

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-43>

УДК 621.311.24

ДОН НАТАЛІЯ

Херсонський національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-9503-5326>

e-mail: don.natalia@kntu.edu.ua

ПОГРЕБНЯК ІРИНА

Херсонський національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0935-1168>

e-mail: pohrebnyak.iryana@kntu.edu.ua

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ АВТОНОМНОЇ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ З АСИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ

У статті представлено результати моделювання динамічного режиму роботи автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором. В програмному середовищі MATLAB/Simulink створено візуально-орієнтовану блочну схему автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором, проведено моделювання режимів її роботи, визначено основні характеристики. Зроблено висновок про прийнятність запропонованого підходу до моделювання роботи автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором у середовищі MATLAB/Simulink.

Ключові слова: автономна вітроелектрична установка, асинхронний генератор, вітротурбіна, динамічні режими роботи, моделювання, MATLAB/Simulink.

DON NATALIA

Kherson National Technical University

POGREBNIYAK IRYNA

Kherson National Technical University

MODELING OF THE DYNAMIC OPERATION MODE OF AN AUTONOMOUS WIND POWER INSTALLATION WITH AN ASYNCHRONOUS GENERATOR

The article presents the results of modeling the dynamic operation mode of an autonomous wind power installation with an asynchronous generator.

Currently, the starting modes of autonomous wind power plants of both small and medium capacity have been sufficiently studied; however, the main operating modes of autonomous wind power plants still require further investigation. Consequently, modeling the dynamic operating modes of autonomous wind power plants with an asynchronous generator is relevant.

A visually-oriented block diagram of the autonomous wind power installation with an asynchronous generator was created in the MATLAB/Simulink environment, and the operation modes were simulated, determining the main characteristics. The results of the study indicate the adequacy of the applied model, which allows for the study of dynamic operating modes that enable optimal tuning of the control system to enhance energy efficiency both of the wind power installation and the autonomous system as a whole.

Further research may be directed towards examining the operating modes of wind power installations as part of a wind power station. The model of an autonomous wind power installation with an asynchronous generator, implemented in the Matlab/Simulink environment, will allow for the investigation of the energy characteristics of the installation based on available technical parameters and can be used in the educational process in training specialists in the field of «Electrical Engineering», particularly in the laboratory practice of the courses «Electrical Machines and Apparatus» and «Fundamentals of Wind Energy».

Keywords: autonomous wind power installation, asynchronous generator, wind turbine, dynamic operating modes, modeling, MATLAB/Simulink.

Стаття надійшла до редакції / Received 09.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 05.05.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Перспективним напрямком підвищення енергетичної ефективності автономних систем електропостачання є використання в якості джерела вітроелектричних установок. Автономні системи електропостачання на базі вітроелектричних установок набувають поширення, що викликає необхідність проведення різноманітних досліджень, пов'язаних з оптимізацією, управлінням і регулюванням режимів роботи генеруючого обладнання. В якості основного інструментарію дослідження таких електроенергетичних систем доцільно застосовувати методи математичного моделювання, що зумовлює задачу створення моделі автономної вітроелектричної установки для дослідження як в статичному, так і в динамічному режимах її роботи [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Автономна вітроелектрична установка – це вітроелектрична установка, яка живить електроенергією відокремленого споживача і не є частиною загальної енергосистеми. Для автономних вітроелектричних установок потужність навантаження споживача регламентованим і має не перевищувати номінальну потужність вітроелектричної установки [1].

Однією з головних проблем використання енергії вітру є нестабільна генерація потужності, що постійно змінюється в залежності від сили вітру. Це призводить до непрогнозованих і нерегульованих змін потужності вітроелектричної установки і до нестационарного характеру генерації електроенергії,

що впливає на надійність і ефективність функціонування енергосистеми і створює значні складності для забезпечення її режиму [1].

В останні роки значний інтерес викликає застосування асинхронних машин в генераторному режимі для забезпечення живленням як споживачів трифазного струму, так і споживачів постійного струму через випрямні пристрої. У певних умовах експлуатації автономних джерел електроенергії застосування асинхронних генераторів виявляється кращим або навіть єдино можливим рішенням. Асинхронні машини відрізняються простотою експлуатації та обслуговування, легко включаються на паралельну роботу, а форма кривої вихідної напруги у них ближче до синусоїдальної, ніж у синхронних машин при роботі на однаковому навантаженні [2].

