

МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ВІТРОУСТАНОВЦІ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ З МАГНІТНИМ РЕДУКТОРОМ І ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОМ НА ПОСТІЙНИХ МАГНІТАХ

Отримано 11 вер. 2024 р.; рекомендовано до публікації 16 вер. 2024 р.
Доступно онлайн 01 жов. 2024 р.

Гребеніков В. В.¹, Подольцев О. Д.²,
Мазуренко Л. І.³, Гамалія Р. В.⁴

Автор для кореспонденції: Гребеніков Віктор,
e-mail: elm1153@gmail.com

У роботі розроблена комп'ютерна Simulink-модель вітроенергетичної установки малої потужності (3 кВт), в якій замість механічного редуктора використовується магнітний редуктор, а також наявний синхронний генератор з постійними магнітами. На основі цієї моделі проведені розрахунки пов'язаних механічних та електричних процесів у двох режимах її роботи – пусково-му режимі та режимі миттєвого коливання швидкості вітру, що діє на вітрову турбіну (від 10 до 14 м/с і потім знову 10 м/с). За результатами проведених розрахунків показано, що в перехідних режимах при виникненні короткочасних динамічних перевантажень обидва ротори магнітного редуктора на певний проміжок часу можуть випадати з синхронного руху і далі, залежно від параметрів редуктора (а також інших елементів). Електромеханічна система або досягає певного робочого усталеного режиму, або втрачає можливість передавання механічної потужності від вітрової турбіни до генератора внаслідок випадіння із синхронізму роторів магнітного редуктора. При цьому переважно від значення максимального магнітного моменту редуктора залежить стійкість роботи вітроенергетичної установки в цілому. Бібл. 13, рис. 8.

Ключові слова: вітрова турбіна, магнітний редуктор, генератор з постійними магнітами, комп'ютерне моделювання, режими роботи установки, стійкість магнітного редуктора.

¹ д-р техн. наук
<https://orcid.org/0000-0002-1114-1218>

² д-р техн. наук
<https://orcid.org/0000-0002-9029-9397>

³ д-р техн. наук
<https://orcid.org/00000-0002-7059-249X>

⁴ канд. фіз-мат. наук
<https://orcid.org/0000-0002-5729-7891>

^{1, 2, 3, 4} Інститут електродинаміки НАН
України, м. Київ, Україна

MODELING OF TRANSIENT PROCESSES IN A LOW-POWER WIND TURBINE WITH A MAGNETIC GEARBOX AND A PERMANENT MAGNET GENERATOR

Received Sep. 11, 2024; accepted Sep. 16, 2024
Available online Oct. 01, 2024

Grebenikov V.¹, Podoltsev O.²,
Mazurenko L.³, Gamaliia R.⁴

Author for correspondence: Grebenikov Viktor,
e-mail: elm1153@gmail.com

The paper developed a Simulink computer model of a small-power wind power plant (3 kW), which uses a magnetic gearbox instead of a mechanical gearbox, and also contains a synchronous generator with permanent magnets. Based on this model, calculations of related mechanical and electrical processes were carried out in two modes of its operation - start-up mode and mode of instantaneous increase in wind speed acting on the wind turbine (from 10 m/s to 14 m/s and then again to 10 m/s with). According to the results of the calculations, it is shown that in transient modes when short-term dynamic overloads occur, both rotors of the magnetic gearbox may fall out of synchronous motion for a certain period of time and then, depending on the parameters of the gearbox (as well as its other elements), the electromechanical system or reaches a certain working steady state, or loses the ability to transmit mechanical power from the wind turbine

¹ Dr. of Tech. Science
<https://orcid.org/0000-0002-1114-1218>

² Dr. of Tech. Science
<https://orcid.org/0000-0002-9029-9397>

³ Dr. of Tech. Science
<https://orcid.org/0000-0002-7059-249X>

⁴ D. in Physics and Mathematics
<https://orcid.org/0000-0002-5729-7891>

^{1, 2, 3, 4} Institute of Electrodynamics of the
NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

to the generator due to the rotors of the magnetic gearbox falling out of synchronism. At the same time, the stability of the wind power plant as a whole depends mainly on the value of the maximum magnetic moment of the reducer. Bibl. 13, Fig. 8.

Keywords: wind power plant, wind turbine, magnetic gearbox, permanent magnet generator, computer modeling, plant operation modes, stability of magnetic gearbox.

Перелік використаних скорочень та позначень:

НР – низькошвидкісний ротор

МР – магнітний редуктор

ВР – високошвидкісний ротор

ККД – коефіцієнт корисної дії

Вступ. У сучасному світі зростає використання відновлюваних джерел енергії через дедалі більші труднощі, пов'язані з використанням енергії, отриманої шляхом спалювання природних ресурсів. Одним із перспективних рішень у цій сфері є використання енергії вітру, що дозволяє ефективно та раціонально виробляти електричну енергію [1].

