

# ВИМІРЮВАННЯ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

## КОМП'ЮТЕРНИЙ МОНІТОРИНГ ВІТРОПОТЕНЦІАЛУ: КОНЦЕПТУАЛЬНИЙ ПІДХІД, СИСТЕМА ВІДБОРУ ПАРАМЕТРІВ ВІТРОВОГО ПОТОКУ

## COMPUTER MONITORING OF WIND POTENTIAL: CONCEPTUAL APPROACH, SELECTION SYSTEM OF WIND FLOW PARAMETERS

*Дудикевич В. Б., д-р техн. наук, проф., Микитин Г. В., д-р техн. наук, проф.,  
Опірський І. Р., д-р техн. наук, доц.*

*Національний університет «Львівська політехніка», Україна; e-mail: vdudykev@gmail.com*

*Пашук О. В.*

*Медцентр Святої Параскеви, Україна; e-mail: ostap.pashuk@medcenter.lviv.ua*

*Valeriy Dudykevych, Dr.Sc., Prof., H. Mykytyn, Dr.Sc., Prof., I. Oprisky, Dr.Sc., As.-Prof.*

*Lviv Polytechnic National University, Ukraine*

*O. Pashuk*

*Medical Center of Saint Paraskeva, Lviv, Ukraine; e-mail: ostap.pashuk@medcenter.lviv.ua*

<https://doi.org/>

**Анотація.** Висвітлено системне бачення контролю параметрів вітрового потоку, яке на основі концептуального підходу до створення комп'ютерного моніторингу параметрів вітру та системи реєстрації даних дає змогу відображати отримані результати в режимі реального часу, що забезпечує достовірність інформації та прискорює прийняття рішень щодо розгортання вітроенергетичних станцій (ВЕС) та вибору типу вітротурбінних генераторів (ВТГ). Створено концептуальний підхід до створення комп'ютерного моніторингу параметрів вітрового потоку на основі інформаційної програми моніторингу сили вітру та методології оцінювання зареєстрованого вітропотенціалу.

Розроблено комп'ютерну систему реєстрації вітрового потоку, що забезпечує можливість здійснювати відбір, обробку та передавання даних про параметри вітру та оцінювати вітропотенціал і приймати управлінські рішення щодо встановлення ВЕС та вибору типу ВТГ.

**Ключові слова:** вітроенергетичні станції, вітротурбінні генератори, комп'ютерний моніторинг, параметри вітрового потоку, система реєстрації параметрів вітру, прогнозування вітропотенціалу.

**Abstract.** Conceptual approach to study of wind flow parameters computer monitoring has been created on the basis of the appropriate information program and the methodology for assessing the wind power. Structure of the monitoring program covers: the purpose and tasks of monitoring the parameters of the wind flow, e.g. the speed and direction of the wind for the certain period in accordance with the chosen site for the establishment of meteoropost in obedience to the optimal criteria of wind energy efficiency.

The methodology includes: a method for registering a wind stream, based on the choice of the method of automated registration and the creation of a computer control system for wind flow at the site of the region. The method of data registration is the location of the sensor-anemometer and weathervane at a height of 27 meters, which is due to the location of the bottom of the wheel turbine generator at a given height and the transfer of the data to the server. Experimental data from meteoroposts are processed, recorded for further visualization in the form of graphs of velocity and wind direction and the construction of the winds of rocks, which is a criterion for determining the optimal location of generators. According to the determined wind power potential, the choice of type of wind turbine generators is substantiated.

The developed computer monitoring system of wind streams is designed for accurate analysis of the wind power of the area and detailed testing of available mathematical models of wind turbine generators. The visualization spectra of the change in wind velocity and the changes in the direction of the wind flow give an integral representation of the wind power in the area and serve as the source vector for forecasting the generation of electricity from wind power. The computerized system for selecting the parameters of the wind in the proposed area with great precision and resolution in time is the basis for accurately predicting the practical feasibility of installing wind power stations in the regions of Ukraine.

**Key words:** wind power stations, wind turbine generators, monitoring, flow parameters, registration system, wind power forecasting.

### Вступ

Одним з провідних напрямів співпраці України та ЄС є розвиток відновлюваної енергетики, що забезпечує зменшення викидів парникових газів

та формує сегменти охорони навколишнього середовища. Серед генеральних цілей Енергетичної стратегії – забезпечення енергетичної безпеки держави; зменшення техногенного навантаження на

довкілля та забезпечення цивільного захисту в сфері техногенної безпеки промислово-енергетичного комплексу [1].

