

УДК 621.3
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2026.1\(503\).1.23](https://doi.org/10.15589/znp2026.1(503).1.23)

LABORATORY SETUP FOR STUDYING THE CHARACTERISTICS OF A WIND TURBINE INSTALLATION

ЛАБОРАТОРНА УСТАНОВКА ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВІТРОГЕНЕРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ

Georgii V. Babkin

georgii.babkin@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0001-6303-0993

Dmytro V. Kostenko

dmi.kostenko@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1164-3066

Vasyl M. Ovsianynikov

laboratoria221@gmail.com
ORCID: 0009-0006-5585-4953

Г. В. Бабкін,

канд. техн. наук, доцент

Д. В. Костенко,

канд. техн. наук, доцент

В. М. Овсянников,

канд. техн. наук, доцент

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. Currently, in many countries of the world, development concepts provide for a significant increase in the share of renewable energy sources in the energy balance. Alternative energy sources such as solar thermal and electrical systems, wind generators, energy systems for using the potential of biomass of various origins, biogas production from household waste landfills, geothermal installations, etc. are widely used.

The Ukrainian wind energy industry has sufficient experience in the production, design, construction, operation and maintenance of both wind power plants and wind power stations; the country has a sufficiently high scientific and technical potential and a developed production base. Recently, the development of the wind power sector has been facilitated by state support, which ensures the implementation of initiatives to improve legislation, management structures, and create favorable conditions for domestic and foreign investors.

To solve the problem, a review and analysis of existing methods of generating electric energy was carried out, a review of the most powerful existing power plants using renewable energy sources was carried out. An analysis of the solar energy potential of Ukraine was carried out.

Based on the results obtained, a justification and development of a laboratory facility for studying the characteristics of a wind power plant with a vertical axis of rotation was carried out for the preparation of master's students in the curriculum "Electricity Generation and Power Supply Systems", as well as conducting scientific experiments by graduate students and teachers of the Department of "Electrical Engineering of Ship and Robotic Complexes", the Educational and Scientific Institute of Automation and Electrical Engineering of the Admiral Makarov National Shipbuilding University. In the process of setting up a prototype of a laboratory installation, a number of experiments were conducted in order to clarify its operating characteristics, a list of training experiments was compiled and a methodology for their implementation was developed. The volt-ampere characteristics of the wind generator were recorded depending on the type of load, the dependence of the wind generator power on the wind speed was studied. A list of recommendations was compiled for the modernization of the laboratory installation and the main directions in the field of studying and developing power generating units with a vertical axis of rotation.

Purpose. Creation of a laboratory facility for the study of modern renewable energy sources.

Method. The following modern methods and processes of design and manufacturing, methods of mathematical modeling and mathematical methods of calculation and analysis were used in the research.

Results. A facility for laboratory research of wind power plants was created, using modern additive phototyping technologies.

Practical importance. In order to improve the quality of training of masters in the program "Electricity Generation and Power Supply Systems", as well as for conducting scientific experiments by postgraduate students, a laboratory complex was installed for the study of wind power plants.

Key words: renewable energy sources; laboratory facility; wind power plant; modeling; mathematical methods of calculation and analysis.

Анотація. У теперішній час в багатьох країнах світу концепції розвитку передбачають значне збільшення частки відновлюваних джерел енергії в енергетичному балансі. Широко використовуються такі альтернативні джерела енергії, як сонячні термічні та електричні системи, вітряні генератори, енергетичні системи для використання можливостей біомаси різного походження, вироблення біогазу зі звалищ побутових відходів, геотермальні установки та ін.

Вітроенергетика України має достатній досвід виробництва, проектування, будівництва, експлуатації та обслуговування як вітроенергетичних установок, так і вітроенергетичних станцій; в країні є достатньо високий науково-технічний потенціал і розвинена виробнича база. В останній час розвитку вітроенергетичного сектора сприяє державна підтримка, що забезпечує реалізацію ініціатив по удосконаленню законодавства, структури керування, створенню вигідних умов для внутрішніх і зовнішніх інвесторів

Для вирішення поставленої задачі було виконано огляд та аналіз існуючих способів генерації електричної енергії, виконано огляд найбільш потужних існуючих електростанцій, що використовують відновлювані джерела енергії. Проведено аналіз вітряного енергетичного потенціалу України.

