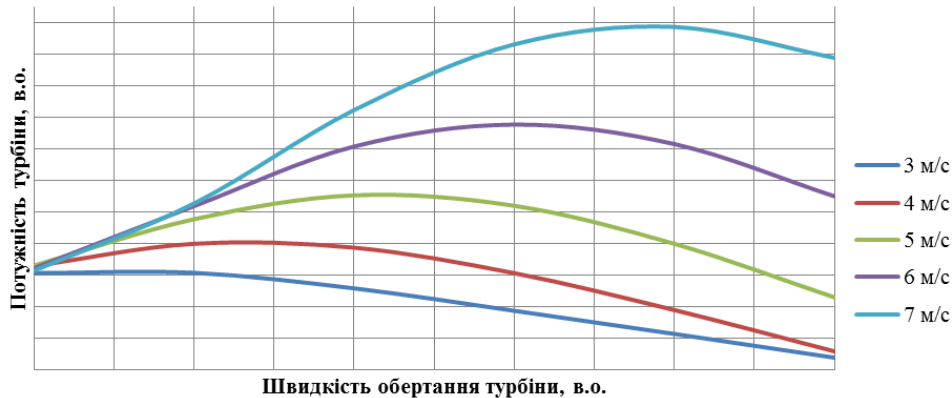


Рис. 6. Залежність потужності ротора вітроустановки від швидкості обертання.

Fig. 6. Dependence of power of a rotor of a wind turbine on speed of rotation.

Згідно із заданими характеристиками ротора вітроустановки при деяких значеннях швидкості обертання його (при заданій швидкості вітру) спостерігаються від'ємні значення вихідної потужності та швидкості обертання ротора генератора. Це пояснюється тим, що при заданих вихідних значеннях системи генератор переходить в режим двигуна. При заданому електричному навантаженні генератора, потужності на валу ротора вітроустановки не

вистачає для підтримання активної потужності генератора, тому відбувається "перекидання" генератора. В реальних умовах це означає те, що електрогенератор зупиниться.

Залежність вихідної потужності електрогенератора, від швидкості обертання ротора, електрогенератора для всіх розрахункових значень швидкості вітру наведено на рис. 7.

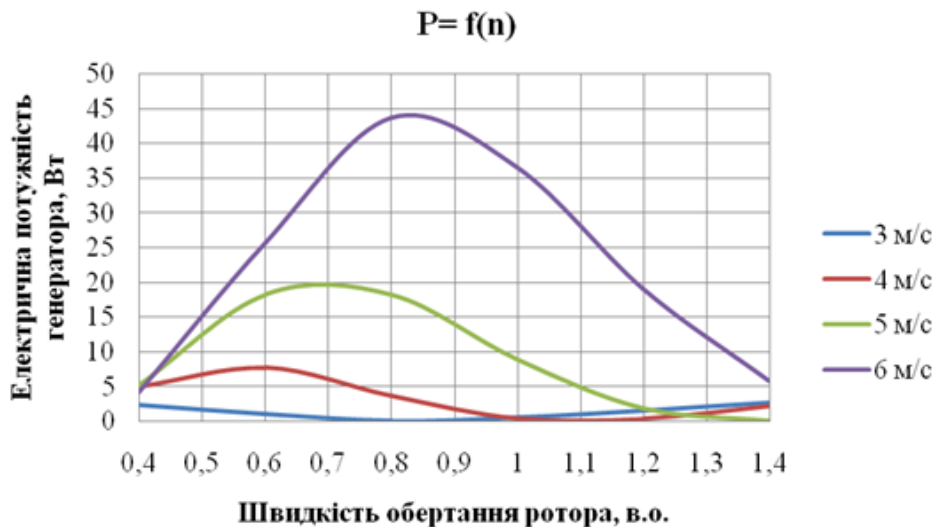


Рис. 7. Залежність вихідної потужності електрогенератора від швидкості обертання ротора.

Fig. 7. Dependence of the output power of the generator on the rotor speed.

Чим більша швидкість вітру, тим вища вихідна потужність генератора, що пояснюється збільшенням величини ЕРС, яка наводиться в обмотці якоря за рахунок електромагнітної індукції. Кожна крива, зображена на рис. 7 має максимум, зниження вихідної потужності пояснюється впливом аеродинамічних

характеристик ротора вітроустановки. З ростом швидкості обертання ротора вітроустановки збільшуються аеродинамічні втрати.

Залежність напруги на затискачах генератора, при фіксованих значеннях швидкості вітру в залежності від швидкості обертання ротора вітроустановки зображено на рис. 8.