Вітроенергетика – сьогодні провідний сегмент серед альтернативних джерел енергії, що зумовлює два вектори розвитку екологічної та економічної інфраструктур України. Перевагами вітроенергетики є: для довкілля – екологічно чистий енергоресурс та збільшення тривалості життя людей; для економіки – вироблення електроенергії вітроенергетичними станціями є дешевшим, що зумовлює конкуренцію для атомних і теплових електростанцій. Стратегічно ці переваги спрямовані на зниження рівня викидів парникових та інших шкідливих газів, що протидіє зміні клімату на планеті [2]. У вітроенергетичному секторі сьогодні працюють понад 70 країн світу, серед них з найбільшими потужностями вітроенергетики – Німеччина, США, Іспанія, Індія, Китай, Данія. В США до 2020 р. планують досягти 15 % виробництва електроенергії за рахунок вітру, вдосконалюються турбіни, розширюється діапазон швидкостей вітру, які можуть використовувати вітроенергетичні установки. Євросоюз зацікавлений в ефективному розвитку вітроенергетики, зокрема через зобов'язання перед світовою спільнотою знизити викиди парникових газів. Конференція з клімату (Франція, 2015), яка проходила в межах Конвенції ООН (COP 21) та Кіотського протоколу (CRP 11), у цьому напрямі підписала міжнародну угоду з підтримання збільшення середньої температури планети на рівні нижче від 2 градусів. Одним із механізмів досягнення цієї мети в Україні є впровадження альтернативних джерел енергетики, що сягатиме у 2020 р. 19 %, а в 2030 р. – 34 %. Інститут відновлюваної енергетики НАН України склав карту вітроенергетичного потенціалу. Найпривабливішими для використання енергії вітру регіонами є узбережжя Чорного та Азовського морів, гірські райони тимчасово окупованої АР Крим, територія Карпатських гір, Одеська, Херсонська та Миколаївська області. Українська вітроенергетична асоціація презентує перспективні проекти вітроенергетики, серед яких сегмент потужності енергії вітру в Україні уже в 2017 р. перевищує 500 МВт.

З метою проектування вітроенергетичних станцій, обґрунтування вибору вітротурбінних генераторів та прийняття рішення про їх встановлення на відповідних територіях України актуальним є комп'ютерний моніторинг вітрових характеристик. Розглянемо деякі аспекти попереднього досвіду розроблення технологій вітроенергетики. З метою оцінювання перспективи впровадження ВЕС та виділення ділянок місцевості з ефективним вітропотенціалом у роботі [3] здійснено моделювання

вітрового потенціалу за допомогою ГІС-технологій. У роботі [4] розкрито особливості моделювання потужності вітрових електростанцій з урахуванням поведінки вітру у місцях розташування ВЕС. Стандарт [5] регламентує процедуру вимірювання параметрів вітрового потоку. Зареєстровано патент на систему відбору електричної енергії з відновлювальних джерел з метою оцінювання вітропотенціалу [6]. Узагальнення світового та вітчизняного досвіду щодо підходів до оцінки та аналізу вітрових характеристик розглянуто в роботі [7], зокрема, подано результати розрахунку середньої приведеної швидкості вітру на висотах 10 і 100 м та потужність вітрового потоку на висоті 100 м.

У контексті імплементації угоди про асоціацію між Україною і Європейським Союзом державна політика у сфері енергоефективності та відновлюваної енергетики спрямована на виконання завдань у просторі Енергетичної стратегії України на період до 2030 р. Відповідно виникає запит на системне бачення проблеми точного відбору даних про вітропотенціал місцевості й, на цій основі, прийняття рішення про будівництво ВЕС і вибір ВТГ або вдосконалення програми комп'ютерного моніторингу вітрових потоків. Актуальним інструментарієм технічної реалізації моніторингу вітрових характеристик є апаратно-програмне забезпечення точної реєстрації параметрів вітрового потоку.

**Мета роботи** – створити концептуальний підхід до комп'ютерного моніторингу вітропотенціалу; розробити апаратно-програмний комплекс моніторингу вітрових потоків, що є комплексним підґрунтям для прогнозування доцільності встановлення вітроенергетичних станцій на певній місцевості та встановлення критеріїв вибору типу ВТГ і їх правильного розташування та слугуватиме системним доповненням до уже відомих підходів до створення і впровадження технологій вітроенергетики в Україні.

### **1. Концептуальний підхід до створення комп'ютерного моніторингу вітропотенціалу для впровадження технологій вітроенергетики**

Концептуальний підхід до створення комп'ютерного моніторингу вітропотенціалу, оцінювання даних і, на цій основі, прийняття рішення про вибір моделі ВТГ і впровадження систем вітроенергетики в регіонах України, подано на рис. 1. Структура підходу є дворівневою. Перший рівень – програма інформаційного моніторингу вітрового потоку. Другий рівень – методика визначення вітропотенціалу регіону та прийняття рішення про впровадження вітроенергетичних станцій.