На підставі отриманих результатів виконано обґрунтування та розробка лабораторної установки для вивчення характеристик вітряної електростанції з вертикальною віссю обертання для підготовки магістрів учнів за навчальною програмою «Системи генерування електроенергії та електропостачання», а також проведення наукових експериментів аспірантами та викладачами кафедри «Електричної інженерії суднових та роботизованих комплексів», навчально-наукового інституту автоматики та електротехніки Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

У процесі налагодження дослідного зразка лабораторної установки був проведений ряд експериментів, з метою уточнення її робочих характеристик, складено перелік навчальних експериментів та розроблено методику їх виконання. Знято вольт-амперні характеристики вітрогенератора в залежності від виду навантаження, вивчено залежність потужності вітрогенератора від швидкості вітру. Складено перелік рекомендацій щодо модернізації лабораторної установки та основних напрямів у галузі вивчення та розробки електрогенеруючих установок з вертикальною віссю обертання.

Мета. Створення лабораторної установки для дослідження сучасних відновлюваних джерел енергії.

Методика. При виконанні досліджень використовувались: сучасні методи та процеси проектування та виготовлення, методи математичного моделювання та математичні методи розрахунку та аналізу.

Результати. Створено установку для лабораторних досліджень вітряних енергетичних установок, з використанням сучасних адитивних технологій пототипування.

Практична значимість. З метою підвищення якості підготовки магістрів за програмою «Системи генерування електроенергії та електропостачання», а також для проведення наукових експериментів аспірантами було змонтовано лабораторний комплекс для дослідження вітроенергетичних установок.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії; лабораторна установка; вітряна електростанція; моделювання; математичні методи розрахунку та аналізу.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Багатство країни, стійкість її розвитку багато в чому визначається наявністю та якістю енергоресурсів. До первинних (які стоять на початку «енергетичного ланцюжка») відносять енергоресурси насамперед основні (традиційні): вугілля, нафту, газ, атомну та гідроенергію великих річок, а також нетрадиційні відновлювані енергоресурси. Шляхом перетворення (конвертації) первинних одержують вторинні прикладні енергоресурси (найчастіше це електроенергія) [1, 2].

Застосування традиційних «коричневих» енергоресурсів вже завдало природі значної шкоди, до того ж вони можуть закінчитися вже в цьому столітті.

Список відновлюваних енергоресурсів включає: сонячну, вітрову, геотермальну енергію; енергію морських та океанських течій, хвиль, припливів, температурного градієнта морської води, поточної та падаючої води річок та каналів, низькопотенційного тепла землі, повітря, води; енергію біомаси тваринного та

рослинного походження, торф, водень та жива тяглова худоба. Ці та інші невинні прояви животворних «природних» сил можуть з лишком покрити потреби людства в енергії, не порушуючи гармонії Природи, в цьому їхня привабливість [3, 4].

Зі сказаного відбувається перший і головний стимул до переходу на відновлювані енергоресурси бути готовими до закінчення «століття пари» (фактично він все ще триває «в особі» циклопічних ТЕС-основі сучасної «коричневої» енергетики-по всьому світу).

Другий стимул до переходу на «зелену» енергетику з використанням природних відновлюваних енергетичних ресурсів – запобігти екологічній катастрофі та зберегти природу для майбутніх поколінь.

Третій стимул розвитку «зеленої» енергетики – забезпечення енергією людей, які у регіонах, віддалених від існуючих систем енергопостачання. Поодинокі потужності енергетичних установок, що використовуються тут, становить від 1,0 до 30...50 кВт. Вони комплектуються акумуляторними батареями та

забезпечують роботу побутових енергоспоживачів: засобів зв'язку, телевізорів, електричного освітлення, холодильників тощо. Для створення місцевих енергетичних систем, які обслуговують селища, аули, великі ферми, використовуються комплексні енергетичні установки потужністю 50–250 кВт – вітрові, сонячні та дизельні агрегати.

Четвертий стимул розвитку відновлюваних енергоресурсів зниження рівня політичних інтриг та військових акцій за володіння традиційними енергетичними ресурсами – нафтою, природним газом, вугіллям. Водночас невичерпні енергетичні ресурси Вітру та Сонця не є об'єктом монопольного володіння та торгівлі: вони дано порівну всім і кожному.