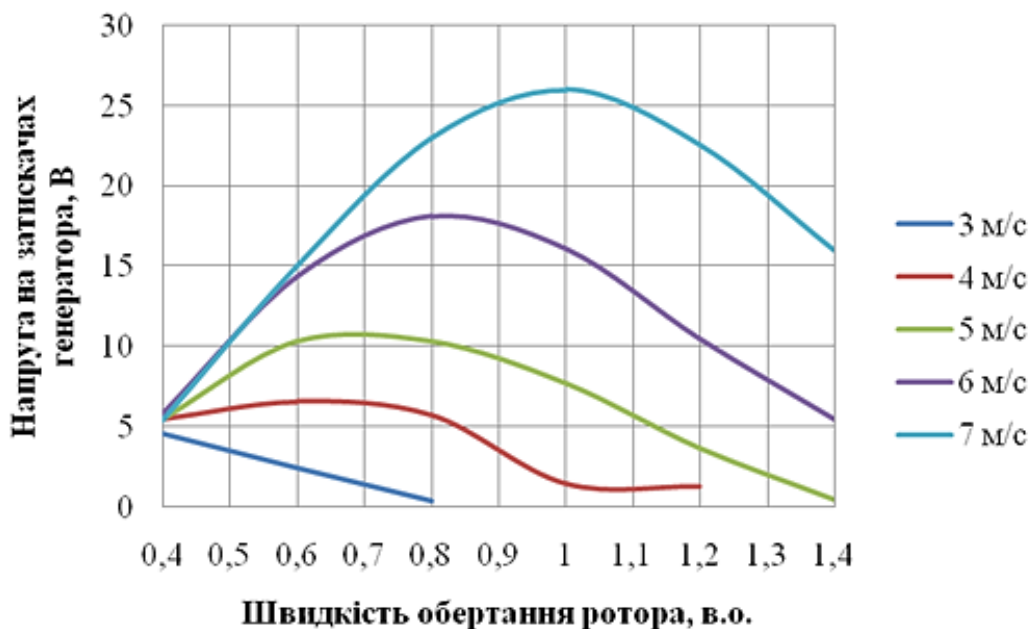


Рис. 8. Залежність напруги генератора від швидкості обертання ротора.

Fig. 8. Dependence of generator voltage on rotor speed.

Згідно з рис. 8 видно, що при низьких швидкостях вітру (3-4 м/с) напруга генератора знаходиться на рівні ≈ 5 В. Основними причинами зменшення напруги в електрогенераторі є падіння напруги на внутрішньому активно-індуктивному опорі генератора та реакція якоря. Це пояснюється наявністю постійного навантаження на затискачах генератора та недостатньою величиною ЕРС, що наводиться в обмотці якоря. Також, за рахунок збільшення частоти обертання ротора збільшується частота ЕРС та струмів в обмотці якоря генератора та частота перемагнічування магнітного осердя. Це, в свою чергу, призводить до збільшення втрат на перемагнічування шихтованого магнітного осердя з одночасним збільшенням насичення магнітного осердя генератора, що додатково послаблює магнітний потік і зменшує електромагнітний момент генератора. Збільшити напругу при даних швидкостях можливо за рахунок використання додаткової підмагнічувальної обмотки.

Висновки. Розроблено чисельну математичну модель для дослідження параметрів та характеристик синхронного генератора із постійними магнітами, що враховує двосторонню

активну зону статора та аеродинамічні параметри ротора вітроустановки. При низьких швидкостях вітру (3-5 м/с) напруга генератора знаходиться на рівні 5-10 В, що пояснюється аеродинамічними параметрами ротора та параметрами електрогенератора. При більших значеннях швидкості вітру (6-7 м/с) мінімальне значення напруги на виході генератора становить 5 В і досягає свого максимуму у 18 В та 26 В при збільшенні швидкості обертання генератора, що пояснюється зростанням ЕРС обертання, з подальшим падіння напруги до 6 В та 16 В відповідно із зростанням аеродинамічних втрат в роторі вітроустановки. Відповідні максимуми на кривих напруги відповідають максимумам вихідної активної потужності 45 Вт.

Результати моделювання механічних характеристик вітрової турбіни та генератора підтверджують адекватність розробленої моделі та достовірність отриманих результатів, що дозволяє використовувати дану модель для подальших досліджень та оцінки ефективності методів та засобів підвищення ефективності перетворення енергії вітру.