Модель інформаційної програми моніторингу параметрів вітрового потоку є пріоритетною у дослідженні вітропотенціалу з метою визначення сили вітру і, на цій основі, прийняття рішення про встановлення вітроенергетичних станцій у регіонах України на основі ВТГ. Модель програми моніторингу охоплює: мету і завдання моніторингу параметрів вітрового потоку – швидкості й напрямку вітру за відповідний період відповідно до вибраного за оптимальними критеріями ефективності вітроенергетики майданчика для встановлення метеопоста.

Методологія оцінювання вітропотенціалу регіону для вибору моделі ВТГ підпорядкована інформаційній програмі моніторингу параметрів вітрового потоку. Структура методології має управлінський зв'язок у тому випадку, коли програма є неповноінформативною для оцінювання вітропотенціалу і прийняття рішення щодо вибору ВТГ та будівництва вітроенергетичних станцій в регіонах України.

Методологія охоплює: методику реєстрації вітрового потоку, яка ґрунтується на виборі методу автоматизованої реєстрації та створення комп'ютерної системи контролю вітрового потоку на майданчику регіону. Метод реєстрації параметрів вітру, збереження даних є підґрунтям процедури, алгоритму та моделі реєстрації інформації про вітропотенціал на вибраному майданчику регіону. Створення комп'ютерної системи контролю параметрів вітру є фундаментом для оцінювання вітропотенціалу регіону, прогнозування виробітку вітрової енергії та надання висновку щодо будівництва вітроенергетичних станцій в регіонах України. Модель об'єкта покладено в основу створення методики реєстрації параметрів вітру засобами комп'ютерної системи відбору даних згідно з процедурою реєстрації в інформаційній програмі моніторингу.

Методологія охоплює питання: які, як і чим реєструвати параметри вітрового потоку? Тобто повинні бути чітко визначені вимірювані фізичні величини, діапазон їх числових значень, фізичний метод і засіб, якими реєструють, та методика реєстрації вибраних параметрів. Зареєстровані комп'ютерною системою числові значення параметрів вітрового потоку порівнюють із допустимим встановленим ефективним рівнем функціонування вітроенергетичної станції в регіоні і, на цій основі, оцінюють фактичне значення вітропотенціалу на вибраному майданчику. Процедура реєстрації числових значень параметрів вітрового потоку передбачає врахування похибки реєстрації, яка безпосередньо є характеристикою результату реєстрації. Похибка

реєстрації може бути спричинена неадекватністю вибору методу реєстрації, в якому закладений той чи інший фізичний ефект (явище), недосконалістю стандартизованого (нестандартизованого) апаратно-програмного забезпечення комп'ютерної системи відбору даних, впливом зовнішніх факторів (коливань температури, тиску, електромагнітних завад тощо).

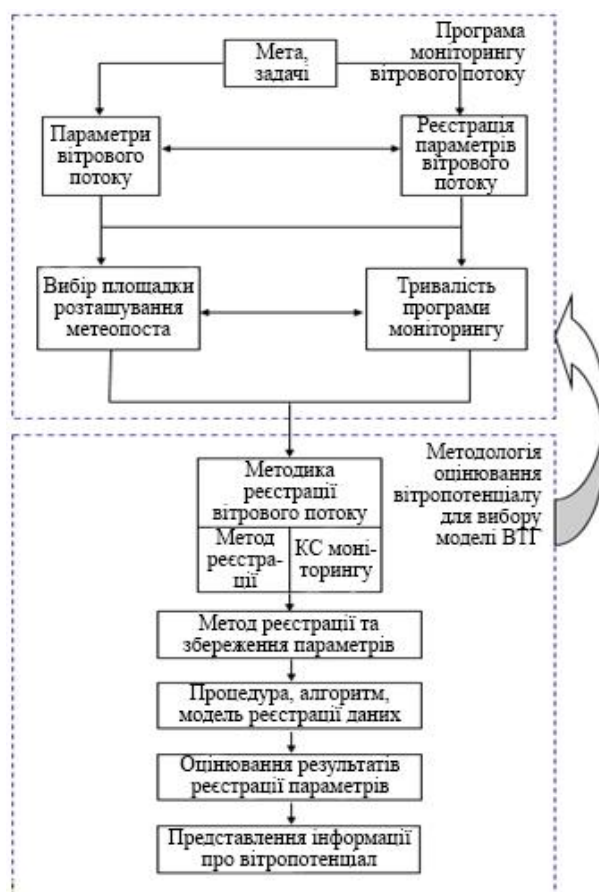


Рис. 1. Концептуальний підхід до комп'ютерного моніторингу вітропотенціалу регіону

Figure 1. Conceptual approach to computer monitoring of the wind power of the region

Малі значення похибок (абсолютної, відносної, приведеної, випадкової, систематичної, адитивної, мультиплікативної) та їхніх статистичних характеристик (середньоквадратичного відхилення, математичного сподівання, дисперсії) є ознакою високої точності вимірювань параметрів вітрового потоку.