Один із недоліків асинхронних машин – це те, що вони є споживачами значної реактивної потужності, необхідної для створення магнітного поля в машині, яка повинна надходити з мережі при паралельній роботі з мережею або від іншого джерела реактивної потужності при автономній роботі. Іншою, найбільш складною проблемою є проблема стабілізації напруги і частоти автономно працюючого асинхронного генератора, що має «м'яку» зовнішню характеристику [2]. При використанні асинхронного генератора в складі автономної вітроелектричної установки ця проблема ускладнюється ще й нестабільністю частоти обертання ротора [1].

При проектуванні вітроелектричної установки з асинхронним генератором оптимізаційні розрахунки слід проводити по максимуму ККД в широкому діапазоні зміни частоти обертання і навантаження, а також за мінімумом витрат з урахуванням всієї схеми управління і регулювання. Конструкція генератора повинна враховувати кліматичні умови роботи ВЕУ, постійно діючі механічні умови на елементи конструкції і особливо – потужні електродинамічні і термічні дії при перехідних процесах, які виникають при пусках, перервах живлення, випадання з синхронізму, коротких замикань і інших, а також при значних поривах вітру [2].

Одним із потужних засобів комп'ютерної математики, що широко застосовується для такого моделювання різноманітних технічних систем, є середовище MATLAB, яке завдяки вбудованому пакету Simulink дозволяє здійснювати візуально-орієнтоване блочне імітаційне моделювання динамічних систем [3,4,5].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття

В даний час досить широко досліджені пускові режими автономних вітроелектричних установок як малої, так і середньої потужності, однак основні робочі режими автономних вітроелектричних установок все ще вимагають подальшого вивчення, відповідно моделювання динамічних режимів роботи автономних вітроелектричних установок з асинхронним генератором є актуальним.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є моделювання в середовищі Matlab/Simulink автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором та дослідження динамічних режимів її роботи.

Виклад основного матеріалу

Сучасні ВЕУ мають два принципово різні в управлінні режими роботи: робота з постійною і змінною швидкістю обертання ротора генератора, при цьому також принципи управління вітроелектричною установкою залежать від того, в якій зоні вітроенергетичної характеристики вони працюють [1,2].

Для моделювання доцільно розглянути три основні зони робочих режимів ВЕУ:

1 – ротор генератора починає обертатися, починається режим запуску – стратегія регулювання в цій зоні полягає в спостереженні за швидкістю вітру: визначається, чи знаходиться швидкість в межах, необхідних для початку роботи установки, і якщо знаходиться, то починається виконання операцій, необхідних для запуску установки. У цій зоні сучасні стратегії управління не використовуються [2];

2 – робоча частина характеристики, визначає режим, в якому бажано виробити максимально можливу кількість електроенергії; аеродинамічні втрати на вітроколесі перешкоджають досягненню установкою її максимального теоретично можливого відбору енергії з вітру – у зоні 2 можуть бути використані два принципи регулювання: поворот гондoli за напрямком вітру в горизонтальній площині чи зміна електромагнітного моменту [2];

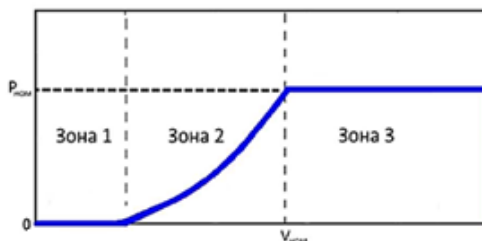


Рис. 1. Робочі режими вітроелектричної установки

Джерело: узагальнено авторами на основі [1, 2]

3 – режим починається при номінальній швидкості вітру $v_{\text{ном}}$ і вище, робота вітроелектричної установки обмежується електричними і механічними параметрами генератора – установка, що працює зі змінною швидкістю, підтримує постійне значення швидкості і постійну, номінальну потужність, змінюючи кут атаки лопатей для скидання надлишкової енергії. У цій області можуть бути використані всі три вище зазначених принципу управління виробленням потужності: управління кутом в горизонтальній площині, управління моментом, і управління кутом атаки лопатей вітроколеса [2].