Для задоволення зростаючих потреб у електроенергії населення, особливо що живе далеко від централізованих центрів енергопостачання, дедалі актуальнішим стає застосування відновлюваних джерел енергії. Крім того, технологічні процеси в нафтогазовій галузі є вельми енергоємними. Підприємства нафтогазової галузі, розташовані у тому числі у віддалених районах, легше забезпечити енергоресурсами, зокрема з використанням відновлюваних джерел енергії. Важливим питанням є організація надійного електропостачання в автономному режимі.

Також існуючі технології енергопостачання не завжди легко адаптовані для використання на малих та середніх підприємствах. Важливу роль цьому питанні можуть зіграти відновлювані джерела енергії. Отже, дослідження технологій автономної генерації електричної та теплової енергії, раціональне її споживання за рахунок використання енергозберігаючих технологій є вельми актуальними в даний час.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Створення лабораторної установки для дослідження сучасних відновлюваних джерел енергії.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ

ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Необхідно здійснити огляд сучасних електростанцій на відновлюваних джерелах енергії, досліджувати енергетичний потенціал вітру. Важливо провести експерименти на лабораторній установці. Визначити робочі параметри, зняти вольт-амперні характеристики та вибрати оптимальні режими роботи.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Україна має потужні ресурси вітрової енергії: річний технічний вітроенергетичний потенціал дорівнює 30 млрд. кВт·год.

В результаті обробки статистичних метеорологічних даних по швидкості та повторюваності швидкості вітру проведено районування території України по швидкостях вітру і визначено питомий енергетичний потенціал вітру на різній висоті відповідно до зон районування, табл. 1.

Приведені дані є базовими при впровадженні вітроенергетичного обладнання і призначені до

використання проектувальниками об'єктів вітроенергетики для встановлення оптимальної потужності вітроагрегатів та типу енергії (електрична або механічна) для ефективного її виробництва в конкретній місцевості.

В умовах України за допомогою вітроустановок можливим є використання 15–19% річного об'єму енергії вітру, що проходить крізь перетин поверхні вітроколеса. Очікувані обсяги виробництва електроенергії з 1 м² перетину площі вітроколеса в перспективних регіонах складають 800–1000 кВт·год/м² за рік.

Застосування вітроустановок для виробництва електроенергії в промислових масштабах найбільш ефективно в регіонах України, де середньорічна швидкість вітру більш 5 м/с: на Азово-Чорноморському узбережжі, в Одеській, Херсонській, Запорізькій, Донецькій, Луганській, Миколаївській областях, АР Крим та в районі Карпат.

Експлуатація тихохідних багатолопатевих вітроустановок з підвищеним обертаючим моментом для виконання механічної роботи (помолу зерна, підняття та перекачки води і т.п.) є ефективною практично на всій території України.

Вітроенергетика України має достатній досвід виробництва, проектування, будівництва, експлуатації та обслуговування як вітроенергетичних установок, так і вітроенергетичних станцій; в країні є достатньо високий науково-технічний потенціал і розвинена виробнича база. В останній час розвитку вітроенергетичного сектора сприяє державна підтримка, що забезпечує реалізацію ініціатив по удосконаленню законодавства, структури керування, створенню вигідних умов для внутрішніх і зовнішніх інвесторів.

Реалізація державних національних програм в галузі вітроенергетики передбачає загальне річне виробництво електроенергії на вітроелектростанціях та автономних вітроустановках близько 5,71 млн. МВт·год; що дозволить забезпечити біля 2,5 відсотків від загального річного електроспоживання в Україні.

Використання представлених в атласі даних по потенціалу вітрової енергії значно спрощуватиме і здешевлюватиме роботи по вибору та проектуванню вітроенергетичного обладнання та об'єктів вітроенергетики.

На рис. 1 приведені енергетичний потенціал вітру при впровадженні вітрового енергетичного обладнання і рекомендуються до використання в першу чергу проектувальниками об'єктів вітрової енергетики для вибору типу обладнання та для встановлення їх оптимальної потужності і терміну ефективної експлуатації обладнання в конкретній місцевості.