Точність у методології реєстрації параметрів вітру та оцінювання вітропотенціалу залежить від коректності інформаційної програми моніторингу вітрового потоку. У випадку, якщо результати комп'ютерної реєстрації параметрів вітру не сприяють оцінюванню енергії вітропотенціалу для встановлення ВЕС, у структурі комп'ютерного

моніторингу передбачено управління інформаційною програмою моніторингу.

## 2. Комп'ютерна система реєстрації параметрів вітрового потоку

**Структура комп'ютерної системи реєстрації параметрів вітру.** Система автоматизованої реєстрації параметрів вітрового потоку та передавання даних на сервер (метеопост) складається з: анемометра та флюгера Давіс (Davis Instruments Corp. США) [8], блока управління та передавання даних, сенсорів температури та сенсорів системи охорони, блока живлення і резервної батареї (рис. 2).

Наявність резервної батареї дає змогу вчасно відреагувати на будь-який збій у системі живлення, оскільки мікроконтролер постійно проводить моніторинг цих параметрів. Блок управління реалізований на RISK-мікропроцесорі AtMEGA16U та мо-

дулі передавання даних за GPRS-технологією (SIM900). Передавання даних на сервер здійснюється за методом GET HTTP. Живлення комп'ютерної системи автономне. Обладнання монтується на вишку телескопічного типу.

**Алгоритм реєстрації параметрів вітрового потоку.** За алгоритмом (рис. 3) мікропрограма реєструє та записує дані, отримувані щосекунди із датчиків, у регістри пам'яті. Через 60 секунд відбувається розрахунок мінімальної, максимальної та середньої швидкості вітру [9]. Отримані результати надсилаються на сервер за допомогою GSM-модуля та встановленим каналом зв'язку GPRS. У випадку порушення цілісності функціонування комп'ютерної системи надсилається код тривоги на серверну частину програмного забезпечення (ПЗ), відповідно після цього інформують відповідні підрозділи безпеки для подальшого реагування.

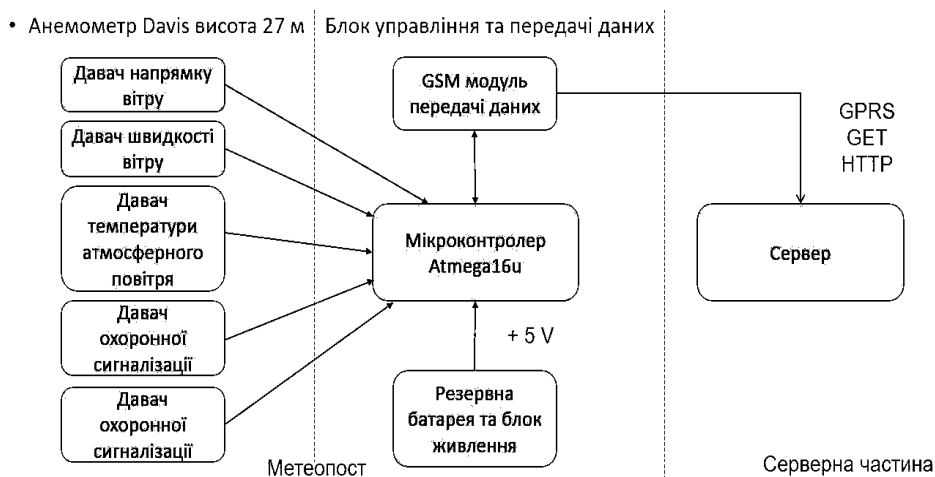


Рис. 2. Структурна схема комп'ютерної системи реєстрації параметрів вітрового потоку

Figure 2. The block diagram of the computer system for recording the parameters of the wind stream