Для моделювання динамічного режиму роботи автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором використано модель з розділу бібліотеки SimPowerSystems Matlab/Simulink (рис. 2) із застосуванням наступних елементів [5]:

– асинхронного генератора Asynchronous Generator потужністю 275 кВт (параметри досліджуваної моделі наведено на рис. 3);
– вітрової турбіни Wind Turbine (швидкісна характеристика досліджуваної моделі наведена на рис. 4);

- конденсаторів PF Correction Capacitor;
- трифазного вимикача Phase Breaker;
- навантаження Load;
- вимірювального блоку Scope1.

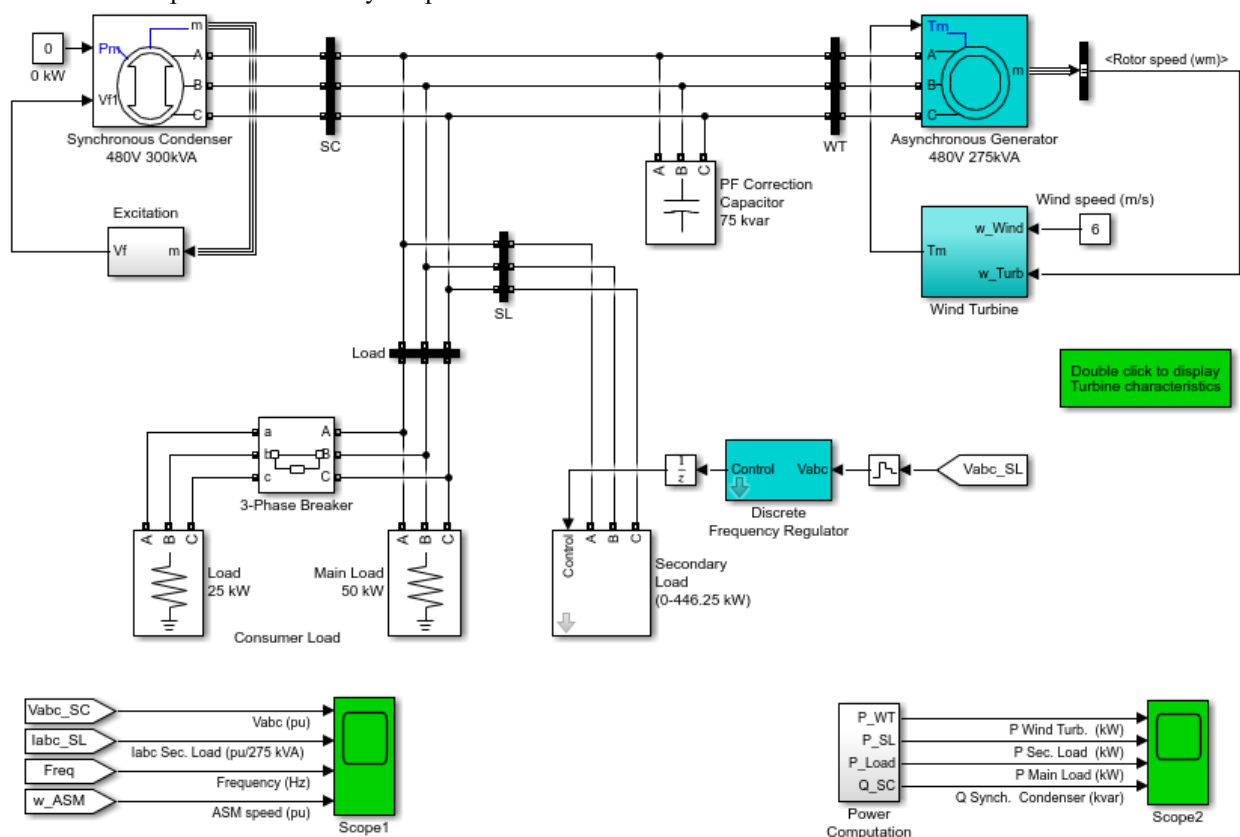


Рис. 2. Модель автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором

Джерело: отримано авторами моделюванням в Matlab/Simulink [5]