З метою підвищення якості підготовки бакалаврів та магістрів напрямків G3 «Електрична інженерія», а також для проведення наукових досліджень аспірантів

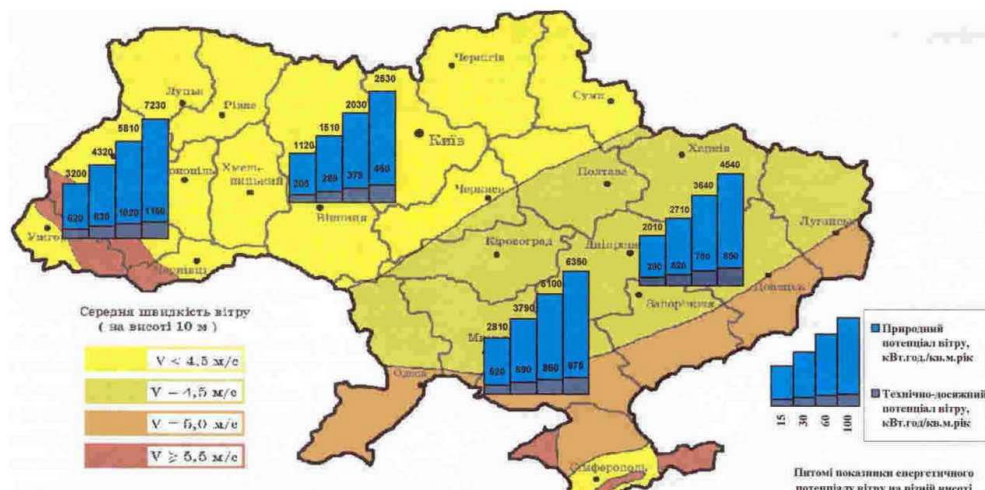


Рис. 1. Енергетичний потенціал вітру на території України

та викладачів було розроблено лабораторну установку для дослідження вітрових електростанцій. Структурну схему лабораторної установки показано на рис. 2.

Вона включає первинне джерело електроживлення (1), кероване джерело електроживлення (2), вентилятор (3), генератор постійного струму (навантажувальна машина) (4), встановлена на осі вітротурбіни, контролер заряду (5), акумулятор (6), інвертор напруги (7), контролер керування (8), кероване навантаження (9).

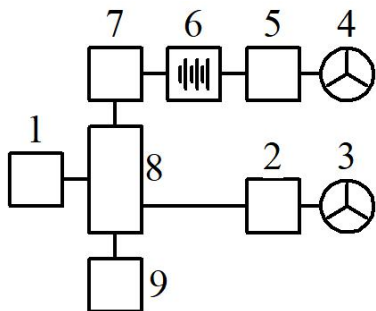


Рис. 2. Структурна схема лабораторної установки

Лабораторна установка призначена для використання у навчальному процесі на кафедрі електричної інженерії суднових та роботизованих комплексів ННІАЕ НУК ім. адм. Макарова під час підготовки магістрів за програмою «Системи генерування електроенергії та електропостачання», а також для проведення наукових експериментів аспірантами та викладачами кафедри.

Аеродинамічна труба належить до установок замкнутого типу та призначена для дослідження характеристик вітрових турбін у оберненому потоці. Принципова схема установки та її габаритні розміри показано на рис. 3.

Аеродинамічна труба монтується навколо кришки учбового столу. Труба в плані має форму еліпса з відношенням осей 1:2. Повітря в трубі рухається трилопатеvim гвинтом вентилятору 6 постійного струму з системою керування швидкістю обертання ротора лівого обертання діаметром 160 мм з наступними технічними характеристиками:

Напруга живлення, В	27±10%
Споживаний струм, А не більше	1

Таблиця 1. Питомий енергетичний потенціал вітрової енергії в Україні

	Середньорічна швидкість вітру, V_p , м/с	Висота, м	Природний потенціал вітру, кВт·год/м рік	Технічно-досяжний потенціал вітру, кВт·год/м рік
1	<4,25	15	1120	200
		30	1510	280
		60	2030	375
		100	2530	460
2	4,5	15	2010	390
		30	2710	520
		60	3640	700
		100	4540	850
3	5,0	15	2810	520
		30	3790	690
		60	5100	860
		100	6350	975
4	5,5	15	3200	620
		30	4320	830
		60	5810	1020
		100	7230	1150

Потужність, Вт 5,2
 Швидкість повітряного потоку, м/хв, не менше 2400–3300
 Продуктивність електроventилатора, м³/год 300
 Режим роботи тривалий
 Швидкість потоку в трубі залежить від її поперечного перерізу та кількості обертів гвинта. В даний час швидкість потоку в трубі регулюється від 2,1 до 6,6 м/с. Напруга на електромотор подається з керованого випрямляча струму 1 і змінюється в межах 10–32 вольт. Випрямляч струму живиться від мережі змінного струму напругою 220 вольт.