При цьому все частіше використовуються вітроустановки малої потужності (3–5 кВт), частота обертання вітро-ротора яких при середній швидкості вітру $V = 3\text{--}5\text{ м/с}$ досить мала і становить приблизно $n = 100\text{--}200\text{ об/хв}$. Тихохідний електрогенератор для вітроустановки з такою частотою обертання в разі безпосереднього з'єднання вала вітроротора та електрогенератора має багато полюсів і досить великі габарити [1]. Тому часто застосовують підвищувальні редуктори (мультиплікатори), які дають змогу підвищити частоту обертання електрогенератора в кілька разів і тим самим зменшити масу його активної частини, оскільки електромагнітний крутний момент пропорційний об'єму електричної машини. Однак механічні редуктори є джерелом додаткового шуму, вимагають досить частого обслуговування, знижують термін служби вітроустановки.

Останнім часом для вітроустановок дедалі частіше використовують магнітні редуктори на постійних магнітах, які, на відміну від механічних мультиплікаторів, не створюють додаткового шуму, не потребують змащення, довговічність роботи в них вища, експлуатаційні витрати також істотно знижуються [2, 3].

Слід також відзначити важливу особливість магнітних редукторів (МР) для вітроустановок. Магнітний редуктор, на відміну від механічного, може прослизати (перекидатися), якщо навантаження на генераторі перевищує розрахункове пікове значення або при номінальному

навантаженні швидкість вітру зростає до ураганної. У класичних випадках застосовують спеціальні заходи проти руйнування вітроустановки при ураганних вітрах. Під час ураганного вітру ротор МР буде прослизати і тим самим страхувати вітроустановку від механічного руйнування.

Протягом останнього десятиліття фахівці у галузі електричних машин багато уваги приділяють створенню та дослідженню МР [5, 6]. На сьогодні найкращим вважається конструкція МР із модульованим магнітним полем у повітряному проміжку, яка була запропонована в роботі [7]. Для з'ясування можливості використання таких МР у вітроенергетичних установках необхідно провести попередні дослідження щодо роботи таких систем як в усталених, так і в перехідних режимах. Слід зазначити, що хоча електромеханічні процеси безпосередньо в МР розглядалися в багатьох роботах, наприклад [8, 9], динамічні процеси в МР як елементи складної електромеханічної системи – вітроустановки досліджувалися недостатньо.

Мета роботи. Метою цієї роботи є розробка комп'ютерної моделі та дослідження пов'язаних механічних та електричних динамічних процесів в основних елементах вітроелектричної установки малої потужності (3 кВт), в якій замість механічного редуктора використовується магнітний редуктор.

Виклад основного матеріалу

1. Комп'ютерна модель установки. На рис. 1 показана структура вітроелектричної установки, що використовується в цій роботі для заряджання акумуляторної батареї. Вона містить вітрову турбіну, вал якої приєднаний до низькошвидкісного ротора (НР) магнітного редуктора, синхронний генератор з постійними магнітами приєднаний до високошвидкісного ротора (ВР) магнітного редуктора.

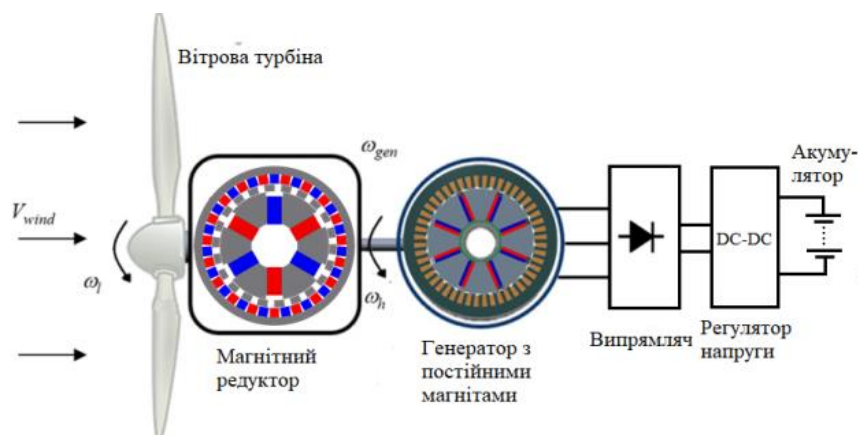


Рис. 1. Структура вітроустановки, що досліджується в роботі

Fig. 1. The structure of the wind energy installation, which is being studied in the work

Трифазна обмотка генератора підключена до випрямляча, до виходу якого під'єднаний DC-DC конвертор з акумуляторною батареєю. В роботі розроблена Simulink-модель такої установки, що відповідає наведеній структурі (рис. 2). У цій моделі регулятор напруги разом з акумулятором представлені еквівалентним резистивним навантаженням. Далі надаються математичні моделі та наведено опис основних елементів цієї моделі.

1.1. Вітрова турбіна. Механічна потужність та механічний момент вітрової турбіни в роботі розраховується на основі таких виразів [1]:

$$P_{turbina} = C_p(\lambda, \beta) 0,5 \rho A V_{wind}^3, \quad (1)$$

$$T_{turbina} = P_{turbina} / \omega_{turbina}, \quad (2)$$

де ρ – густина повітря, $A = \pi R^2$ (R – зовнішній радіус

турбіни), $\omega_{turbina}$ – кутова швидкість вала турбіни, безрозмірний коефіцієнт C_p розраховується як

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1(C_2 / \lambda_i - C_3 \beta - C_4) e^{-C_5 / \lambda_i} + C_6 \lambda,$$

$$\lambda_i = \left(\frac{1}{\lambda + 0,08 \beta} \cdot \frac{0,035}{\beta^2 + 1} \right)^{-1},$$

де $\lambda = \omega_{turbina} R / V_{wind}$, а β – кут розташування лопатей турбіни, град. Результати розрахунку потужності вітротурбіни за виразом (1) як функції швидкості обертання турбіни n при різних значеннях швидкості вітру V_{wind} та при $\beta = 0$, $R = 2,2$ м, що відповідає номінальній потужності турбіни – 3 кВт, наведені на рис. 3. Із цього рисунку видно, що для кожного значення V_{wind} існує оптимальне значення $\omega_{turbina}$, коли механічна потужність турбіни досягає максимального значення $P_{turbina}^{max}$.