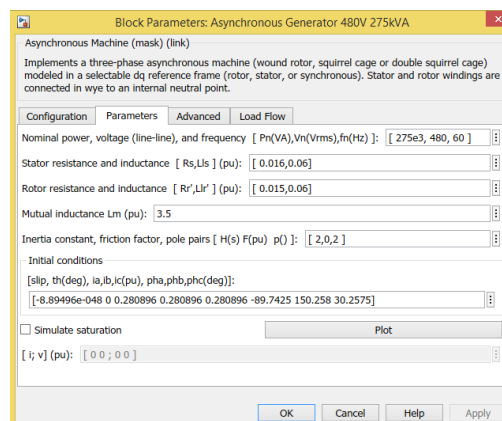


Рис. 3. Вікно вибору типу генератора

Джерело: отримано авторами моделюванням в Matlab/Simulink [5]

Моделювання режимів роботи вітроелектричної установки в даній моделі виконувалось за рахунок зміни параметру швидкості вітру (Wind speed).

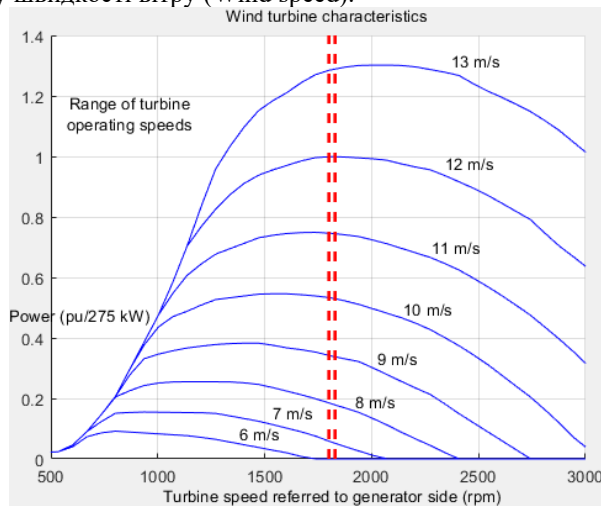


Рис. 4. Швидкісна характеристика вітротурбіни

Джерело: отримано авторами моделюванням в Matlab/Simulink [5]

На рис. 5 наведено результати моделювання роботи досліджуваної моделі автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором у зазначених на рис. 1 зонах.