Трилопатевий гвинт знаходиться в каналі круглого перерізу. Далі з перехідника повітря потрапляє в конфузور 2, кут звуження якого обраний з умови запобігання відриву потоку від стінок. Далі потік за допомогою двох поворотних колін потрапляє в сопло 3. Для вирівнювання потоку на вході в сопло є хонейком. Сопло зроблено з п'ятикратним підтисканням потоку, профілі стінок сопла розраховані за формулою Вітошинського [5].

Робоча частина труби 4 – кругла ділянка з внутрішнім діаметром 103 мм. Робоча частина з внутрішньої

поверхні по всій своїй протяжності немає виступаючих частин. Для зниження вартості лабораторної установки у якості робочої частини труби обрано стандартну каналізаційну трубу діаметром 110 мм.

Після сопла 3 розташовано дослідницьку камеру 5 для досліджуваних моделей ($\varnothing$ 200×200). Під час роботи установки камера закривають кришкою. В кришці є прозоре вікно для контролювання швидкості обертів досліджуваної моделі.

У верхньої частині сопла, безпосередньо перед камерою є прямокутний колодазь для завантаження чутливого елемента контрольного анемометру для контролю швидкості повітря на вході камери.

Зовнішній вигляд аеродинамічної труби показано на рис. 4.

Випробувальна камера 5 призначена для дослідження характеристик вертротурбін 7 з вертикальною віссю обертання, таких як ротор Савоніуса, ротор Дар'ї, ротор Болотова та безлопатеві генератори, розроблені компанією Vortex Bladeless з Іспанії (рис. 5). Навантаження моделі турбіни є генератор на основі безконтактної машини постійного струму 8.