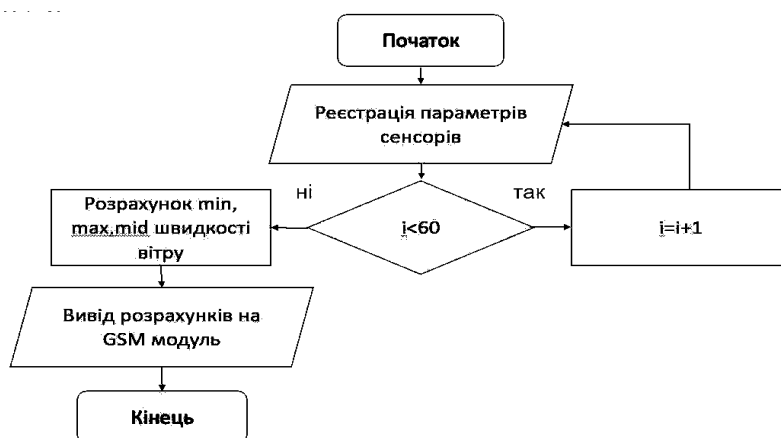


Рис. 3. Алгоритм реалізації процедури реєстрації параметрів вітрового потоку

Figure 3. Algorithm for implementation of the procedure for registration of parameters of the wind stream

Метод реєстрації даних полягає у розташуванні сенсора-анемометра та флюгера на висоті 27 метрів, що зумовлено розташуванням нижньої точки колеса вітротурбіни генератора на цій висоті та передаванні отриманих даних на сервер. Серверну частину комп'ютерної системи моніторингу реалізовано з використанням відкритого ПЗ (Open-source software) ОС UNIX, бази даних MySQL, HTTP-сервер Apache, мов програмування PHP, Perl та апаратного забезпечення HP ProLiant ML110 G7.

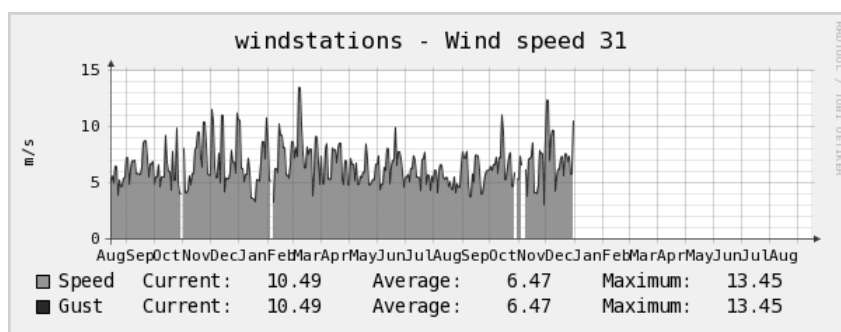
### Експериментальні дослідження

Дані з метеопостів обробляються та записуються в вигляді таблиці для подальшої візуалізації у вигляді графіків швидкості та напрямку вітру (рис. 4, 5) та побудови рози вітрів (рис. 6) для визначення оптимального розташування ВТГ. Розроблений програмний модуль спряжений з ПЗ WindPRO (EMD International A/S, Данія) дає змогу отримані дані надіслати аналізувати та надсилати WindPRO Online Data для побудови глобальної та регіональної карти вітрів [10].

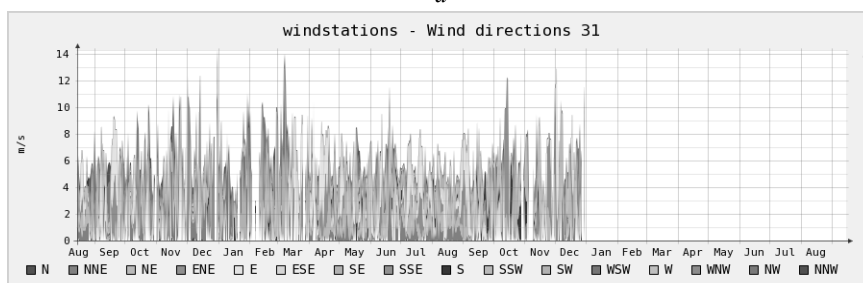
#### Експериментальні дані з метеопоста

ID	DATA	TIME	WIND	MID	LWIND	DIR	TEMP	TEMP2	alarm
86818	2017-10-16	00:00:45	2.27	2.14	1.95	NNE	2.44	-1.06	0
86819	2017-10-16	00:01:47	2.27	2.1	2.06	NNE	2.44	-1.06	0
86820	2017-10-16	00:02:50	2.27	2.12	1.84	N	2.5	-1	0
86821	2017-10-16	00:03:52	2.49	2.32	2.27	NNE	2.44	-1	0
86822	2017-10-16	00:04:54	2.49	2.34	2.27	NNE	2.44	-0.94	0
86823	2017-10-16	00:05:56	2.06	1.88	1.5	NNE	2.44	-1	0
86824	2017-10-16	00:06:58	2.16	1.7	1.39	NNE	2.44	-1.12	0