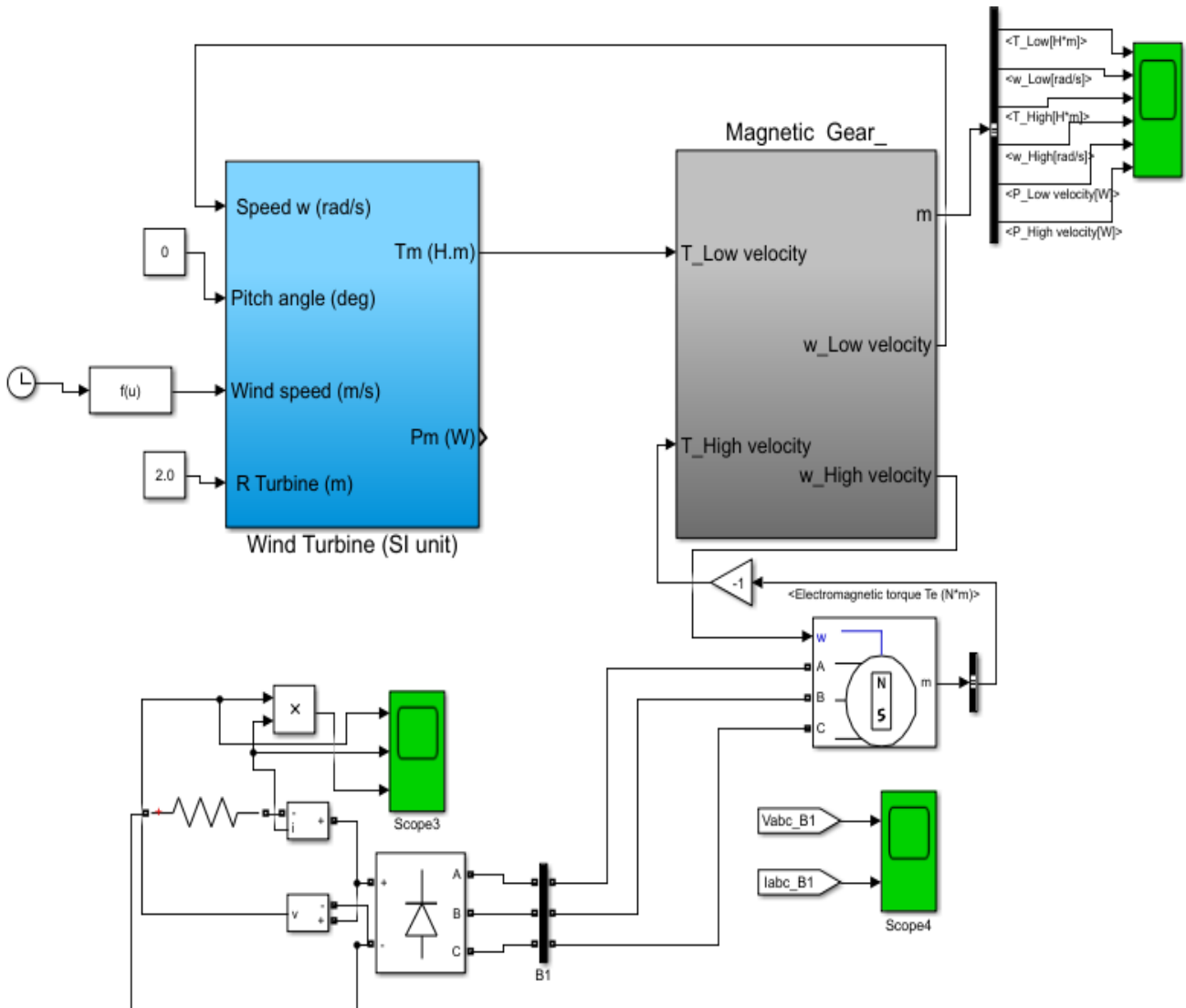


Рис. 2. Simulink-модель вітроустановки

Fig. 2. Simulink wind turbine model

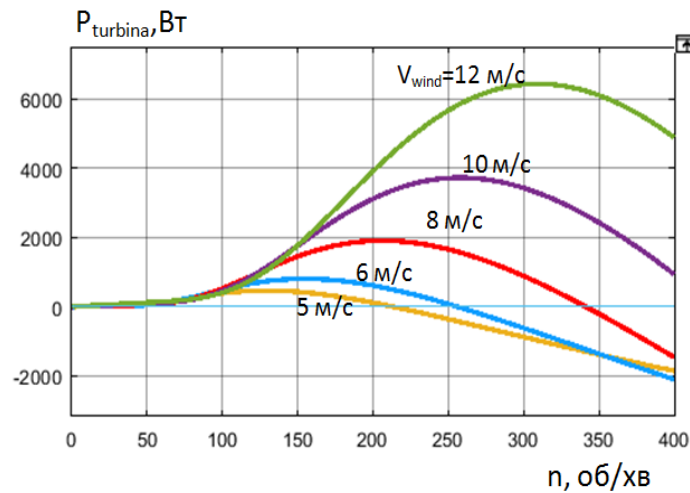


Рис. 3. Залежність потужності вітротурбіни від швидкості її обертання при різних швидкостях вітру.