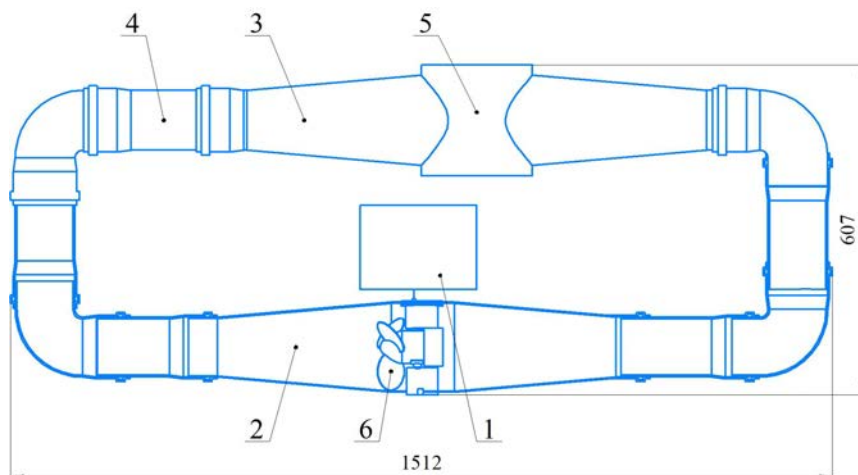


Рис. 3. Принципова схема експериментальної установки

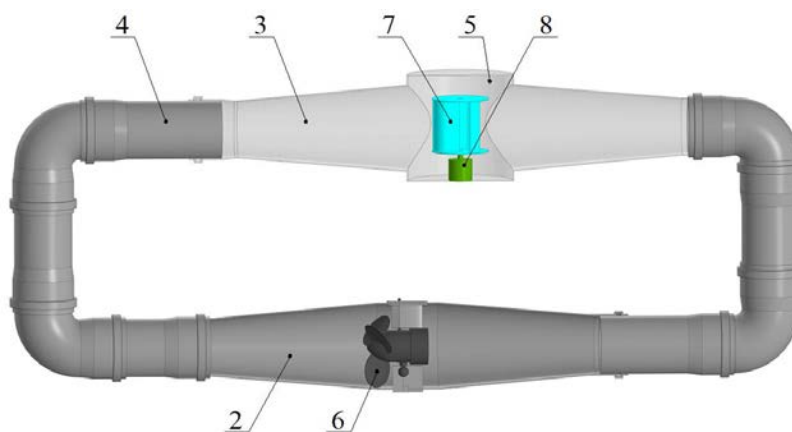


Рис. 4. Зовнішній вигляд аеродинамічної труби

Вітрогенератори з вертикальною віссю обертання набувають все більшого поширення завдяки своїй універсальності, компактності та можливості ефективно працювати навіть при низьких швидкостях вітру. Розвиток технологій, зокрема безлопатевих турбін, дає нові можливості для використання вітрової енергії, забезпечуючи економію на витратах та зниження викидів вуглецю. Впровадження таких рішень стає важливим кроком до створення стійких та екологічно чистих джерел енергії.

Управління потоком повітря здійснюється дистанційно, з контролеру управління.

Всі нестандартні елементи лабораторної роботи виконані з використанням технології 3D-друку, що забезпечує високу ремонтпридатність обладнання, забезпечує високий модернізаційний потенціал та забезпечує високу повторюваність конструкції.

Усі режими роботи установки реалізуються програмним шляхом. Контролери управління пов'язані з ПЕОМ, у якій автоматичному режимі ведеться протоколювання виконуваних досліджень.

Установка дозволяє проводити такі експерименти:

- вивчення залежності потужності вітрогенератора від швидкості вітру;
- дослідження вольт-амперної характеристики вітрогенератора в залежності від виду навантаження;
- дослідження вітроенергетичного потенціалу.

Потужність вітрогенератора залежить від швидкості вітру [6].

Кращі горизонтальні вітроустановки можуть уловлювати до 47% енергії вітру, а барельні вітряки – до 25%.

Звичайний середній ККД горизонтального вітрогенератора становить 0,4 і він непостійний, оскільки

лопаті мають фіксовані аеродинамічні форми, які можуть працювати з максимальною ефективністю лише за певної швидкості вітру. Те саме вірно і для вертикальних роторів, так як їх лопаті також мають фіксований розмір [7].

Потужність вітрогенератора визначає швидкість вітрового потоку. Розмір гвинта визначає площа вітрового потоку, в якій може бути взята енергія [8].

У міру збільшення швидкості вітру вітрове колесо починає сильніше обертатися, тому генератор виробляє більше енергії для зарядки акумуляторів і забезпечення корисного навантаження. У цьому випадку блок керування видає сигнал і поступово збільшує споживану нагрівальними елементами потужність, що дозволяє повністю використовувати енергію вітру. Якщо потік вітру зменшується, швидкість вітроколеса також зменшується, і блок управління знову посилає сигнал, який знижує споживання енергії нагрівальними елементами до зупинки. Це означає, що блок управління може підтримувати швидкість вітроколеса та навантаження генератора для заданої швидкості вітру.

При високих швидкостях вітру великий ризик виходу з ладу редуктора і генератора, тому потрібна система автоматичного гальмування.

У прибережних районах середньорічна швидкість вітру становить 8 м/с. Середній показник для Данії – світового лідера у галузі електроенергетики – становить 5 м/с [9].

Під час роботи вітрогенератора виробляється струм, оскільки його напруга залежить від швидкості вітру, він нестабільний. Саме тому одним із основних елементів комплектації альтернативної електроустановки є контролер заряду акумуляторів.



а)



б)



в)



г)



д)

а) – ротор Савоніуса; б) – ротор Дар'ї; в) – ротор Болотова; г) ротор Горлова;
д) – багатолопатеве з направляючим апаратом

Рис. 5. Види вітротурбін

Щоб розрахувати, як швидко повинен заряджатися акумулятор при добовому споживанні

$$E_{\text{сут}} = 26,25 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (1)$$

потрібно знайти середнє щогодинне споживання:

$$E_{\text{ч}} = \frac{E_{\text{сут}}}{24} \quad (2)$$

$$E_{\text{ч}} = \frac{26,25}{24} = 1,09 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (3)$$

У цьому випадку швидкість заряду акумулятора повинна становити 1,09 кВт/год. У будні вдень енергоспоживання буде мінімальним, так само, як і в нічний час. Відповідно, основне споживання відбуватиметься вранці та ввечері.