1. Головка В.М., Монахов Є.А., Пономарьов О.І., Коваленко І.Я. Порівняння традиційного генератора із постійними магнітами з торцевим генератором із двосторонньою активною поверхнею для вітроустановок. Відроджена енергетика. 2018. № 2(53). С. 29-37.

2. Коваленко М.А., Васьковський Ю.М., Гайдено Ю.А. Математичне моделювання електричних машин з постійними магнітами. National Technical University of Ukraine. 2017. 193 с.

3. Чумак В.В., Коваленко М.А., Коваленко І.Я. Аналітичний огляд електромеханічних перетворювачів енергії для вітрової енергетики. Екологічні науки. 2018. № 2 (21). С. 25-35.

4. Chumak V.V., Kovalenko M.A., Tsyvinsky S.S., Tkachuk I.V., Ponomarov O.I. Mathematical modeling of a Synchronous generator with combined excitation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. № 1/5(103). С. 30-36.

5. Чумак В.В., Коваленко М.А., Пономарьов О.І. Трёхмерная математическая модель магнитоэлектрического синхронного генератора с постоянными магнитами. Гідроенергетика України. 2016. № 3-4. С. 36-39.

6. Чумак В.В., Петренко А.В., Коваленко М.А., Пономарев А.І. Управляемый автономный синхронный магнитоэлектрический генератор с магнитным шунтом для энергоснабжения сельскохозяйственного комплекса. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2017. № 242. С. 18-24.

REFERENCES

1. Holovko V.M., Monakhov Ye.A., Ponomarov O.I., Kovalenko I.Ya. Porivnyannya tradytsiynoho heneratora iz postiynymu mahnitamy z tortsevym heneratorom iz dvostoronnoyu aktyvnoyu poverkhneyu dlya vitroustanovok. [Comparison of a traditional generator with permanent magnets with an end generator with a double-sided active surface for wind

turbines]. Vidnovluyana energetika. 2018. No. 2(53). Pp. 29-37. [in Ukrainian].

2. Kovalenko M.A., Vaskovskyy Yu.M., Haydenko Yu.A. Matematychnye modelyuvannya elektrychnykh mashyn z postiynymu mahnitamy. [Mathematical modeling of electric machines with permanent magnets.]. National Technical University of Ukraine. 2017. 193 p. [in Ukrainian].

3. Chumak V.V., Kovalenko M.A., Kovalenko I.Ya. Analitichnyy ohlyad elektromekhanichnykh peretvoryuvachiv enerhiyi dlya vitrovoyi enerhetyky. [Analytical review of electromechanical energy converters for wind energy]. Ekolohichni nauky. 2018. No. 2(21). Pp. 25-35. [in Ukrainian].

4. Chumak V.V., Kovalenko M.A., Tsyvinsky S.S., Tkachuk I.V., Ponomarov O.I. Mathematical modeling of a Synchronous generator with combined excitation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. No. 1/5 (103). С. 30-36. [in English].

5. Chumak V.V., Kovalenko M.A., Ponomarov O.Y. Trekhmernaya matematycheskaya model mahnytoelektrycheskoho synkhronnoho heneratora s postoyannymu mahnitamy. [Three-dimensional mathematical model of a magnetoelectric synchronous generator with permanent magnets]. Hidroenerhetyka Ukrayiny. 2016. No. 3-4. Pp. 36-39. [in Ukrainian].

6. Chumak V.V., Petrenko A.V., Kovalenko M.A., Ponomarev A.Y. Upravlyaemyy avtonomnyy synkhronnyy mahnytoelektrycheskyy henerator s mahnytnym shuntom dlya enerhosnabzhenyva selskokhozyaystvennoho kompleksa. [Controlled stand-alone synchronous magnetoelectric generator with magnetic shunt for power supply of agricultural complex]. Naukovyy visnyk NUBiP Ukrayiny. Seriya: Tekhnika ta enerhetyka APK. 2017. No. 242. Pp. 18-24. [in Ukrainian].

Стаття надійшла до редакції 05.10.20
Остаточна версія 16.12.20

XIX МІЖНАРОДНА СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВИСТАВКА

ЕНЕРГЕТИКА В ПРОМИСЛОВІСТІ '2021



**19-21
ЖОВТНЯ**

IEC МІЖНАРОДНИЙ
ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР
Київ, Броварський проспект, 15
© "Лівобережна"

(044) 201-11-57, 201-11-67
e-mail: lyudmila@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua, мвц-укр,
www.tech-expo.com.ua