Fig. 3. Dependence of wind turbine power on its rotation speed at different wind speeds

На основі виразів (1), (2) був розроблений Simulink-блок, показаний на рис. 2. синім кольором. Цей блок дозволяє за вхідними величинами, що розташовані на блоці ліворуч, розрахувати вихідні величини – $T_{turbina}$, $P_{turbina}$ розташовані праворуч, та використовується далі як елемент інтегрованої моделі всієї вітроелектричної установки.

1.2. Магнітний редуктор. Схематична конструкція магнітного редуктора показана на рис. 4. Він складається з зовнішнього ротора з постійними магнітами 4 та замикачем магнітного потоку 1, модулятора магнітного поля 3, з'єднаного з валом вітрової турбіни та високошвидкісного ротора з постійними магнітами 5 і полюсами 2, з'єднаного з валом електрогенератора. Зовнішній діаметр магнітного редуктора становить 172 мм, діаметр внутрішнього ротора – 106 мм, осьова довжина активної частини – 50 мм, повітряні проміжки – 1 мм.

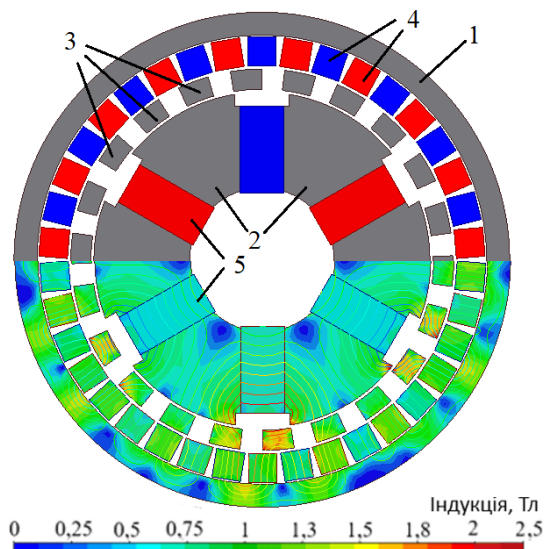


Рис. 4. Магнітний редуктор

Fig. 4. Magnetic gearbox

Зовнішній ротор має 19 пар полюсів, внутрішній високошвидкісний ротор – 3 пари полюсів, модулятор – 22 феромагнітних елементи. Тип магнітів – N42. На зовнішньому роторі розміщені постійні магніти радіальної намагніченості, а на внутрішньому – тангенціальної. Маса постійних магнітів редуктора становить 1,4 кг. Коефіцієнт передачі магнітного редуктора дорівнює 7,33 та обчислюється за формулою:

$G = (p_l + p_h)/p_h$, де p_l та p_h – кількість пар полюсів відповідно на зовнішньому та внутрішньому роторах. Не ціле значення коефіцієнта передачі вибрано з міркування зниження паразитного зубцевого моменту магнітного редуктора [12].

Результати комп'ютерного моделювання магнітного редуктора та розрахунки статичних моментних характеристик показали, що максимальний крутний момент на валу модулятора не перевищує 159 Нм. При цьому на високошвидкісному роторі максимальний момент становить 23 Нм.

Математична модель, що описує динаміку обертального руху роторів магнітного редуктора, має такий вигляд [10]:

$$J_l \frac{d\omega_l}{dt} + k_l \omega_l = T_{turbine} - T_{max} \sin(p_l \theta_l - p_h \theta_h),$$

$$J_h \frac{d\omega_h}{dt} + k_h \omega_h = \frac{T_{max}}{G} \sin(p_l \theta_l - p_h \theta_h) - T_{gen}, \quad (3)$$

$$\frac{d\theta_l}{dt} = \omega_l, \quad \frac{d\theta_h}{dt} = \omega_h.$$

Тут $J_{l,h}$ – момент інерції відповідно НР (позначається індексом l – low speed) та ВР (позначається індексом h – high speed), $\omega_{l,h}$, $\theta_{l,h}$ – кутова швидкість та кутове положення обох валів, $p_{l,h}$ – число пар полюсів, $k_{l,h}$ – коефіцієнт в'язкого тертя, T_{max} – максимальне значення

магнітного моменту, що діє на НР, G – коефіцієнт передачі магнітного редуктора.