Кінетична енергія повітря, що рухається ламінарно (без завихрень), визначається за формулою [10]:

$$W = \frac{m \cdot V^2}{2}, \text{ Дж} \quad (4)$$

де m – Маса повітря, кг;

V – швидкість повітря, м/с.

Масу повітря можна виразити такою формулою:

$$m = V \cdot t \cdot S \cdot \rho, \text{ кг} \quad (5)$$

де S – площа, що описується гвинтом вітрогенератора;
 ρ – щільність повітря.

Потужність P визначається за такою формулою:

$$P = \frac{V^3 \cdot S \cdot \rho}{2}, \text{ Вт} \quad (6)$$

Коли помножимо вираз коефіцієнт перетворення енергії вітру (ζ), можна отримати реальну потужність вітрогенератора [11]:

$$P = \frac{V^3 \cdot S \cdot \rho \cdot \zeta}{2}, \text{ Вт} \quad (7)$$

Потужність вітродвигуна пропорційна третьому ступеню швидкості вітру [12].

У ході лабораторних досліджень при плавному збільшенні частоти обертання вентилятора з певним кроком вимірюються значення потужності.

Наступний досвід: дослідження вольт-амперної характеристики вітрогенератора, залежно від виду навантаження.

Вольтамперна характеристика вітрогенератора залежить від виду навантаження. При активному навантаженні ($\cos \varphi = 1,0$) напруга на генераторі падає при зміні навантаження від холостого ходу до номінальної в діапазоні від 10 до 20% напруги холостого ходу генератора. Коли навантаження генератора змінюється від холостого ходу до номінального навантаження, напруга падає на 20-30% напруги холостого ходу. При активному ємнісному навантаженні ($\cos \varphi = 0,8$) напруга на генераторі дещо збільшується за рахунок дії, що намагнічує, реакції якоря.

ВИСНОВКИ

1. В даний час у всьому світі спостерігається перехід енергетики до використання відновлюваних джерел, таких як енергія сонця, вітру, припливів та відливів, морських хвиль та інших. Так, потужності найбільших вітрових електростанцій досягають 8 ГВт.

2. У зв'язку з цим провідні ЗВО розпочали підготовку бакалаврів та магістрів за програмами, пов'язаними з проектуванням, монтажем, експлуатацією та обслуговуванням вітрових та сонячних електростанцій. Так, у НУК розпочато підготовку магістрів за програмою «Системи генерування електроенергії та електропостачання».

3. З метою підвищення якості підготовки магістрів за програмою «Системи генерування електроенергії та електропостачання», а також для проведення наукових експериментів аспірантами було змонтовано лабораторний комплекс для дослідження вітрових енергетичних установок.

4. У математичному пакеті Matlab Simulink було згенеровано комп'ютерні моделі всіх основних елементів лабораторного комплексу: вітрогенератору, акумуляторних батарей.

REFERENCES

- [1] Kudria, S. O. (Ed.). (2020). *Vidnovliuvani dzherela enerhii* [Renewable energy sources]. Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NANU.
- [2] Medykovskyi, M. O. (2001). *Ponovliuvani dzherela enerhii* [Renewable energy sources]. NU "Lvivska politehnika".
- [3] Danylyshyn, B. M., Dorohuntsov, S. I., & Mishchenko, V. S. (1999). *Pryrodnorekursnyi potentsial staloho rozvytku Ukrainy: navch. posibnyk* [Natural resource potential of sustainable development of Ukraine: study guide]. RVPS Ukraine.
- [4] Cabinet of Ministers of Ukraine. (2013). *Enerhetychna stratehiia Ukrainy na period do 2030 r.* [Energy strategy of Ukraine for the period until 2030] (Order No. 1071, July 24). Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine. <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358>
- [5] Babak, V. P., Babak, S. V., Berehun, V. S. et al. (2015). *Informatsiine zabezpechennia monitorynhu ob'ektiv teploenerhetyky: Monohrafiia* [Information support for monitoring of thermal power facilities: Monograph] (V. P. Babak, Ed.). K.
- [6] Rajabi M.M., Chen M., Bozorgpour A., Izady A. (2021) Stochastic Techno-economic Analysis of CO₂-Circulated Geothermal Energy Production in a Closed Reservoir System // *Geothermics*. Vol. 96. P. 102202.
- [7] Pan J. (2022) Improve Efficiency of Harvesting Wind Energy by Integrating bi-Stability and Swinging Balls // *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 170. P. 108816.
- [8] Shahzad U., Schneider N., Jebli M. (2021) How Coal and Geothermal Energies Interact with Industrial Development and Carbon Emissions? An Autoregressive Distributed Lags Approach to the Philippines // *Resources Policy*. Vol. 74. P. 102342.
- [9] Yu J., Tang Y.M., Chau K.Y., Nazar R. (2022) Role of Solar-Based Renewable Energy in Mitigating CO₂ Emissions: Evidence from Quantile-On-Quantile Estimation // *Renewable Energy*. Vol. 182. P. 216-226.