Позначення у таблиці: ID – ідентифікаційний номер запису, DATA – дата запису; TIME – час запису; WIND – максимальна швидкість вітру упродовж хвилини, м/с; MID – середня швидкість вітру упродовж хвилини, м/с; LWIND – мінімальна швидкість вітру упродовж хвилини, м/с; DIR – напрямок вітру, TEMP – температура в контейнері блока керування (C), TEMP2 – зовнішня температура (C), alarm – стан сигналізації на метеопості.



a

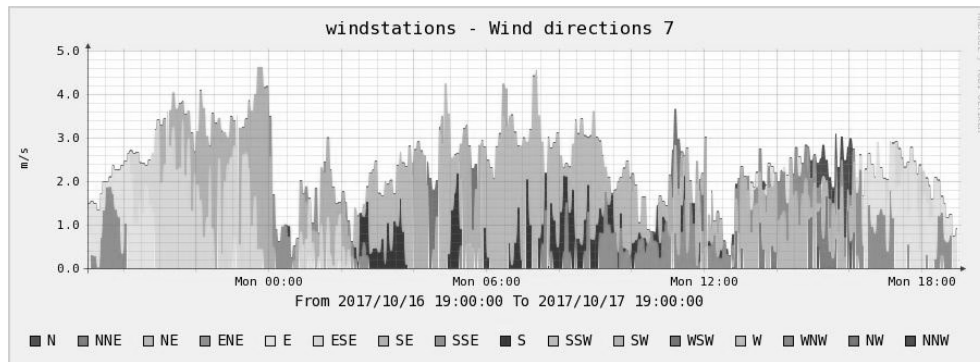


b

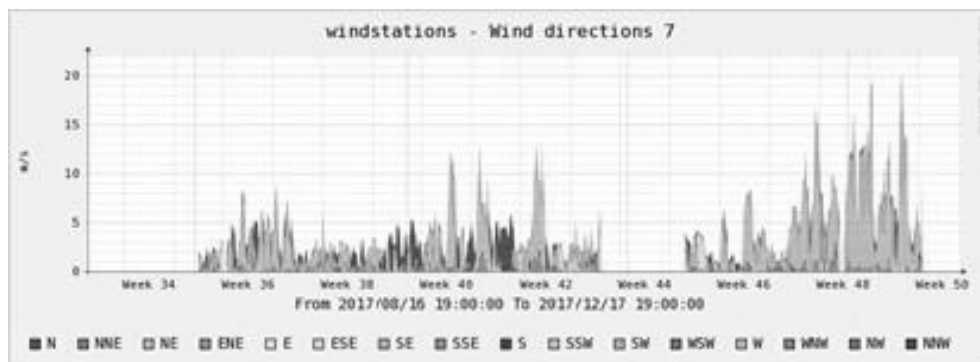
Рис. 4. Приклад візуалізації зміни швидкості вітру (a) та спектри зміни напрямку вітрового потоку (б) за допомогою програми cacti

Figure 4. An example of visualizing the change in wind speed (a) and wind direction change pattern (b) using the cacti program