Розроблена Simulink-модель магнітного редуктора, що реалізує систему рівнянь (3), була раніше описана в роботі авторів [13]. Ця модель побудована як еквівалентне механічне коло, що складається з кола для НР та механічного кола для ВР, що зв'язані між собою за допомогою інформаційного сигналу, що відповідає виразу $\sin(p_l \theta_l - p_h \theta_h)$ у математичній моделі (3) та залежить від миттєвого положення обох роторів. Як вхідні величини тут використовуються два моменти – $T_{turbine}, T_{gen}$, а вихідні величини – кутові швидкості обертання обох роторів $\omega_{l,h}$. На рис. 2 блок магнітного редуктора позначено сірим кольором.

1.3. Модель електричного генератора та випрямляча.

В роботі використовувалася базова модель з бібліотеки Simscape синхронного генератора з постійними магнітами та модель випрямляча, що побудована на базі блоку Universal bridge (рис. 2). Під час проектування та розрахунку електричного генератора з постійними магнітами (рис. 5) було використано статор стандартного асинхронного двигуна АІР112М6, в якому короткозамкнений ротор замінено на ротор з постійними магнітами. Статор має такі розміри: зовнішній діаметр $D_a = 191$ мм, внутрішній діаметр статора $D_i = 108$ мм, число пазів $Z_p = 36$; висота пазів $h_s = 18,5$ мм, довжина активної частини осердя $l_{Fe} = 125$ мм. Число провідників у пазу – $W = 1$, кожний виток складається з 36 жил діаметром 1,25 мм. Таке число витків вибрано, щоб генератор за номінальної частоти обертання забезпечував заряд акумулятора напругою 24 В. Величина повітряного проміжку між статором і ротором дорівнює $\delta = 1,5$ мм. Ротор із постійними магнітами має зовнішній діаметр, що дорівнює $D_{ra} = 105$ мм; у ньому розміщені постійні магніти розміром $(125 \times 25 \times 10)$ мм, тип магнітів – N42. Магніти в роторі мають тангенціальне розташування. Таке розташування магнітів у роторі дає змогу отримати найкращі питомі характеристики [9]. На рис. 5 наведено загальний вигляд і картину розподілу магнітного поля в активній зоні генератора.

2. Розрахунок перехідних процесів у вітроелектричній установці з магнітним редуктором. Розроблена Simulink-модель установки в цілому, що наведена на рис. 2, складається з моделі вітрової турбіни, магнітного редуктора, синхронного генератора з постійними магнітами, випрямляча, що підключений до виходу генератора та до еквівалентного резистивного навантаження. Для проведених розрахунків використовувалися такі початкові дані:

– Вітрова турбіна: номінальна потужність – 3 кВт, номінальна частота обертання – 250 об/хв.

– Магнітний редуктор:

$T_{пвх} = 159$ Н·м, $k_h = 0,0017$ Н·м·с, $k_l = 0,08$ Н·м·с, $p_l = 19$, $p_h = 3$, $J_l = J_h = 0,001$ кг·м², коефіцієнт редукції

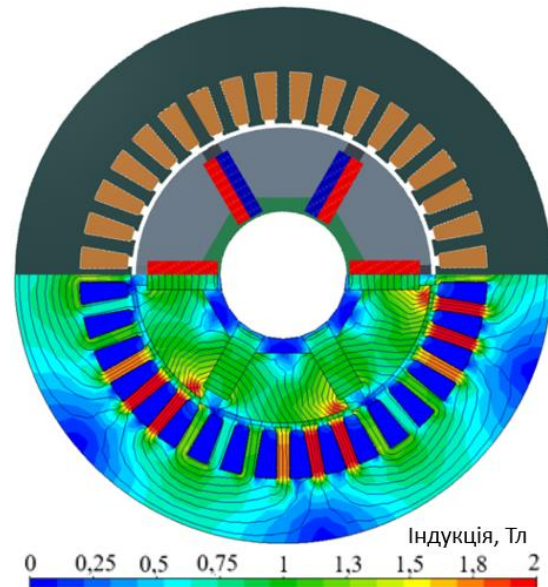


Рис. 5. Електричний генератор

Fig. 5. Electric generator

$G=7,33$. Для розрахунку цих параметрів МР використовувався розрахунок методом скінченних елементів польової задачі в пакеті Simcenter Magnet.

– Генератор: активний опір фази – 0,022 Ом, індуктивність фази – 26,7 мкГн, число пар полюсів – 4, потокозчеплення від постійних магнітів – 0,26 В·с. Для розрахунку цих параметрів генератора використовувався розрахунок методом скінченних елементів польової задачі в пакеті Simcenter MotorSolve. Далі наведені результати розрахунку роботи установки при вказаних параметрах у двох режимах роботи.

2.1. Режим пуску установки та вихід на усталений режим.

У роботі виконувався розрахунок пускового режиму вітроелектричної установки за умови, що швидкість вітру повільно збільшується від нуля до 10 м/с і потім установка працює в усталеному режимі. Результати розрахунку часових характеристик МР – кутової швидкості, механічного моменту та механічної потужності для НР та для ВР, наведені на рис. 6. Видно, що на початку процесу (часовий проміжок 3–4,2 с) всі характеристики на валу НР, що приєднаний до вітрової турбіни, мають осциляції, що відображають процес входження в синхронізм ВР. Після виходу на усталений режим механічна потужність на валу турбіни, а також НР становить 3 кВт, а на валу ВР, а також генератора – 2,8 кВт (середнє значення). Звідси, розрахункове значення ККД магнітного редуктора дорівнює 94 %. Електричні характеристики генератора в цьому режимі роботи установки наведені на рис. 7. Видно, що при втягуванні в синхронізм ВР напруга та струм у навантаженні, а також на виході генератора зростають до усталеного значення.