- [10] Zhang Y., Wang W., Wang Z., Gao M. (2021) Green Building Design Based on Solar Energy Utilization: Take a Kindergarten Competition Design as an Example // *Energy Reports*. Vol. 7. P. 1297-1307.
- [11] Solman H., Kirkegaard J.K., Smits M., Wliet B.J.M.V. (2022) Digital Twinning as an Act of Governance in the Wind Energy Sector // *Environmental Science & Policy*. Vol. 127. P. 272-279.
- [12] Shetty C., Priyam A. A (2021) Review on Tidal Energy Technologies // *Materials Today: Proceedings*.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Відновлювані джерела енергії (2020) / За заг. ред. С.О. Кудрі. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ. 392 с.
- [2] Медиковський М. О. (2001) Поновлювальні джерела енергії. НУ „Львівська політехніка”.
- [3] Данилишин Б. М., Дорогунцов С.І., Міщенко В.С. (1999) Природноресурсний потенціал сталого розвитку України: навч. посібник. Київ: РВПС України. 716 с.
- [4] Енергетична стратегія України на період до 2030 р. Схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 1071. Офіційний сайт Міністерства енергетики та вугільної промисловості України. 156с. URL: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list? currDir=50358>
- [5] Інформаційне забезпечення моніторингу об’єктів теплоенергетики: Монографія (2015)/ В.П. Бабак, С.В. Бабак, В.С. Берегун та ін.; за ред. чл.- кор. НАН України В.П. Бабака / К. 512 с.
- [6] Rajabi M.M., Chen M., Bozorgpour A., Izady A. (2021) Stochastic Techno-economic Analysis of CO2-Circulated Geothermal Energy Production in a Closed Reservoir System // *Geothermics*. Vol. 96. P. 102202.
- [7] Pan J. (2022) Improve Efficiency of Harvesting Wind Energy by Integrating bi-Stability and Swinging Balls // *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 170. P. 108816.
- [8] Shahzad U., Schneider N., Jebli M. (2021) How Coal and Geothermal Energies Interact with Industrial Development and Carbon Emissions? An Autoregressive Distributed Lags Approach to the Philippines // *Resources Policy*. Vol. 74. P. 102342.
- [9] Yu J., Tang Y.M., Chau K.Y., Nazar R. (2022) Role of Solar-Based Renewable Energy in Mitigating CO2 Emissions: Evidence from Quantile-On-Quantile Estimation // *Renewable Energy*. Vol. 182. P. 216-226.
- [10] Zhang Y., Wang W., Wang Z., Gao M. (2021) Green Building Design Based on Solar Energy Utilization: Take a Kindergarten Competition Design as an Example // *Energy Reports*. Vol. 7. P. 1297-1307.
- [11] Solman H., Kirkegaard J.K., Smits M., Wliet B.J.M.V. (2022) Digital Twinning as an Act of Governance in the Wind Energy Sector. *Environmental Science & Policy*. Vol. 127. P. 272-279.
- [12] Shetty C., Priyam A. A (2021) Review on Tidal Energy Technologies. *Materials Today: Proceedings*.

© Бабкін Г. В., Костенко Д. В., Овсянников В. М.

Дата першого надходження статті до видання: 23.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