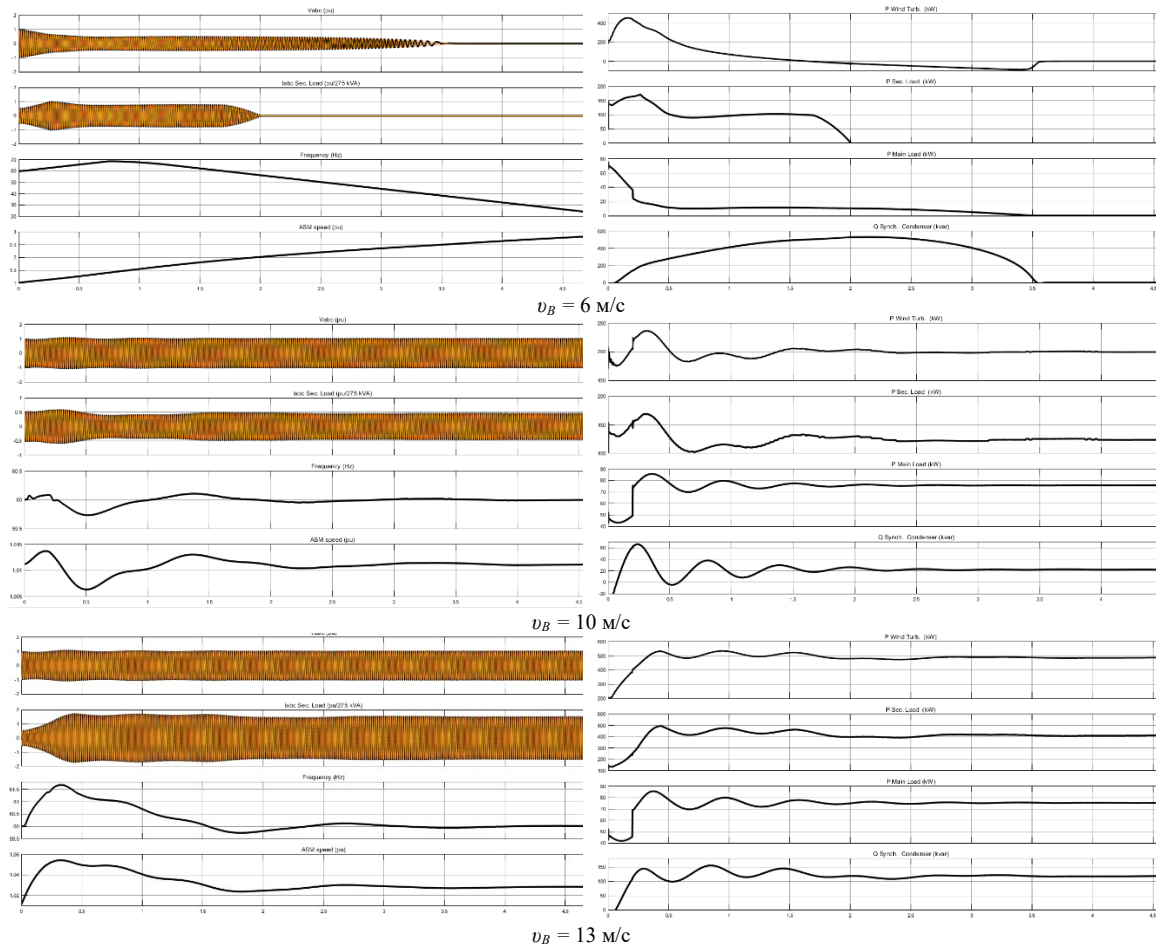


Рис. 5. Результати моделювання роботи моделі вітроелектричної установки з асинхронним генератором

Джерело: отримано авторами моделюванням в Matlab/Simulink [5]

Як видно з осцилограм, момент пуску вітроелектричної установки (зона 1) настає при досягненні швидкості вітру 6 м/с. При $v = 10$ м/с вітроелектрична установка переходить у зону 2. При $v_B = 13$ м/с (зона 3) вже доцільно обмежувати вихідну електричну потужність генератора на номінальному рівні.

Дослідження динамічного режиму роботи автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором проведено в діапазоні швидкостей вітру $v_B = 1 \div 13$ м/с.

Результати моделювання наведено на рис. 6.

Як показало моделювання, при швидкостях вітру $v_B = 1\div 5$ м/с вітроелектрична установка не генерує електричної енергії. При швидкостях вітру $v_B = 7\div 13$ м/с вітроелектрична установка працює в робочому режимі.