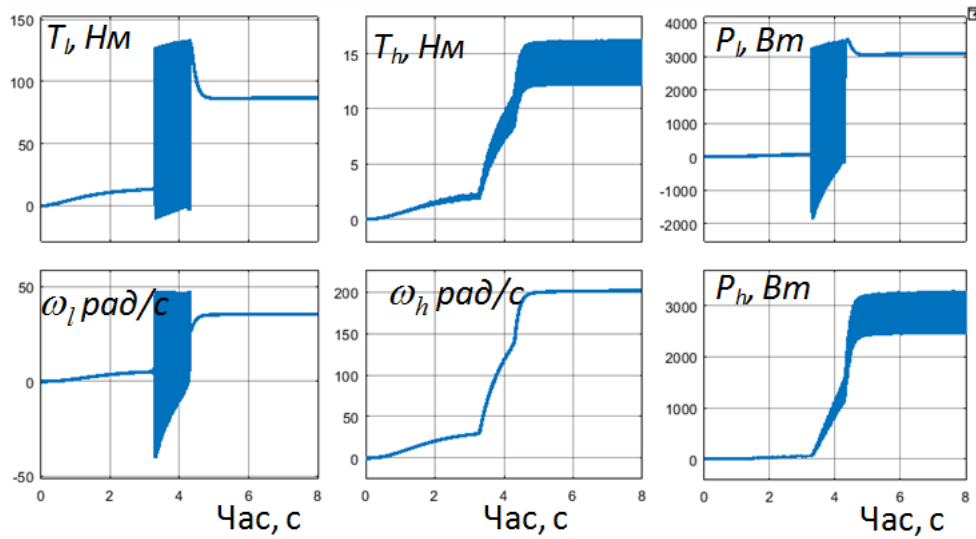


Рис. 6. Динамічні характеристики МР

Fig. 6. Dynamic characteristics of MR

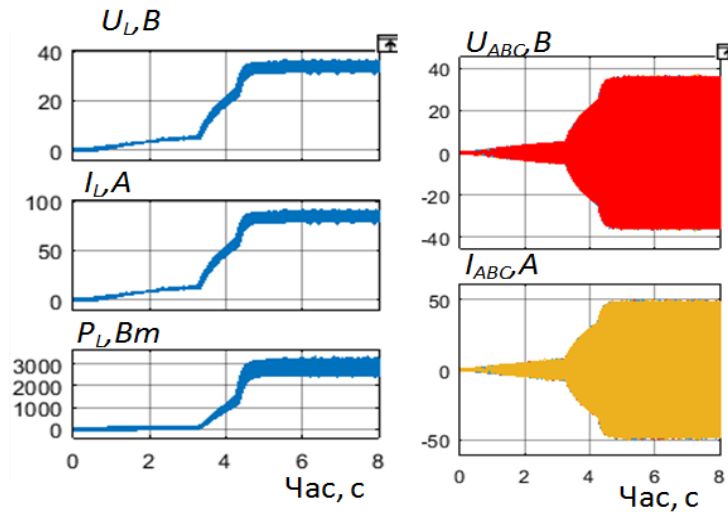


Рис. 7. Електричні процеси на виході генератора

Fig. 7. Electrical processes at the output of the generator

2.2. Робота установки при виникненні пориву вітру. Розраховується попередній режим роботи установки з тою відмінністю, що в момент часу 5 с, коли система досягла усталеного режиму роботи, швидкість вітру миттєво збільшується від 10 до 14 м/с і потім в момент часу 7 с ця швидкість знову повертається до значення 10 м/с (приблизна модель пориву вітру). Результати розрахунку часових характеристик МР наведені на рис. 8. Тут всі графіки відображають ті самі величини, що й на рис. 6. Видно, що при виникненні порив вітру (в момент часу 5 с), обидва ротори МР випадають з синхронізму і редуктор втрачає можливість передавання механічної потужності від турбіни до генератора. При цьому НР починає обертатися з відносно великою швидкістю – як реакція на потужний вітер, а швидкість ВР зменшується внаслідок випадіння із синхронізму МР. Процес зменшення цієї швидкості триває до моменту часу (дорівнює 7 с),

коли швидкість вітру зменшується до початкового значення – 10 м/с. І потім МР виходить на штатний усталений режим роботи, як і на рис. 6.