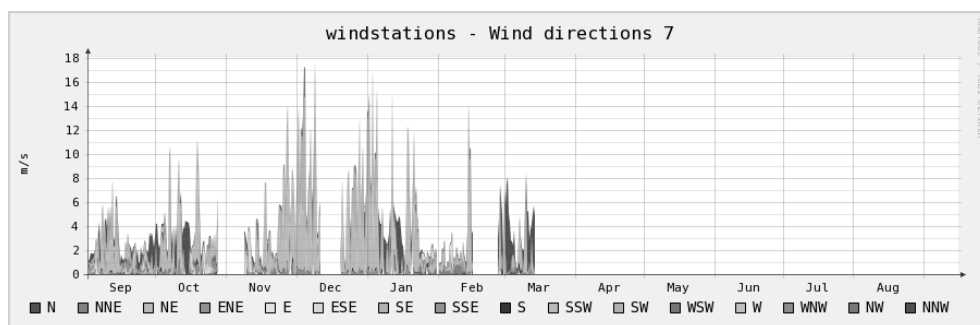




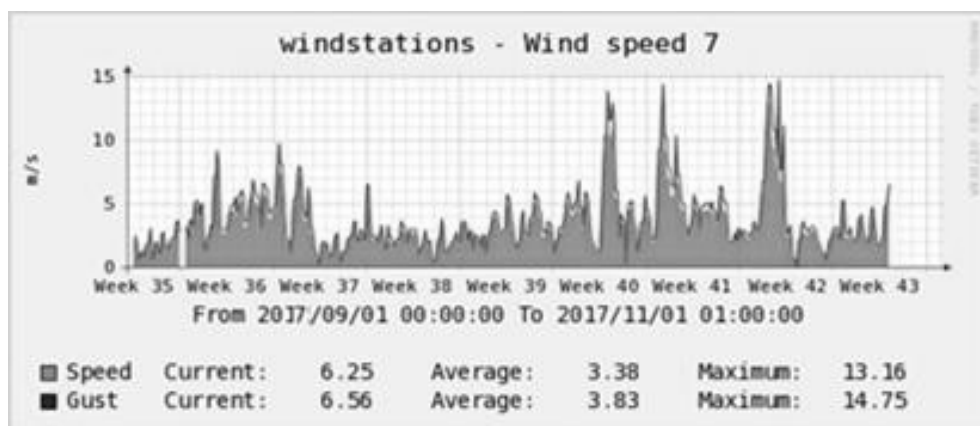
a



б



в



д

Рис. 5. Результати досліджень вітрових потоків щоденно (а), щотижнево (б), щомісячно (в) та швидкості вітру (д) для окремої ділянки місцевості

Figure 5. Results of researches of wind streams daily (a), weekly (b), and monthly (c) and wind speed (d) for a separate area of the area

Для точного аналізу місцевості й детального апробування наявних математичних моделей вітро-турбінних генераторів необхідно створити надпрецизійний програмно-апаратний комплекс моніторингу вітрових потоків, необхідним завданням якого є відбір параметрів вітру на пропонованій місцевості з великою точністю та роздільною здатністю у часі, що відповідно дасть змогу розробити точний прогноз про доцільність встановлення вітроенергетичних станцій на цій місцевості та розташування ВТГ. Експериментальні дані візуально подано на рис. 4 (а – б).

Спектри відображають вітропотенціал на відповідній місцевості та слугують вихідним вектором для прогнозування вироблення електроенергії з енергії вітру. Для підтвердження можливості використання розробленої комп'ютерної системи моніторингу вітропотенціалу проведено 11 експериментів та отримано дані стосовно швидкості та напрямку вітру.

На рис. 5 наведено результати досліджень вітрових потоків та швидкості вітру для окремої ділянки місцевості (точка 7). Реєстрація вітрових потоків здійснювалась щоденно, щотижнево та щомісячно (рис. 5, а–в). Швидкість вітру зареєстрована для окремої ділянки місцевості (рис. 5, д).

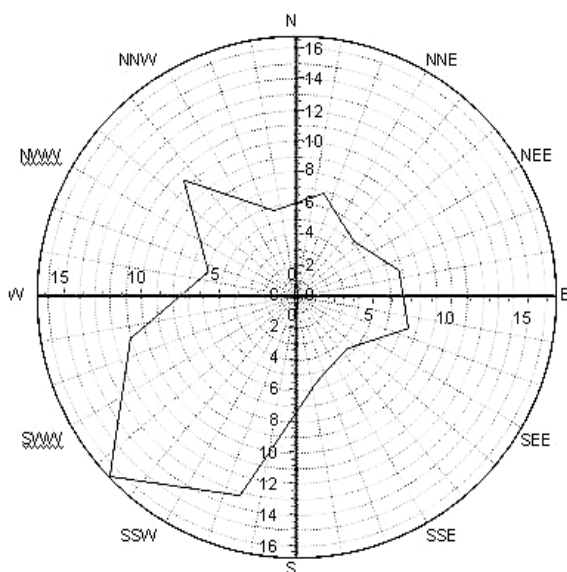


Рис. 6. Роза вітрів

Figure 6. Wind rose

Роза вітрів є критерієм визначення правильного розташування ВТГ. Згідно з даними, наведеними на рис. 6, переважають вітри – південно-західний-західний (south-west-west, SWW), південно-південно-західний (south-south-west, SSW). Відповідно, вітротурбінні генератори повинні встановлюватись перпендикулярно до напрямку цих вітрів, щоб не затінити один одного. За визначеним

вітропотенціалом обґрунтовують вибір типу вітро-турбінних генераторів.

## Висновки

Запропоновано концептуальний підхід до впровадження комп'ютерного моніторингу параметрів вітрового потоку на основі інформаційної програми моніторингу та методології реєстрації параметрів вітру. Розроблено комп'ютерну систему реєстрації вітрового потоку та швидкості вітру на основі алгоритмічно-програмного забезпечення. Отримано експериментальні результати комп'ютерного моніторингу швидкості вітру та напрямку вітрового потоку і, на цій основі, побудовано розу вітрів, яка є критерієм прогнозування доцільності встановлення вітроенергетичних станцій та оптимального вибору вітротурбінних генераторів.