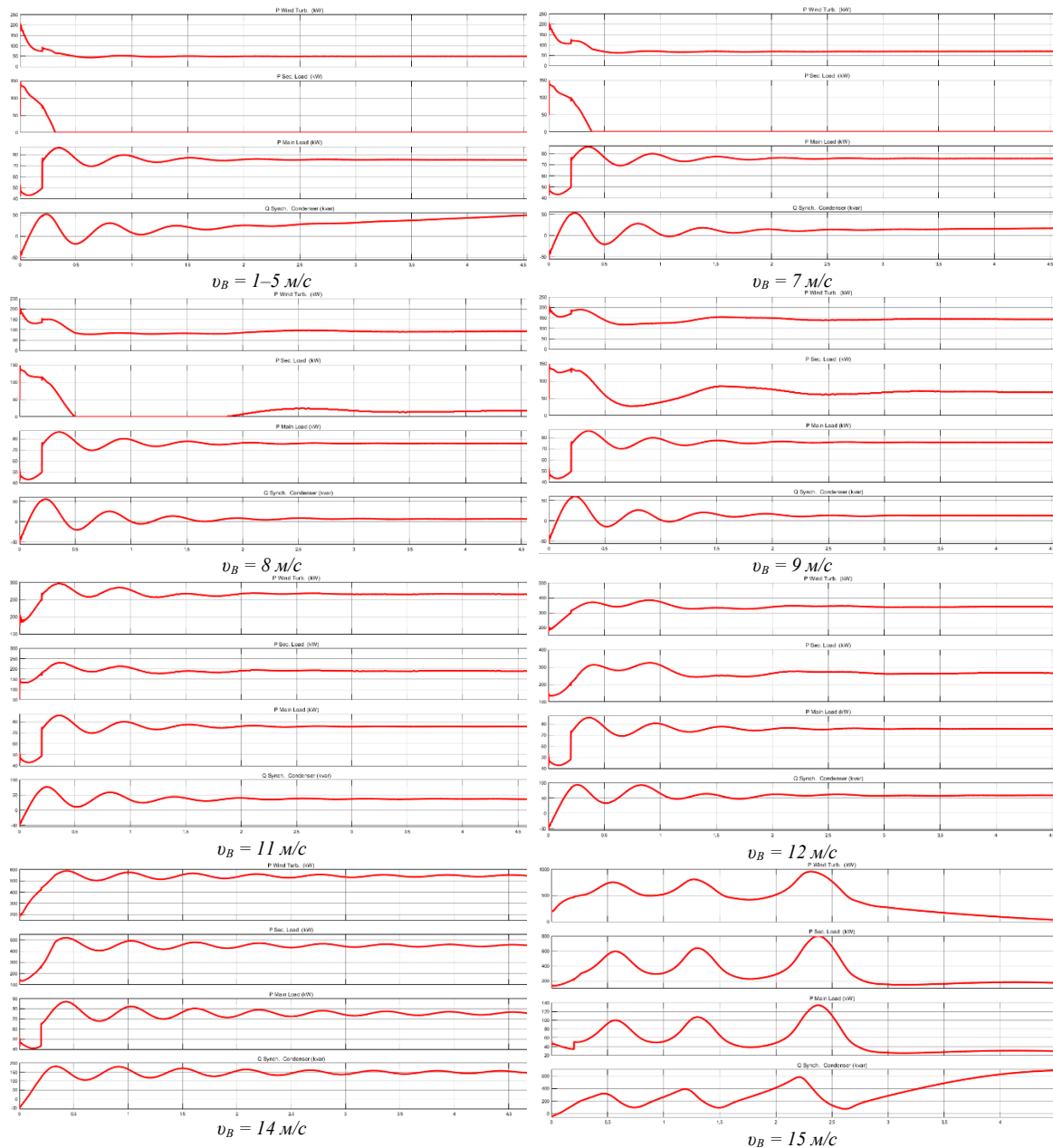


Рис. 6. Результати моделювання динамічного режиму роботи моделі вітроелектричної установки з асинхронним генератором

Джерело: отримано авторами моделюванням в Matlab/Simulink [5]

При досягненні швидкості вітру 14 м/с робота вітроелектричної установки стає нестабільною і при швидкості вітру 15 м/с спрацьовує автоматика і починається динамічне гальмування (згідно параметрів вітрової турбіни в моделі обмеження за швидкістю аварійної зупинки – 18 м/с.

При цьому гальмування характеризується наступними показниками системи:

$P_{Wind\ Turbo}$ – в період $t = 0,5$ с вмикається динамічне гальмування, вихідна потужність починає спадати і через $t = 3,5$ с режим противикання закінчується та відбувається повна зупинка генератора;

$P_{Sec. Load}$ – в період часу $t = 0$ до 3 с відбувається спадання споживання вторинним навантаженням для підтримки частоти $f = 60$ Гц, після періоду часу $t = 3$ с споживання припиняється;

$P_{Main. Load}$ – в період гальмування ВЕУ відбувається споживання електричного струму до моменту зупинки генератора;

$Q_{Condenser}$ – під час динамічного гальмування асинхронного генератора споживання реактивної потужності зростає на проміжку часу від 0 до 2,2 с після зупинки генератора споживання реактивної потужності починає спадати, після проміжку часу $t = 3,5$ споживання реактивної потужності не відбувається.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В роботі з використанням Matlab/Simulink проведено моделювання автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором та досліджено динамічні режими її роботи.