Для того щоб встановити загальні умови стійкої роботи МР у динамічних режимах, розглянемо систему рівнянь (3). Із аналізу першого та другого рівняння, що відображають баланс моментів на валу відповідно НР та ВР, можна припустити, що для стабільної роботи необхідно одночасне виконання двох умов:

$$\begin{aligned} T_{\text{turbine}} - J_l \frac{d\omega_l}{dt} - k_l \omega_l &< T_{\text{max}}, \\ J_h \frac{d\omega_h}{dt} + k_h \omega_h + T_{\text{gen}} &< \frac{T_{\text{max}}}{G}. \end{aligned} \quad (4)$$

З цих двох виразів за відсутності перших складових, що відповідають моментам інерції, можна отримати такі

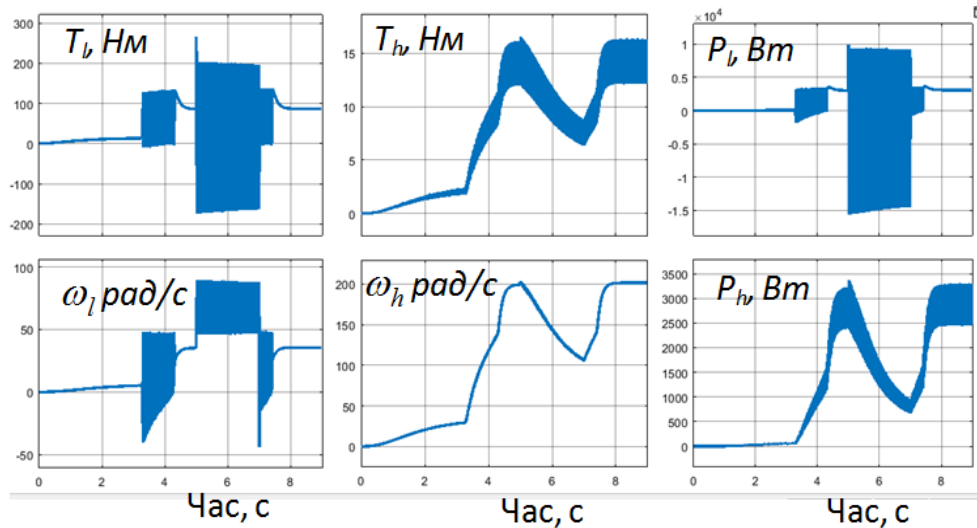


Рис. 8. Динамічні характеристики МР при виникненні пориву вітру

Fig. 8. Dynamic characteristics of MR when a gust of wind occurs

умови роботоспроможності установки з МР в усталеному режимі: $T_{turbine} - k_l \omega_l < T_{max}$, $k_h \omega_h + T_{gen} < \frac{T_{max}}{G}$.

Як зазначено в [5, 6], використання потужнішого МР зі збільшеним значенням максимального магнітного моменту до значення $T_{max} \geq (1,2 \div 1,5) T_{turbine}$ дозволяє отримати більш стійку до перенавантажень роботу як МР, так і вітроелектричної установки в цілому.

Висновки. У роботі розроблена комп'ютерна Simulink-модель вітроелектричної установки малої потужності (3 кВт), в якій замість механічного редуктора використовується магнітний редуктор, до виходу якого приєднується синхронний генератор з постійними магнітами. До обмотки генератора підключено випрямляч, що живить еквівалентне резистивне навантаження. На основі розробленої моделі установки проведені дослідження пов'язаних механічних та електричних процесів в основних її елементах у двох режимах роботи – пусковому режимі та режимі миттєвого коливання швидкості вітру, що діє на вітрову турбіну – від 10 до 14 м/с і потім знову 10 м/с.

За результатами проведених розрахунків показано, що в перехідних режимах при виникненні короткочасних динамічних перевантажень обидва ротори магнітного редуктора на певний проміжок часу можуть випадати з синхронного руху і далі, залежно від параметрів редуктора (а також інших елементів), електромеханічна система або досягає робочого усталеного режиму, або втрачає можливість передавання механічної потужності від вітрової турбіни до генератора внаслідок випадіння із синхронізму роторів магнітного редуктора. При цьому переважно від значення максимального магнітного моменту редуктора залежить стабільність роботи вітроелектричної установки в цілому.

Робота виконана за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України – проєкт «Електро-

механічні системи підвищеної енергоефективності для енергетики, технологій і транспорту», 2024–2025 рр.

ПОСИЛАННЯ

1. Heier S. Grid integration of wind energy onshore and offshore conversion systems. Wiley. 2014. 513 p.
2. Bao G. Q., Mao K. F. A Wind Energy Conversion System with Field Modulated Magnetic Gear. 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference DOI: 10.1109/APPEEC.2011.5748902
3. Li K., Modaresahmadi S., Williams W., Wright J., Som D., Bird J. Z. Designing and Experimentally Testing a Magnetic Gearbox for a Wind Turbine Demonstrator. IEEE Transactions on Industry Applications (Volume: 55, Issue: 4, July-Aug. 2019) DOI: 10.1109/TIA.2019.2905838
4. Rashid M. H. Electric Renewable Energy Systems. Elsevier. 2016. 587 p.
5. Ruiz-Ponce G., Arjona M. A., Hernandez C., Escarela-Perez R. A Review of Magnetic Gear Technologies Used in Mechanical Power Transmission. Energies. 2023. 16(4) 1721. <https://doi.org/10.3390/en16041721>.
6. Bo Yan, Xianglin Li, Xiuhe Wang, Yubo Yang. A review on the field-modulated magnetic gears: Development status, potential applications, and existent challenges. IET Electrical Power Application. 2024. 18. P. 1–17. DOI: 10.1049/elp2.12365.
7. Atallah K., Howe D. A novel high-performance magnetic gear. IEEE Trans. Magn. 2001. 37(4). P. 2844–3846. DOI: 10.1109/20.951324.
8. Saleh M. Sh., EL-Betar A. A., EL-Assal A. M. Review of Modeling and Simulation Technologies Application to Wind Turbines Drive Train. Journal on Today's Ideas –