## Література

- [1] Energy Strategy of Ukraine for the period up to 2035. "Safety, Energy Efficiency, Competitiveness". [Online]. Available: <http://195.78.68.67/minugol/doccatalog/document?id=245234103>.
- [2] National Information Center for Cooperation with the EU in the field of science and technology. EU Framework for Research and Innovation Horizon 2020. [Електронний ресурс]. [Online]. Available: [http://www.fp7ncp.kiev.ua/assets/Horizont\\_2020/HORIZON-20201.pdf](http://www.fp7ncp.kiev.ua/assets/Horizont_2020/HORIZON-20201.pdf).
- [3] О. Волкова, О. Третьяков, І. Черваньов, Моделювання вітрового потенціалу локальної ділянки лісостепу для потреб вітроенергетики з використанням ГІС-технологій, Укр. географічний журнал, ном. 4, с. 10–16, 2015.
- [4] М. Кузнєцов, Особливості моделювання потужності вітрових електростанцій, розташованих на обмеженій території, Відродження енергетики, ном. 4, с. 57–61, 2014.
- [5] Держспоживстандарт України, ДСТУ 8307:2015. Вітроенергетика. Метеопости для вимірювання параметрів вітрового потоку. Київ, Україна, 2015.
- [6] Д. Прокопчук, Є. Цинка, Г. Хмиз, Патент України UA 69239 U. Система відбору електричної енергії з відновлювальних джерел, 2012, бюл. № 8.
- [6] Я. Молодан, Сучасні підходи до оцінки та аналізу основних вітрових характеристик для цілей вітроенергетики, Проблеми безперервної географічної освіти і картографії. Збірник наук. праць, Харків, Україна, ном. 18, с. 115–120, 2013.
- [7] Y. Pichugina, A. Brewer, R. Banta et al, "Monitoring Wind Flow in Complex Terrain for Improvement of Turbine Rotor-Layer Wind Forecasts", Light, Energy and the Environment, paper EW2B.2. OSA, Technical Digest, Optical Society of America, 2017.
- [8] M. Sagrillo, "How to Estimate Your Average Wind Speed", WindLetter, vol. 23, iss. 1, p. 4, 1996.
- [9] EMD International A/S, Homepage. [Online]. Available: <https://www.emd.dk/windpro/>

## References

- [1] Energy Strategy of Ukraine for the period up to 2035. "Safety, Energy Efficiency, Competitiveness". [Online]. Available: <http://195.78.68.67/minugol/doccatalog/document?id=245234103>.

- [2] National Information Center for Cooperation with the EU in the field of science and technology. EU Framework for Research and Innovation Horizon 2020. [Online]. Available: [http://www.fp7ncp.kiev.ua/assets/Horizont\\_2020/HORIZON-20201.pdf](http://www.fp7ncp.kiev.ua/assets/Horizont_2020/HORIZON-20201.pdf)
- [3] O. Volkovaya, O. Tretyakov, I. Chervanov, "Modeling of the wind potential of the local area of the forest steppe for the needs of wind energy with the use of GPS-technologies", *Ukr. Geograph. Journ.*, no. 4, p. 10–16, 2015.
- [4] M. Kuznetsov, "Features of power modeling of wind power plants located on a limited territory", *Renewable energy*, no. 4, p. 57–61, 2014.
- [5] Derzhspozhyvstandart of Ukraine, DSTU 8307: 2015. Wind power. Meteoposts for measuring the parameters of the wind flow. Kyiv, Ukraine, 2015.
- [6] D. Prokopchuk, E. Tsynka, G. Khmyz, Patent of Ukraine UA 69239 U. System of Receiving Electric Power from Renewable Sources, 2012, bull.8.
- [6] Ya. Molodan, "Modern approaches to the assessment and analysis of the main wind characteristics for wind energy", *Problems of continuous geographic education and cartography. Bull. of Sc. Works, Kharkiv, Ukraine*, iss. 18, p. 115–120, 2013.
- [7] Y. Pichugina, A. Brewer, R. Banta et al, "Monitoring Wind Flow in Complex Terrain for Improvement of Turbine Rotor-Layer Wind Forecasts", *Light, Energy and the Environment, paper EW2B.2.OSA, Technical Digest, Optical Society of America*, 2017.
- [8] M. Sagrillo, "How to Estimate Your Average Wind Speed", *WindLetter*, vol. 23, iss. 1, p. 4, 1996.
- [9] EMD International A/S, Homepage. [Online]. Available: <https://www.emd.dk/windpro/>