Результати дослідження свідчать про адекватність застосованої моделі, що дає можливість вивчення динамічних режимів роботи, які дозволяють оптимально налаштувати систему управління з метою підвищення енергоефективності як вітроелектричної установки, так і автономної системи в цілому.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на дослідження режимів роботи вітроелектричних установок у складі вітроелектричної станції.

Модель автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором, реалізована в середовищі Matlab/Simulink, дозволить досліджувати енергетичні характеристики установки за наявними технічними параметрами та може бути використана в освітньому процесі при підготовці фахівців за спеціальністю «Електрична інженерія», зокрема в лабораторному практикумі з дисциплін «Електричні машини і апарати» та «Основи вітроенергетики».

Література

1. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, О.В. Нойбергер, Д. Ципленков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с. ISBN: 978-966-350-526-8.
2. Васьковский Ю.М. Математичне моделювання електромеханічних перетворювачів енергії: Навч. посіб. – К.: НТУУ «КПІ», 2003. – 161 с. ISBN 5-06-003861-0.
3. Андропова О.В. Моделювання роботи фотоелектричних панелей з використанням середовища Matlab/Simulink / О.В. Андропова, В.В. Курак, Н.Л. Дон // Вісник ХНТУ. – 2021. – №3(78). – 9 с. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2021.3.1>
4. Пакети прикладних програм для моделювання електромагнітних полів електричних машин «Використання комп'ютерних систем математичних розрахунків MATLAB та FEMM для аналізу електричних машин» [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів, які навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньою програмою «Електричні машини і апарати» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад. Ю. М. Васьковський, Ю. А. Гайдено, С. С. Цивінський. - Електронні текстові дані (1 файл: 2,6 Мбайт). - Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. - 106 с. - Назва з екрана.
5. Simscape Block Libraries [Електронний ресурс] / MathWorks [Сайт]. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/ug/introducing-the-simscape-block-libraries.html> (дата звернення: 20.04.25). – Назва з екрану.

References

1. Osnovy vitroenerhetyky: pidruchnyk / H. Pivniak, F. Shkrabets, O.V. Noiberher, D. Tsyplenkov ; M-vo osvity i nauky Ukrainy, Nats. him. un-t. – D.: NHU, 2015. – 335 s. ISBN: 978-966-350-526-8.
2. Vaskovskiy Yu.M. Matematychnе modeliuвання elektromekhanichnykh peretvoriuvachiv enerhii: Navch. posib. – K.: NTUU «KPI», 2003. – 161 s. ISBN 5-06-003861-0.
3. Andronova O.V. Modeliuвання roboty fotoelektrychnykh panelei z vykorystanniam seredovyshcha Matlab/Simulink / O.V. Andronova, V.V. Kurak, N.L. Don // Visnyk KhNTU. – 2021. – №3(78). – 9 s. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2021.3.1>
4. Pakety prykladnykh prohram dlia modeliuвання elektromahnitnykh poliv elektrychnykh mashyn «Vykorystannia kompiuternykh system matematychnykh rozrakhunkiv MATLAB ta FEMM dlia analizu elektrychnykh mashyn» [Elektronnyi resurs] : navchalnyi posibnyk dlia studentiv, yaki navchaiutsia za spetsialnistiu 141 «Elektroenerhetyka, elektrotekhnika ta elektromekhanika», osvithnoiu prohramoiu «Elektrychni mashyny i aparaty» / KPI im. Ihoria Sikorskoho ; uklad. Yu. M. Vaskovskiy, Yu. A. Haidenko, S. S. Tsyvinskyi. - Elektronni tekstovi dani (1 fail: 2,6 Mбайт). - Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2022. - 106 s. - Nazva z ekrana.
5. Simscape Block Libraries [Elektronnyy resurs] / MathWorks [Sayt]. – Rezhym dostupu: <https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/ug/introducing-the-simscape-block-libraries.html> (data zvernennya: 20.04.25). – Nazva z ekranu.