- Tomorrow's Technologies, Vol. 2, No. 2, December 2014. P. 117–131. DOI: 10.15415/jotitt.2014.22018.
9. Penzkofer A., Atallah K. Analytical Modelling and Optimisation of Pseudo Direct Drive Permanent Magnet Machines for Large Wind Turbines. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2015. V. 51 No. 12. P. 31–37. DOI: 10.1109/TMAG.2015.2461175.
 10. Badr-El-Boudour Bidonche. Transient Performance of a Magnetic Geared Induction Machine. *COMPEL*. 2020. July. P. 1–17. DOI:10.1108/COMPEL-12-2019-0485.
 11. Dobzhanskyi O., Grebenikov V., Gouws R., Gamaliia R., Hossain E. Comparative Thermal and Demagnetization Analysis of the PM Machines with Neodymium and Ferrite Magnets. *Energies*. 2022. Vol. 15. Issue 12. 4484. P. 1–15. DOI: 10.3390/en15124484.
 12. Гребеников В. В., Гамалея Р. В. Магнитный редуктор для ветроустановок малой мощности. *Гідроенергетика України*. 2019. № 3-4. С. 65–68. https://uhe.gov.ua/media_tsentr/zhurnal_hidroenerhetyka_ukrayiny/gidroenergetika-ukraini-2019-no3-4
 13. Grebenikov V. V., Podoltsev O. D., Gamaliia R. V., Tazhibaev A. A., Arynov N. N., Sakhno O. A. Computer Modeling of Ttransient Eelectromagnetic Pprocesses in a Wind Power Plant with a Magnetic Gearbox/ Tekhnichna Electrodynamica. 2024, N 6.
 5. Ruiz-Ponce G., Arjona M.A., Hernandez C., Escarela-Perez R. A Review of Magnetic Gear Technologies Used in Mechanical Power Transmission. *Energies*. 2023. 16(4) 1721. <https://doi.org/10.3390/en16041721>.
 6. Bo Yan, Xianglin Li, Xiuhe Wang, Yubo Yang. A review on the field-modulated magnetic gears: Development status, potential applications, and existent challenges. *IET Electrical Power Application*. 2024. 18. P. 1–17. DOI: 10.1049/elp2.12365.
 7. Atallah K., Howe D. A novel high-performance magnetic gear. *IEEE Trans. Magn.* 2001. 37(4). pp. 2844–3846. DOI: 10.1109/20.951324.
 8. Saleh M. Sh., EL-Betar A. A., EL-Assal A. M. Review of Modeling and Simulation Technologies Application to Wind Turbines Drive Train. *Journal on Today's Ideas – Tomorrow's Technologies*, Vol. 2. No. 2, December 2014. P. 117–131. DOI: 10.15415/jotitt.2014.22018.
 9. Penzkofer A., Atallah K. Analytical Modelling and Optimisation of Pseudo Direct Drive Permanent Magnet Machines for Large Wind Turbines. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2015. V.51 No. 12. P. 31–37. DOI: 10.1109/TMAG.2015.2461175.
 10. Badr-El-Boudour Bidonche. Transient Performance of a Magnetic Geared Induction Machine. *COMPEL*. 2020. July. P. 1–17. DOI:10.1108/COMPEL-12-2019-0485.
 11. Dobzhanskyi O., Grebenikov V., Gouws R., Gamaliia R., Hossain E. Comparative Thermal and Demagnetization Analysis of the PM Machines with Neodymium and Ferrite Magnets. *Energies*. 2022. Vol. 15. Issue 12. 4484. P. 1–15. DOI: 10.3390/en15124484.
 12. Grebenikov V. V., Gamaliia R. V. Magnetic gearbox for low-power wind turbines // *Hydroenergy of Ukraine*. 2019. No. 3-4. P. 65–68. https://uhe.gov.ua/media_tsentr/zhurnal_hidroenerhetyka_ukrayiny/gidroenergetika-ukraini-2019-no3-4
 13. Grebenikov V. V., Podoltsev O. D., Gamaliia R. V., Tazhibaev A. A., Arynov N. N., Sakhno O. A. Computer Modeling of Ttransient Eelectromagnetic Pprocesses in a Wind Power Plant with a Magnetic gearbox/ Tekhnichna Electrodynamica. 2024, N 6.

REFERENS

1. Siegfried Heier. *Grid integration of wind energy onshore and offshore conversion systems*. Wiley. 2014. 513 p.
2. Bao G. Q., Mao K. F. A Wind Energy Conversion System with Field Modulated Magnetic Gear. 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference DOI: 10.1109/APPEEC.2011.5748902
3. Li K., Modaresahmadi S., Williams W., Wright J., Som D., Bird J. Z. Designing and Experimentally Testing a Magnetic Gearbox for a Wind Turbine Demonstrator. *IEEE Transactions on Industry Applications* (Volume: 55, Issue: 4, July-Aug. 2019) DOI: 10.1109/TIA.2019.2905838
4. Rashid M. H. *Electric Renewable Energy Systems*. Elsevier. 2016. 587 p.